

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40

Юрьев А.Г., \*Панченко Л.А., Зинькова В.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: Panchenko.bstu@mail.ru

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

**Аннотация.** Характерными признаками несущей конструкции являются ее топология, геометрия и параметры элементов. Процесс создания конструкции проходит путь от проекта до его материального воплощения. Топология определяет контур противостояния нагрузке, которое окончательно проявляется в конфигурации и материале. Фундаментальное начало проекта конструкции составляет вариационный принцип структурного синтеза с энергетическим содержанием. Он обеспечивает минимальный расход материала. Его принципиальное распределение производится на этапе проектирования топологии как противостояние внешнему силовому полю. Геометрия в большей степени подчинена директивным установкам, связанным с характером нагрузки и функциональными назначениями конструкции. Параметры элементов завершают определение конфигурации, обеспечивая удовлетворение условиям прочности, жесткости и устойчивости равновесия. Используются научные результаты, касающиеся учета влияния конфигурации на эксплуатационные качества конструкции и подхода к практической теории структурного синтеза. Для иллюстрации проектной методики избрана четырехстержневая система. Регулирование параметров прочности и жесткости можно эффективно вести при использовании композиционных материалов, в частности, фибробетона, поскольку изменение прочности соотносится с параметрами волокон и их процентным содержанием при незначительном изменении модулей материала.

**Ключевые слова:** Стержневые системы, синтез, топология, геометрия и конфигурация конструкции, оптимизация, энергетический критерий, минимум расхода материалов.

**Введение.** Создание несущей конструкции, которая в рамках обусловленных норм эффективно проявляет функциональные качества, является целью структурного синтеза.

Синтез конфигурации конструкции включает определение ее топологии, геометрии и параметров элементов. Под топологией подразумевается расположение узлов и способ их соединения для получения геометрически неизменяемой системы. Под геометрией подразумевается конкретное положение узлов, что обуславливает позиции элементов. Затем определяются параметры

элементов: размеры сечений стержней, толщины пластинок и оболочек и так далее.

Несущая конструкция по определению предназначена для восприятия конкретной нагрузки. Ее топология подчинена этой задаче. В рамках статически определимой задачи система с четырьмя узлами, из которых два опорные, имеет формально три варианта (рис. 1). Но в случае задания распределенной нагрузки на линии между нижними узлами вариант 1, б оказывается неприемлемым.

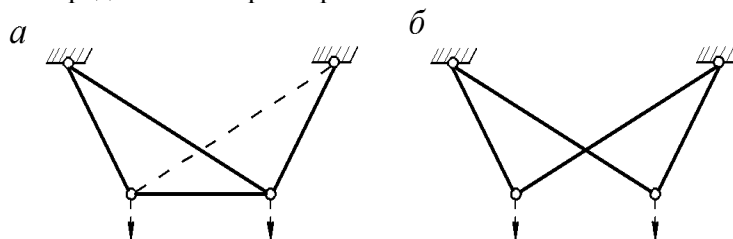


Рис. 1. Варианты топологии для системы с четырьмя узлами

Если же учесть, что ту же нагрузку может воспринять система, повернутая по отношению к системе, показанной на рис. 1, на  $180^\circ$ , то возник-

ает еще три варианта топологии (рис. 2). Напряженно-деформированное состояние в системах на рис. 1 и 2 будет различным из-за противоположности знаков усилий.

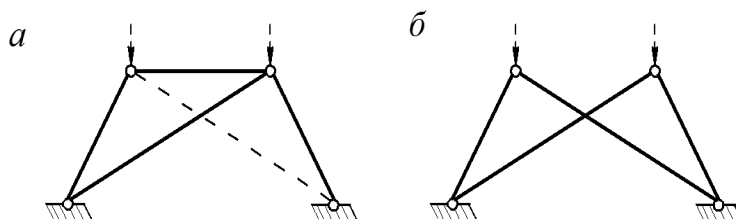


Рис. 2. Другие варианты топологии для системы с четырьмя узлами

Ввиду предопределенности положения нагрузки расстояние между нижними узлами на рис. 1, а (верхними узлами на рис. 2, а) будет директивным параметром. Такого же рода параметром является расстояние между линией опорных узлов и линией расположения нагрузки.

