



6. Продоус О. А. Гидравлический расчет трубопроводов из полимерных материалов с учетом параметров шероховатости внутренней поверхности труб / О. А. Продоус, П. П. Якубчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 11. – С. 55–60.
7. Добромислов А. Я. Об учете шероховатости пластмассовых труб / А. Я. Добромислов, О. А. Продоус // Энергетическое строительство. – 1985. – № 6. – С. 72–74.
8. Продоус О. А. О качестве внутренней поверхности пластмассовых труб / О. А. Продоус, А. Я. Добромислов, И. Л. Шашкова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1987. – № 5. – С. 6–8.
9. Продоус О. А. От субъективного к объективному в оценке технического состояния городских канализационных сетей / О. А. Продоус // Известия Академии жилищно-коммунального хозяйства. Городское хозяйство и экология. – 2000. – № 1. – С. 30–41.
10. Продоус О. А. Критерии выбора способов бестраншейного ремонта канализационных сетей / О. А. Продоус // Известия Академии жилищно-коммунального хозяйства. Городское хозяйство и экология. – 2001. – № 4. – С. 52–60.
11. Продоус О. А. Технологическое оборудование и материалы для бестраншейного ремонта инженерных сетей. Выбор приоритетов / О. А. Продоус // Оборудование. Разработки. Технологии. – 2007. – № 3 (03).
12. Продоус О. А. Приоритеты при выборе технологического оборудования и материалов для бестраншейного ремонта инженерных сетей в регионах Российской Федерации / О. А. Продоус // РОБТ. – 2008. – С. 30–31.
13. Продоус О. А. Применение полиэтиленовых труб ПЭ 100 для бестраншейного ремонта напорных трубопроводов / О. А. Продоус, Л. Д. Терехов, А. В. Федорчук // Вестник ИргТУ. – 2014. – № 2. – С. 144–147.
14. Чжунчжу В., Тянь Л. Комплексный анализ затрат на раскопку и бестраншейный ремонт городских канализационных трубопроводов / В. Чжунчжу, Л. Тянь // Водоснабжение и канализация. – 2008, – № 34 (6). – С. 95–99.
15. Zhongzhu W., Tian L. Comprehensive cost analysis of excavation and trenchless rehabilitation for urban drainage pipelines / W. Zhongzhu, L. Tian // Water Supply and Drainage, – 2008, – № 34 (6), – С. 95–99. (in Chinese).
16. Продоус О. А. Обоснованный выбор технологии бестраншейного ремонта канализационных сетей для условий Китайской Народной Республики / О. А. Продоус, Ван Дунлян // Инженерные системы. – 2025. – № 3. – С. 5–7.

© О. А. Продоус, Дунлян Ван

Ссылка для цитирования:

Продоус О. А., Ван Дунлян. Гидравлическое обоснование выбора предпочтительного способа бестраншейного ремонта канализационных сетей для условий Китайской Народной Республики // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 2 (52). С. 16–20.

УДК 624.04

DOI 10.52684/2312-3702-2025-52-2-20-28

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

В. А. Зинькова, Н. А. Смоляго

Зинькова Виктория Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, тел.: + 7 (920) 205-63-99; e-mail: vikzinkova@mail.ru;

Смоляго Нина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, тел.: + 7 (910) 224-90-59; e-mail: smoliago@mail.ru

Несущую способность конструкции определяют ее топология, геометрия и параметры элементов. Выбор топологии сопряжен с такими факторами, как расположение и интенсивность силового поля, устойчивость равновесия сжатых элементов, необходимость «лишних» связей. Проектирование топологии берет начало в интуитивном подходе инженеров, накопивших опыт синтеза конструкций. Появились закономерности и теоремы, касающиеся синтеза топологии. Привлечение к этому процессу вариационного принципа стационарного действия придает фундаментальность изысканий. Он обеспечивает при заданных условиях абсолютный минимум расхода материала. На примере полигональной фермы показана корректировка решетки в отношении наклона раскосов. Дано обобщение теоремы Васютинского о равнонапряженных системах на случай учета проблемы устойчивости стержней.

Ключевые слова: стержневые системы, синтез, топология, конфигурация, вариационный принцип стационарного действия.