Воплощение теории структурного синтеза в практику включает анализ влияния топологии и геометрии конструкции на ее функциональное состояние. Из возможных вариантов конструктивных решений остается тот, в котором главные качества (прочность, жесткость и др.) достигаются за счет количественных изменений в отношении увеличения размеров элементов и применения более прочного материала, а прежде всего путем изменения конфигурации, то есть изменения структуры [1–3].

Принципы структурного синтеза инженерных конструкций неотделимы от объективных законов формирования природных систем [4]. Примером упомянутого качественного феномена служит архитектура ствола дерева. Простая цилиндрическая форма уступает место форме, близкой к конической. В нижней зоне дерево имеет не только больший диаметр (а, следовательно, и момент сопротивления), но и большую массу затвердевших тканей, что в целом создает достаточное сопротивление внешним воздействиям, имеющим характер сжатия с изгибом. К вершине дерева диаметр сечения уменьшается, ткани становятся эластичными, что в сочетании создает амортизацию действия ветровой нагрузки.

Топология играет немаловажную роль в рационализации природных конструкций. Прочность стеблей злаков, испытывающих большие ветровые нагрузки, достигается, прежде всего, за счет того, что изгибающие моменты, приходившиеся на сплошную стержень, перераспределяются за счет образования узлов, являющихся как бы встроенными шарнирами-демпферами.

В работе [5] представлен закон развития организма, в соответствии с которым максимум функциональной энергии соответствует минимуму материала. Биологическое раздражение вызывает усиление сопротивляемости локальной области посредством переноса веществ из отвлеченных, расслабленных областей.

Достаточное наполнение материей силового поля объясняет способность организмов приспосабливаться к длительным и многократным нагрузкам умеренной интенсивности посредством морфологической перестройки структуры. Природное структурообразование и такого же рода инженерное творчество предрасположены к единым законам и принципам.

**Методика.** Интерес к топологии стержневых конструкций проявился во второй половине XX века. В работе [6] рассмотрены три теоремы о структурных преобразованиях и их применение к совершенствованию топологии шарнирных систем.

Первостепенным условием для решения проблемы топологии несущих конструкций является наличие объективного критерия ее оптимальности и надлежащий отход от весовой оптимизации. Во главу угла поставлен минимум потенциальной энергии системы, ведущий к минимуму расхода материала [1, 7]. При весовой оптимизации этот показатель достигается лишь в частных случаях.

Совершенствование топологии континуальных систем наметилось в последние три десятилетия по мере роста производительности вычислительной техники [8].

В этой области широко используются численные методы. Обусловленная область делится на конечные элементы, вводится функция плотности материала. Оптимальное распределение ее по элементам ведется при ограничении на главные напряжения [9].

Однородное структурирование предложено в работе [10] и обобщено в монографии [11]. Уязвимой стороной метода является чередование областей с высокой и низкой плотностью материала, что вызывает трудности при практическом осуществлении проекта.

Прогресс в этом направлении предполагают симплекс-методы [12–15]. Для каждого конечного элемента вводится приемлемая плотность, которой соответствует модуль упругости материала со степенным законом. Определение топологии основано на минимуме потенциальной энергии системы (или перемещений узлов) при ограничении на объем материала. Такого рода постановка задачи соответствует вариационному принципу синтеза несущих конструкций.

Регулирование параметров прочности и жесткости можно эффективно вести при использовании композиционных материалов, в частности, фибробетона [16, 17], поскольку изменение прочности соотносится с параметрами волокон и их процентным содержанием при незначительном изменении модулей материала. Специфика нелинейных расчетов отражена в работах [18–20].

С точки зрения технологии строительства представляет интерес методология контроля сложности конструкций с оптимальной топологией [21]. Это ведет к экономии средств при производстве конструкций посредством уменьшения их сложности.

При совершенствовании топологии решетчатых рам можно использовать стержневые и континуальные конечные элементы [22], в том числе двухузловые балочные и четырехузловые четырехугольные конечные элементы.

**Основная часть.** Рассмотрим примеры оптимизации топологии четырехстержневых систем в рамках линейного физического закона [23, 24]. Поставленная во главу угла потенциальная энергия системы в данном случае равна по модулю потенциальной энергии деформации.

В частном случае ее выражение имеет вид:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i}, \quad (1)$$

где  $n$  – число стержней длиной  $l_i$  с площадью поперечного сечения  $A_i$  и продольной силой  $N_i$ ,  $E$  – модуль продольной упругости материала,

$\varphi_i$  – коэффициент, корректирующий его расчетное сопротивление.

Для растянутых стержней принимаем значение  $\varphi_i = 1$ . Для сжатых стержней коэффициент задается в соответствии с нормативными требованиями к определенной категории стержней. При назначенной величине  $\varphi_i$  определяется гибкость стержня, которая в свою очередь приводит к минимальному радиусу инерции поперечного сечения  $i_{min}$ .

Объем материала вычисляется по формуле:

$$V = \sum_{i=1}^n A_i l_i. \quad (2)$$

Обратимся к системе на рис. 1, а и придадим ей конкретное содержание (рис. 3). Штрихами обозначен возможный вариант стержня 4.

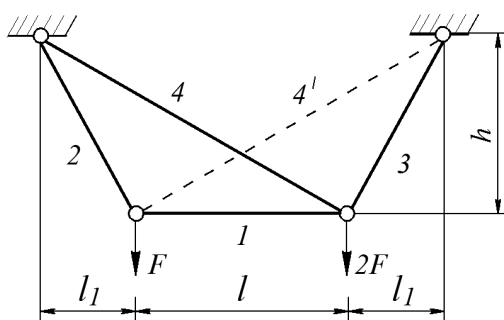


Рис. 3. Четырехстержневая система

Примем следующие исходные данные:  $l = 4$  м,  $l_1 = 1$  м,  $h = 3$  м,  $F = 700$  кН, материал – сталь с расчетным сопротивлением  $R_y = 240$  МПа и модулем продольной упругости  $E = 200$  ГПа.

Переход от первого (4) ко второму (4') варианту следует рассматривать как топологическое преобразование стержневой системы. Продольные силы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Продольные силы  $N_i$  для систем (рис. 3; 2, а)

Система	Вариант	$N_1$ , кН	$N_2$ , кН	$N_3$ , кН	$N_4$ , кН
рис.3	1	233	738	1353	227
„	2	467	861	1476	-227
рис.2, а	1	-233	-738	-1353	-227
„	2	-467	-861	-1476	227

При первом варианте топологии площади поперечных сечений стержней равны:  $A_1 = 9,72$  см<sup>2</sup>;  $A_2 = 30,74$  см<sup>2</sup>;  $A_3 = 56,36$  см<sup>2</sup>;  $A_4 = 9,45$  см<sup>2</sup>, потенциальная энергия деформации  $U = 5320$  Дж, объем материала  $V = 0,037$  м<sup>3</sup>. При втором варианте имеем:  $A_1 = 19,43$  см<sup>2</sup>;  $A_2 = 35,86$  см<sup>2</sup>;  $A_3 = 6,149$  см<sup>2</sup>;  $A_4 = 21,02$  см<sup>2</sup>;  $U = 7310$  Дж;  $V = 0,058$  м<sup>3</sup>.

Из табл. 1 видно, что при включении стержня 4 во всей системе имеет место растяжение, а при включении стержня 4' он оказывается сжатым, что потребовало обеспечения устойчивости его равновесия. Исходя из приемлемой гибкости стержня, равной 120, принимаем коэффициент  $\varphi = 0,45$ . При этом  $i_{min} = 583/120 =$

$=4,86$  см. Подбор профиля сечения и определение его размеров составляет отдельную задачу, выходящую за рамки данного исследования.

Преимущество в топологии оказалось на стороне первого варианта: потенциальная энергия деформации меньше на 37,4 %, а объем материала – на 56,8 %. Это можно связать с концентрацией материала в узле с большей нагрузкой.

Рассмотрим теперь систему на рис. 2, а при тех же геометрических параметрах и нагрузках (табл. 1). При включении стержня, показанного сплошной линией, во всей системе имеет место сжатие, а при включении стержня, показанного штрихами, – стержни 1, 2, 3 сжаты, а стержень 4'

растянут. Как и прежде коэффициент  $\phi$  принят равным 0,45.

Первому случаю соответствуют величины:  $A_1 = 21,6 \text{ см}^2$ ;  $A_2 = 68,31 \text{ см}^2$ ;  $A_3 = 125,24 \text{ см}^2$ ;  $A_4 = 21 \text{ см}^2$ ,  $U = 11822 \text{ Дж}$ ,  $V = 0,082 \text{ м}^3$ , второму случаю –  $A_1 = 43,18 \text{ см}^2$ ;  $A_2 = 79,69 \text{ см}^2$ ;  $A_3 = 136,64 \text{ см}^2$ ;  $A_4 = 9,45 \text{ см}^2$ ;  $U = 13150 \text{ Дж}$ ;  $V = 0,091 \text{ м}^3$ .