DESIGN EVOLUTION OF PIVOTAL SYSTEMS TOPOLOGY

V. A. Zinkova, N. A. Smolyago

Zinkova Victoriya Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, phone: + 7 (920) 205-63-99; e-mail: vikzinkova@mail.ru;

Smolyago Nina Alekseyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, phone: + 7 (910) 224-90-59; e-mail: smoliago@mail.ru

The load-bearing capacity of a structure is determined by its topology, geometry, and element parameters. The choice of topology is associated with such factors as the location and intensity of the force field, the stability of the equilibrium of compressed elements, and the need for "extra" connections. Topology design originates from the intuitive approach of engineers who have accumulated experience in the synthesis of structures. Patterns and theorems concerning the synthesis of topology have appeared. The involvement of the variational principle of stationary action in this process gives the fundamental character of the research. It provides an absolute minimum of material consumption under specified conditions. The example of a polygonal truss shows the adjustment of the lattice with respect to the slope of the braces of the truss. A generalization of Wasiutski's theorem of systems equivalence is given in the case of taking into account the problem of stability of compressed rods.

Keywords. *pivotal systems, synthesis, topology, configuration, variational principle of stationary action.*

Введение

Прогресс информационных технологий и технического уровня в строительстве неотделим от накопления научных знаний в части совершенствования методов оптимального проектирования несущих конструкций. Новые направления объемно-планировочных решений требуют приемлемой постановки оптимизационных задач. Современная высокопроизводительная техника позволяет решать задачи с большим числом варьируемых параметров при учете номенклатуры имеющихся материалов и изделий.

Синтез конструкций эквивалентен умению построить ее достаточно точную математическую модель, которая давала бы возможность устанавливать параметры при переменчивости среды. Предпосылки модели могут произойти из опыта или познания природных созданий.

В то же время наблюдается отход от классических методов синтеза конструкций в сторону комбинирования стратегий. Используются стохастические алгоритмы, не связанные с заданием целевой функции.

Предложенная тема статьи имеет двоякую цель. Во-первых, краткий литературный обзор дает представление о зависимости вектора эволюции несущих конструкций от состояния науки и экономики. Во-вторых, показана необходимость уязвки современных подходов к оптимальному поиску решений с общезначимыми принципами, обеспечивающими их научное содержание.

На научный подход к созданию несущих конструкций, в частности, к мостостроению первым обратил внимание русский инженер и ученый Д. И. Журавский, создавший теорию расчета мостовых ферм. Для однопролетных и неразрезных ферм он предложил конструктивные идеи, позволившие повысить их несущую способность. Введенные им многораскосные системы значительно превосходили обычные раскосные строения. Теоретические результаты подтверждались экспериментально. Развитию идей Д. И. Журавского способствовало становление металлургии. Металлические раскосы перестали быть вспомогательными элементами, объединя-

ющими пояса, и превратились в несущие элементы. Различались растянутые и сжатые раскосы: первые выполнялись плоскими, вторые формировались как пространственные с целью обеспечения всесторонней жесткости.

Большой вклад в развитие топологии мостовых ферм внес профессор Л. Д. Проскураков, предложивший шпренгельные элементы, которые оправдали себя в отношении расхода материала при больших пролетах. Он внедрил в практику мостостроения высокие полигональные фермы с простой и шпренгельной треугольной решеткой.

Появление в 1897 году книги В. Г. Шухова «Стропила» [1], посвященной теории арочных ферм, положило начало рациональному проектированию несущих конструкций с позиций их топологии и геометрии. Наиболее рациональной оказалась ферма с параболическим очертанием верхнего пояса. Раскосы, испытывающие сжатие, заменены легкими лучевыми затяжками из предварительно напряженного металла, которые воспринимали растяжение.

Интерес к вопросам топологии возрос во второй половине XX века. В ряде работ в проектом пространстве задавались узлы, в число которых входили точки нагружения и наиболее перспективное расположение опор. Исходная система образовывалась шарнирным соединением каждого узла со всеми остальными. На основе линейного программирования получен оптимальный проект путем удаления «нулевых» стержней и некоторых узлов. Авторы ограничивались допустимыми напряжениями и одним вектором нагружения.

В других работах этот подход распространен на несколько векторов нагружения посредством алгоритма нелинейного программирования и итерационного метода изменения топологии. Как и в предыдущих работах, отсутствовали ограничения на перемещения.

Оставалась вне поля зрения теорема Леви: из всех ферм заданных возможных конфигураций при одном нагружении без учета потери устойчивости стержней найдется такая статически определимая, объем (вес) материала которой будет не больше объема (веса) любой другой.

В работе [2] утвердившиеся установки принимаются с учетом теоремы Леви. Наряду с ограничениями на напряжения рассматриваются ограничения на перемещения. Кроме того, к новым принципам проектирования относится предложение последовательности удаления стержней.