При сравнении вариантов прослеживается прежняя тенденция. В первом варианте величина  $U$  меньше на 11,2 %, а величина  $V$  на 11 %. Вме-

сте с тем оба варианта значительно уступают системе на рис. 3: в отношении  $U$  на 118,5 (79,9) %, в отношении  $V$  на 121,6 (56,9) %. Обеспечение устойчивости равновесия большого числа сжатых стержней потребовало дополнительного расхода материала.

На втором этапе проектирования конструкции определяем её геометрию. Отталкиваясь от системы на рис. 3, рассмотрим ее варианты (рис. 4).

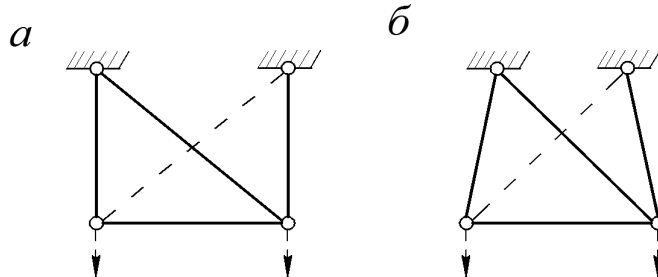


Рис. 4. Варианты геометрии для системы с четырьмя узлами

Принимая те же основные исходные данные, что и для системы на рис. 3, и сдвигая опоры на 1м (2м), вычислим продольные силы (табл. 2).

Характерные значения при величине  $\phi = 0,45$  даны в табл. 3.

Таблица 2

**Продольные силы  $N_i$  для систем (рис. 4)**

Система	Вариант	$N_1$ , кН	$N_2$ , кН	$N_3$ , кН	$N_4$ , кН
рис.4,а	1	0	700	1400	0
„	2	0	-700	-1400	0
рис.4,б	1	-233	738	1845	-495
„	2	-467	369	1476	495

Таблица 3

**Параметры и характеристики систем (рис. 4)**

Система	Вариант	$A_1$ , см <sup>2</sup>	$A_2$ , см <sup>2</sup>	$A_3$ , см <sup>2</sup>	$A_4$ , см <sup>2</sup>	$U$ , Дж	$V$ , м <sup>3</sup>
рис.4,а	1	*	29,17	58,33	*	3780	*
„	2	*	29,17	58,33	*	3780	*
рис.4,б	1	21,6	30,74	76,86	45,82	8940	0,062
„	2	43,2	15,38	61,5	20,63	7245	0,05

\*Площадь сечения назначается из конструктивных соображений.

Самым привлекательным вариантом оказалась схема, показанная на рис. 4, а. Ввиду идентичности противостоящих внешних и внутренних сил, усилия в горизонтальном и наклонном стержнях оказались нулевыми. С учетом использования для них швеллера № 5 объем материала составил 0,032 м<sup>3</sup>, что меньше, чем в варианте, показанном на рис. 3, на 15,6 %.

Дальнейшее сближение опор (на 2 м, рис. 4, б) привело к ухудшению деформационных ( $U$ ) и экономических ( $V$ ) показателей по сравнению со схемой на рис. 3 соответственно на 36 % и 35 %.

**Выводы.** Предложенная методика определения оптимальной несущей конструкции в отношении ее топологии и геометрии основывается

на энергетическом критерии, приводящем к минимуму расхода материала. При этом назначение площади и конфигурации поперечных сечений производится с учетом обеспечения прочности и устойчивости равновесия стержней.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Том 15. Вып.1. С. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
2. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической оптимизации судовых конструкций // Труды Крыловского гос.

науч. центра. 2020. №1. С. 95–108. doi: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108.

3. Мищенко А.В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия вузов. Строительство. 2021. №6. С. 20–32. doi:10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32.

4. Юрьев А.Г. Естественный фактор оптимизации топологии конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №2. С. 46–48.

5. Roux W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen. Bd 1-2. Leipzig, 1995. 1112 p.

6. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths, 1979. 238 p.

7. Ширалиев С.Д., Боинская А.А., Мищенко А.В. Исследование критериев рациональности многопролетных балок // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2020. №1. С. 9–14.

8. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Ученые записки ЦАГИ, 2011. Т.42. Вып.2. С. 1–12.

9. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1988. No 71 (2). Pp. 197–224.

10. Diaz A.R., Kikuchi N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method // Int. J. Numer. Methods Eng. 1992. No. 35. Pp. 1487–1502.

11. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin: Springer, 2003. 376 p.

12. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem // Structural Optimization. 1989. No. 1. Pp. 193–202.

13. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria. Dordrecht: Kluwer, 1989. 463 p.

14. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design // Advances

in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.

15. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topologie optimization // Structural Optimization. 1995. No. 9. Pp. 245–249.

16. Панченко Л.А. Строительные конструкции с волокнистыми композитами. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 184 с.

17. Панченко Л.А. Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №1. С. 44–50. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50.

18. Юрьев А.Г., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Перемещения в стержневых системах за пределом упругости // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №3. С. 25-31. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31.

19. Мищенко А.В. Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней // Вестник МГСУ. 2014. №5. С. 35–43.

20. Мищенко А.В. Нелинейное термоупругое деформирование многофазных стержней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. №4. С. 42–51.

21. Cardoso E.L., Fonseca J.S.O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures // J. of the Bras. Soc. of Mech. Sci & Eng. 2003. Vol. 25. №3. Pp. 293–301.

22. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements // Engineering Structures. 2012. No. 37. Pp. 106–124.

23. Зинькова В.А. Оптимизация топологии металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С. 37–40.

24. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections // Int. J. of Appl. Eng. Res. 2015. Vol.10. No. 5. Pp. 12391–12398.

#### Информация об авторах

**Юрьев Александр Гаврилович**, доктор технических наук, профессор. E-mail: yuriev\_ag@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Панченко Лариса Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Зинькова Виктория Анатольевна**, начальник отдела создания и оценки объектов интеллектуальной собственности, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 01.07.2022 г.

© Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Зинькова В.А., 2022

**Yuriev A.G., \*Panchenko L.A., Zinkova V.A.**

*Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov*

*\*E-mail: panchenko.bstu@mail.ru*

## CONSTRUCTIONS SYNTHESIS OF PIVOTAL SYSTEMS

**Abstract.** *The characteristic features of the supporting structure are its topology, geometry and parameters of the elements. The process of creating a structure goes from the project to its material embodiment. The topology defines the contour of the load resistance, which finally manifests itself in the configuration and material. The fundamental beginning of the design project is the variational principle of structural synthesis with energy content. It provides a minimum consumption of material. Its fundamental distribution is made at the stage of topology design as a confrontation with an external force field. Geometry is more subordinated to directive settings related to the nature of the load and the functional purposes of the structure. The parameters of the elements complete the definition of the configuration, ensuring satisfaction of the conditions of strength, rigidity and stability of equilibrium. The scientific results concerning the consideration of the influence of configuration on the operational qualities of the structure and the approach to the practical theory of structural synthesis are used. A four-rod system is chosen to illustrate the design methodology. The regulation of strength and stiffness parameters can be effectively carried out when using composite materials, in particular, fiber-reinforced concrete, since the change in strength is correlated with the parameters of the fibers and their percentage with a slight change in the modules of the material.*

**Keywords:** *rod systems, synthesis, topology, geometry and configuration of the structure, optimization, energy criterion, minimum consumption of materials.*