Автор настаивает на взаимосвязи проектирования топологии и геометрии конструкции, предполагая, например, вариацию полигонального очертания верхнего пояса фермы при горизонтальном нижнем поясе.

Основанная на весовой оптимизации, работа [2] в общем отклоняется от универсальной постановки задачи, базирующейся на вариационных принципах синтеза строительной механики [3].

В частном случае в силу двойственности постановки задач на условный экстремум с интегральными связями объем материала может быть принят как исходный функционал в задаче формообразования при дополнительном условии с энергетическим содержанием. Этому требованию удовлетворяет упомянутое выше ограничение на перемещение, являющееся производной потенциальной энергии деформации и сохраняющее интегральную связь, но противоречит ограничению на напряжение, не имеющее такого рода связи.

Каждый из заданных узлов соединяется стержнями с другими узлами. Затем идет процесс исключения отдельных стержней, контролируемый геометрической неизменяемостью и заданными ограничениями. Конечная цель – статически определяемая система, которая может быть скорректирована согласно конъюнктурным соображениям технологического плана.

Описанный процесс, основанный на методах математического программирования, предусматривает большой объем вычислений и из-за произвола последовательности исключения стержней упускает из вида наиболее привлекательную статически определяемую систему.

Любопытно признание автора (с. 225): «Интересно отметить, что на практике для конструкции этого типа (имеется в виду шарнирная ферма. – Авт.) указанная форма может быть с успехом выбрана инженером интуитивно».

С признанием интуиции, опыта проектирования при синтезе топологии и геометрии конструкции нельзя не согласиться. Постоянно накапливаемый объем теоретических исследований и практического приложения в области анализа функционирования различного рода конструкций при посредничестве интернета должен явиться значительным подспорьем в деле создания оптимальных систем [4].

Метод

Рассмотрим проектирование топологии конструкций с позиций вариационного принципа стационарного действия [3]: потенциальная энергия системы в положении устойчивого рав-

новесия достигает абсолютного минимума по перемещениям в функциональном пространстве, расширенном за счет полей функций конфигурации. В случае линейно-упругого тела это относится к потенциальной энергии деформации.

Используем обобщенный вариационный принцип Кастильяно и рассмотрим изопериметрическую задачу для фермы с уравнением связи:

$$\sum_{i=1}^n A_i l_i = V_0 \quad (1)$$

и функционалом:

$$J = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i} + \mu \left(\sum_{i=1}^n A_i l_i - V_0 \right), \quad (2)$$

где n – число стержней длиной l_i , имеющих площадь поперечного сечения A_i и продольные усилия N_i ; φ – коэффициент уменьшения расчетного сопротивления R для сжатых стержней; E – модуль Юнга; μ – множитель Лагранжа, имеющий в данном случае постоянную величину; V_0 – заданный объем материала.

Условие стационарности функционала представляем в виде:

$$\delta J = \frac{\partial J}{\partial A_i} \delta A_i + \frac{\partial J}{\partial \mu} \delta \mu = 0. \quad (3)$$

Следствиями его стационарности являются условия: $\partial J / \partial A_i = 0$, $\partial J / \partial \mu = 0$, из которых вытекают уравнения связи (1) и специфические уравнения:

$$-\frac{N_i^2}{2E\varphi_i^2 A_i^2} + \mu = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Величину $N_i / (\varphi_i A_i)$ представим как квазинатяжение $\bar{\sigma}_i$:

$$\frac{\bar{\sigma}_i^2}{2E} = \mu \quad (= \text{const}). \quad (5)$$

Формула (5) свидетельствует о квазиравнонапряженности системы (обобщение теоремы Васютинского [5], сформулированной без учета возможной потери устойчивости элементов системы).

Принимая $\bar{\sigma}_i = R$ и учитывая, что $|N_i| = R\varphi_i A_i$, получаем выражение потенциальной энергии деформации в виде:

$$U = \frac{R^2}{2E} V, \quad (6)$$

где V – объем материала системы, вычисляемый по формуле:

$$V = \sum_{i=1}^n A_i l_i. \quad (7)$$

Формула (6) свидетельствует, что минимуму энергии U соответствует минимум объема V . Таким образом, энергетический критерий является главенствующим по отношению к весовой оптимизации. Его становление прослеживается в обзорной статье [6] и в работах [7–13].

В некоторых исследованиях принимается, что осевой момент поперечного сечения стержня есть линейная функция площади сечения: $I = kA$. Это позволяет распространить предложенную

методику на изгибаемые элементы, что позволяет расширить область квазиравнонапряженных систем [14–18].