### REFERENCES

1. Tamrazjan A.G., Alexejtsev A.V. Modern methods of constructive decisions optimization for supporting systems of buildings and structures [Sovremennye metody optimizacii konstruktivnyh reshenij dlya nesushchih sistem zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of MGSU. 2020. Vol. 15. No 1. Pp. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30. (rus)
2. Kryzhevich G.B., Filatov A.P. Complex approach to topology optimization of vessel constructions [Kompleksnyj podhod k topologicheskoy optimizacii sudovyh konstrukcij]. Proceedings of the Krylov's State Scientific Center. 2020. No. 1. Pp. 95–108. doi: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-95-108. (rus)
3. Mishchenko A.V. Optimization of structural inhomogeneous pivotal systems on the basis of energetic criterion [Optimizaciya strukturno-neodnorodnyh sterzhnevnyh konstrukcij na osnove energeticheskogo kriteriya]. News of institutions of higher education. Building. 2021. No. 6. Pp. 20–32. doi: 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32. (rus)
4. Yuriev A.G. Natural factor of constructions topology optimization [Estestvennyj faktor optimizacii topologii konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No.2. Pp. 46–48. (rus)
5. Roux W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen. Bd 1-2. Leipzig, 1995. 1112 p.
6. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes-Butterworths, 1979. 238 p.
7. Shiraliev S.D., Boinskaya A.A., Mishchenko A.V. Research of rationality criterions of multi-span beams [Issledovanie kriteriev racional'nosti mnogoproletnyh balok]. Housing Economy and Municipal Infrastructure. 2020. No. 1. Pp. 9–14. (rus)
8. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. Algorithms for optimizing the topology of power structures [Algoritmy optimizacii topologii silovyh konstrukcij]. Scientific Notes of CAGI, 2011. Vol. 42. No. 2. Pp. 1–12. (rus)
9. Bendsøe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1988. No. 71 (2). Pp. 197–224.
10. Diaz A.R., Kikuchi N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization using a homogenization method. Int. J. Numer. Methods Eng. 1992. No. 35. Pp. 1487–1502.
11. Bendsøe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. Berlin: Springer, 2003. 376 p.
12. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. Structural Optimization. 1989. No. 1. Pp. 193–202.
13. Rozvany G.I.N. Structural design via optimality criteria. Dordrecht: Kluwer, 1989. 463 p.
14. Rozvany G.I.N., Zhou N., Sigmund O. Topology optimization in structural design. Advances in design optimization. London: Adeli, 1994. Pp. 240–299.
15. Yang R.J., Chahande A.I. Automotive applications of topologie optimization. Structural Optimization. 1995. No. 9. Pp. 245–249.
16. Panchenko L.A. Building structures with fiber composites. [Stroitel'nye konstrukcii s voloknistymi kompozitami]. Belgorod: Publishing

House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2013. 184 p. (rus)

17. Panchenko L.A. Calculation of fiber-concrete constructions with regard to physical nonlinearity [Расчет фибробетонных конструкций с учетом физической нелинейности]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 44–50. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-44-50. (rus)

18. Yuriev A.G., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. Displacements in pivotal systems over elasticity limit [Перемещения в стержневых системах за пределом упругости]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 3. Pp. 25–31. doi: 10.34031/2071-7318-2021-7-3-25-31. (rus)

19. Mishchenko A.V. Designed model nonlinear dynamic deformation of component multiphase pivots [Расчетная модель нелинейного динамического деформирования составных многофазных стержней]. Bulletin of MGSU. 2014. No.5. Pp. 35–43. (rus)

20. Mishchenko A.V. Nonlinear thermoelastic deformation of multiphase pivots [Нелинейное

termouprugoe deformatsionnoe mnogofaznykh stержnej]. Structure Mechanics of engineering constructions. 2014. No.4. Pp. 42–51. (rus)

21. Cardoso E.L., Fonseca J.S.O. Complexity control in the topology optimization of continuum structures. J. of the Bras. Soc. of Mech. Sci & Eng. 2003. Vol. 25. No. 3. Pp. 293–301.

22. Stromberg L.L., Beghini A., Baker W.F., Paulino G.H. Topology optimization for braced frames: Combining continuum and beam/column elements. Engineering Structures. 2012. No 37. Pp. 106–124.

23. Zinkova V.A. Optimization of topology of metal trusses [Optimizatsiya topologii metallicheskih ferm]. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No.2. Pp. 37–40. (rus)

24. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections. Int. J. of Appl. Eng. Res. 2015. Vol.10. No. 5. Pp. 12391–12398.

#### *Information about the authors*

**Yuriev, Alexandr G.** DSc, Professor. E-mail: yuriev\_ag@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

**Panchenko, Larisa A.** PhD, Assistant professor. E-mail: panchenko.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

**Zinkova, Viktoriya A.** Senior lecturer. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostykova, 46.

---

*Received 01.07.2022*

#### **Для цитирования:**

Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Зинькова В.А. Структурный синтез стержневых систем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 34–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40

#### **For citation:**

Yuriev A.G., Panchenko L.A., Zinkova V.A. Constructions synthesis of pivotal systems. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 34–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-34-40