Результаты и обсуждение

Кардинальный путь экономии материала – уменьшение потенциальной энергии деформации. Подвесная трехстержневая система становится геометрически неизменяемой при введении раскоса. Из двух вариантов приемлемым оказывается тот, который устремлен к наиболее нагруженному узлу. Потенциальная энергия деформации имеет меньшую величину, чем в альтернативном варианте. Тенденция «обволакивания» материей силового поля наблюдается в природе как следствие адаптации к воздействиям внешних факторов. С этим связана идея восходящих и нисходящих раскосов в стропильной ферме.

Вариацию топологии фермы ограничиваем узлами, расположенными на вертикальных линиях,

служащих границами панелей. Исключение могут составлять опорные узлы. В каждой панели предполагается наличие одного раскоса, который может быть восходящим или нисходящим.

Задача решается итерационным способом при определенном выборе варьируемых параметров (например, длин стоек и направления раскосов, а также коэффициента φ). Выделяются стержни с переменным знаком усилий. Проверка удовлетворения принятым знакам завершает итерационный цикл. Практика показала сходимость результатов в ходе 2–3 итераций [19].

Для фермы изменение топологии можно связать с заменой восходящих раскосов нисходящими. В качестве примера рассмотрим шестипанельную ферму пролетом $l = 6d = 18$ м с горизонтальным нижним поясом и высотой $h = 2$ м (рис.). Другие данные: $F = 70$ кН, $R = 240$ МПа, $E = 210$ МПа.

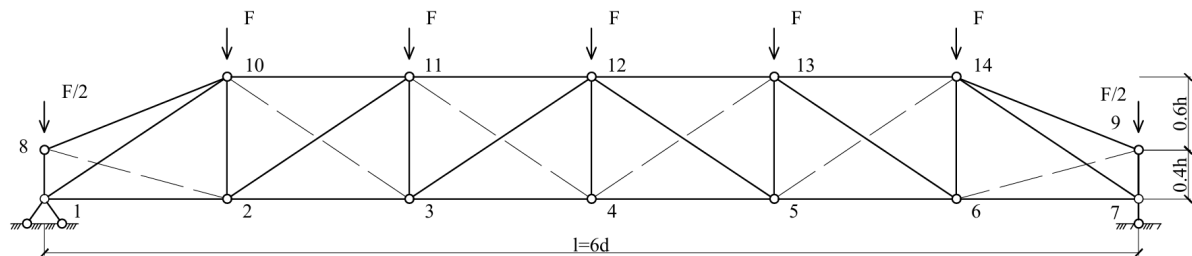


Рис. Ферма с нумерацией узлов и показом категорий раскосов: восходящие – сплошные линии (вариант I), нисходящие – штриховые линии (вариант II)

Fig. A truss with node numbering and a display of diagonal categories: ascending – solid lines (option I), descending – dashed lines (option II)

В таблице 1 даны длины стержней l_i , внутренние усилия N_i , площади поперечных сечений A_i , минимальные радиусы инерции $i_{\min}$. Обозначение стержней соответствует рисунку 1.

В целях исключения итерационного процесса при определении площадей сечений сжа-

тых стержней коэффициент φ принимается равным 0,5. При его назначении учитывалось ограничение гибкости сжатых элементов пояса и решетки. Их площади поперечных сечений должны иметь соответствующие минимальные радиусы инерции [20–23].

Таблица 1

Геометрические характеристики и внутренние усилия стержней фермы									
Вариант фермы		I				II			
стержни		l , м	N , кН	A , см ²	$i_{\min}$, см	l , м	N , кН	A , см ²	$i_{\min}$, см
катег.	обозн.								
нижний пояс	1–2	3	262,5	10,94	–	3	–	–	–
	2–3	3	420	17,5	–	3	262,5	10,94	–
	3–4	3	472,5	19,69	–	3	420	17,5	–
стойки	1–8	0,8	–35	2,92	0,71	0,8	–210	17,5	0,71
	2–10	2	105	4,38	–	2	–70	5,83	1,79
	3–11	2	35	1,46	–	2	–105	8,75	1,79
	4–12	2	–	–	–	2	–70	5,83	1,79
раскосы	1–10	3,61	–315,5	26,29	3,22	–	–	–	–
	2–11	3,61	–189,3	15,77	3,22	–	–	–	–
	3–12	3,61	–63,1	5,26	3,22	–	–	–	–
	2–8	–	–	–	–	3,1	271,7	11,32	–
	3–10	–	–	–	–	3,61	189,3	7,89	–
	4–11	–	–	–	–	3,61	63,1	2,63	–
верхний пояс	8–10	3,23	–	–	–	3,23	–282,7	23,56	2,88
	10–11	3	–262,5	21,88	2,68	3	–420	35	2,68
	11–12	3	–420	35	2,68	3	–472,5	39,38	2,68

По формуле (7) вычисляем объем материала: $V_1 = 0,099 \text{ м}^3$; $V_2 = 0,103 \text{ м}^3$. По формуле (6) вычисляем потенциальную энергию деформации: $U_1 = 11,996 \text{ кДж}$; $U_2 = 12,028 \text{ кДж}$.

Таким образом, ферма с восходящими раскосами имеет экономическое превосходство перед фермой с нисходящими раскосами, то есть предпочтительна с точки зрения топологии.

Заключение

Эволюция проектирования топологии стержневых систем шла в соответствии с накопленным опытом инженерного творчества. Становление энергетического критерия структурного синтеза определило ее новый этап – обращение к общезначимому физическому принципу.

Современные трудности оптимального проектирования происходят от многообразия критериев, стремящихся объять необъятное. Эти критерии привносятся часто по чисто утилитарным соображениям, далеких от механики деформируемого твердого тела и общезначимого принципа стационарного действия.

Благодарности

Авторы выражают признательность доктору технических наук профессору Александру Гавриловичу Юрьеву за советы в ходе работы над статьей.

Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.

Список литературы

1. Шухов В. Г. Строительная механика. Избранные труды В. Г. Шухова. – Москва : Наука, 1977. – 193 с.
2. Majid K. I. Optimum design of structures / K. I. Majid. – London : Newnes-butterworths, 1979. – 238 p.
3. Юрьев А. Г. Оптимизация топологии и геометрии конструкций / А. Г. Юрьев. – Белгород : БГТУ, 2018. – 96 с.
4. Stromberg L. L. Topology optimization for braced frames: combining continuum and beam/column elements / L. L. Stromberg, A. Beghini, W. F. Baker, G. H. Paulino // Engineering Structures. – 2012. – № 37. – P. 106–124.
5. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength / Z. Wasiutynski // Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Series des Sciences Techniques. – 1960. – Vol. 8, № 6. – P. 259–268.
6. Тамразян А. Г. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений / А. Г. Тамразян, А. В. Алексейцев // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, вып. 1. – С. 12–30. – DOI:10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
7. Панченко Л. А. Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности / Л. А. Панченко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2022. – № 1. – С. 44–50. – DOI: 10.34031/2071-7318-7-1-44-50.
8. Мищенко А. В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия / А. В. Мищенко // Известия вузов. Строительство. – 2021. – № 6. – С. 20–32. – DOI: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32.
9. Крыженич Г. Б. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций / Г. Б. Крыженич, А. Р. Филатов // Тр. Крыловского гос. науч. центра. – 2020. – № 1 (391). – С. 95–108. – DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108.
10. Ширалиев С. Д. Исследование критериев рациональности многопролетных балок / С. Д. Ширалиев, А. А. Бонинская, А. В. Мищенко // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2020. – № 1. – С. 9–14.
11. Лоцманова С. В. Оптимизация опорных устройств рамных систем на основе энергетического критерия / С. В. Лоцманова, Е. А. Владимирова // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства. – Гродно, 2021. – С. 141–145.
12. Шаранин В. Ю. Алгоритм быстрого численного интегрирования в задачах устойчивости оболочечных конструкций / В. Ю. Шаранин, А. А. Семенов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 2 (44). – С. 133–140. – DOI: 10.52684/2312-3702-2023-44-2-133-140. – EDN LGOEUA.
13. Рекунов С. С. Исследование вопросов надежности сооружений разных типов при экстремальных воздействиях. Часть первая / С. С. Рекунов, А. А. Чураков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 2 (44). – С. 57–61. – DOI: 10.52684/2312-3702-2023-44-2-57-61. – EDN SEWOIH.
14. Bendspe M. P. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method / M. P. Bendspe, N. Kikuchi // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1988. – № 71 (2). – P. 197–224.
15. Diaz A. R. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method / A. R. Diaz, N. Kikuchi // Int. J. Numer. Methods Eng. – 1992. – № 35. – P. 1487–1502.
16. Bendspe M. P. Topology optimization: theory, methods, and applications / M. P. Bendspe, O. Sigmund. – Berlin : Springer. – 2003. – 376 p.
17. Rozvany G. I. N. Structural design via optimality criteria / G. I. N. Rozvany. – Dordrecht : Kluwer, 1989. – 463 p.
18. Rozvany G. I. N. Topology optimization in structural design / G. I. N. Rozvany, N. Zhou, O. Sigmund // Advances in design optimization. – London : Adeli, 1994. – P. 240–299.
19. Юрьев А. Г. Структурный синтез стержневых систем / А. Г. Юрьев, Л. А. Панченко, В. А. Зинькова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2022. – № 10. – С. 34–40.
20. Юрьев А. Г. Нелинейные задачи косоугольного изгиба / А. Г. Юрьев, В. А. Зинькова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 11. – С. 37–45. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-37-45.
21. Zinkova V. A. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections / V. A. Zinkova, A. G. Yuriev, E. V. Peshkova // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 5, vol. 10. – P. 12391–12398.
22. Юрьев А. Г. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости / А. Г. Юрьев, Н. А. Смоляго, О. А. Яковлев // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 25–31. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31.

23. Yang R. J. Automotive applications of topology optimization / R. J. Yang, A. I. Chahande // Structural Optimization. – 1995. – № 9. – P. 245–249.

© В. А. Зинькова, Н. А. Смоляго

Ссылка для цитирования:

Зинькова В. А., Смоляго Н. А. Эволюция проектирования топологии стержневых систем // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 2 (52). С. 20–25.

УДК 691; 628.4.036

DOI 10.52684/2312-3702-2025-52-2-25-30

СИСТЕМА ПОЛНОЙ РЕЦИКЛИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р. И. Шаяхмедов, С. С. Евсеева

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

Шаяхмедов Растам Ирфагильевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры экспертизы, эксплуатации и управления недвижимостью, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань; e-mail: rastams@mail.ru;

Евсеева Софья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры экспертизы, эксплуатации и управления недвижимостью, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань

Цель исследования – проектирование «минимальной номенклатуры» строительных материалов, обеспечивающей их полную рециклизацию. Научная новизна – гипотеза о принципиальной возможности существования «минимальной номенклатуры» рассматривается и проверяется впервые. Актуальность – разнообразие используемых строительных материалов затрудняет их рециклизацию, создавая гетерогенные трудноразделимые смеси. Методология исследования – методы и приемы инновационного консалтинга. Вывод: доказана принципиальная возможность существования «минимальной номенклатуры». Достигнутые результаты: в состав «минимальной номенклатуры» отобраны пять базовых строительных материалов; разработана методика определения степени перспективности того или иного материала и размера экономического ущерба от применения неперспективного материала.

Ключевые слова: рециклизация строительных материалов, минимальная номенклатура строительных материалов, гетерогенные трудноразделимые смеси, число циклов рециклизации.

THE SYSTEM OF COMPLETE RECYCLING OF BUILDING MATERIALS

R. I. Shayakhmedov, S. S. Yevseyeva

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

Shayakhmedov Rastam Irfagilyevich, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Real Estate Expertise, Operation and Management Department, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan; e-mail: rastams@mail.ru

Yevseyeva Sofiya Sergeyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Expertise, Operation and Management of Real Estate Department, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan

The purpose of the study is designing a "minimum range" of building materials, ensuring their complete recycling. Scientific novelty – the hypothesis of the fundamental possibility of the existence of a "minimal nomenclature" is being considered and tested for the first time. Relevance – the variety of building materials used makes it difficult to recycle them, creating heterogeneous, difficult-to-separate mixtures. Research methodology is the methods and techniques of innovative consulting. Conclusion: the fundamental possibility of the existence of a "minimal nomenclature" has been proved. Achieved results: five basic building materials have been selected as part of the "minimum nomenclature"; a methodology has been developed to determine the degree of prospects of a particular material and the amount of economic damage from the use of unpromising material.

Keywords: recycling of building materials, minimum nomenclature of building materials, heterogeneous difficult-to-separate mixtures, number of recycling cycles.

Разнообразие строительных материалов (СМ), используемых человечеством в различных сочетаниях, непрерывно возрастает. Это расширяет возможности существующих технологий и способствует созданию новых. Однако, как го-

ворили древние: «Под каждым цветком скрывается змея». Разнообразие затрудняет рециклизацию используемых СМ, создавая гетерогенные трудноразделимые смеси (строительный мусор) – в ежегодном объеме несколько сот миллионов