

УДК 721.011:624.07

© В. Г. Темнов, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I)
E-mail: vgtemnov@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-106-112

© V. G. Temnov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University)
E-mail: vgtemnov@gmail.com

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ СРЕДСТВАМИ САПР

MORPHOGENESIS AND STRUCTURE FORMATION AT DESIGN OF OPTIMAL STRUCTURAL SYSTEMS OF BUILDING OBJECTS BY CAD TOOLS

Проектирование современных объектов строительства неразрывно связано с синтезом оптимальных по массе вариантов несущих конструктивных систем. Получение эффективных (оптимальных) решений при синтезе конструктивных систем стало возможным и достижимым как по срокам, так и по стоимости при автоматизированном проектировании с использованием средств архитектурно-строительной бионики. Предлагаются алгоритмические модели автоматизированного синтеза конструктивных систем по массе. Представлены решения конструктивных систем, полученные на основе результатов теоретических исследований в процессе проектирования в среде САПР.

Ключевые слова: автоматизированный синтез, алгоритмическая модель задачи, математические методы оптимизации, надежность, напряженно-деформированное состояние, несущая способность конструкции (прочность, жесткость и устойчивость), бионические принципы, система автоматизированного проектирования.

The design of modern construction objects is inseparably associated to the synthesis of mass-optimized variants of load-bearing structural systems. Obtaining efficient (optimal) solutions at the synthesis of structural systems has become possible and achievable both by the timing and the cost due to the computer aided design with the use of architectural bionics means. The article proposes using algorithmic models for automated synthesis of mass-optimized structural systems. The author presents some solutions of structural systems obtained on the basis of the results of theoretical research in the process of designing in the CAD environment.

Keywords: automated synthesis, algorithmic model of the problem, mathematical methods of optimization, reliability, stress-strain state, construction bearing capacity (strength, rigidity and stability), bionic principles, computer-aided design.

Проектирование современных объектов строительства неразрывно связано с синтезом оптимальных по массе, стоимости и энергозатратам несущих конструктивных систем. Получение в процессе синтеза архитектурно-конструктивных решений, эстетически выразительных по форме (рис. 1) и закономерных по структурному (тектоническому) образованию (рис. 2), стало возможным при автоматизированном проектировании с использованием средств архитектурно-строительной бионики [1].

Автоматизированный синтез конструктивных систем близок к проектированию строи-

тельных объектов средствами САПР. Однако его задачей является получение по заданному функциональному назначению строительных объектов эффективных проектных решений конструктивных систем с позиции материальных, технических и энергетических затрат, с обеспечением при этом их несущей способности (прочности, жесткости, устойчивости) в период эксплуатации.

Задача синтеза включает создание структуры проектируемой конструктивной системы объекта строительства и расчет ее параметров. Эти две части автоматизированного синтеза конструк-



Рис. 1. Культурный центр Гейдара Алиева, г. Баку, арх. Заха Хадид

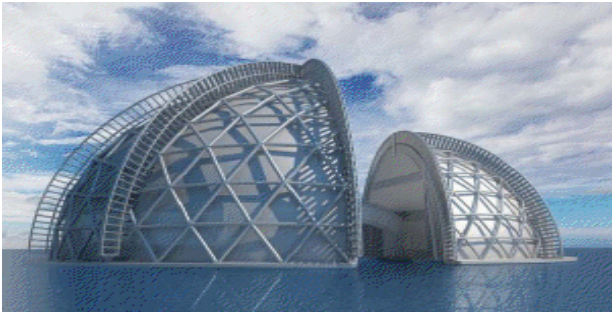


Рис. 2. Конструктивно-дизайнерское решение дайвинг-центра «Сириус» в Дубаи (ОАЭ) (инж. В. Г. Темнов, дизайнер Е. Д. Крадинова)

тивных систем соответственно носят названия задач структурного и параметрического синтеза [2, 3].

1. Параметрический синтез конструктивной системы

Целью параметрического синтеза конструктивной системы является определение оптимальных значений параметров элементов при заданной структуре. Для решения этой задачи предлагается использовать математическую модель, представленную в форме алгоритма.

Алгоритмическая модель задачи параметрического синтеза представляется в виде блок-схемы (рис. 3), включающей компоненты 1, 2, 3.

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивной системы (выполняется 1-я компонента блок-схемы) осуществляется путем решения: системы уравнений равновесия (1.1); физических уравнений (1.2); уравнений совместности деформаций (1.3).

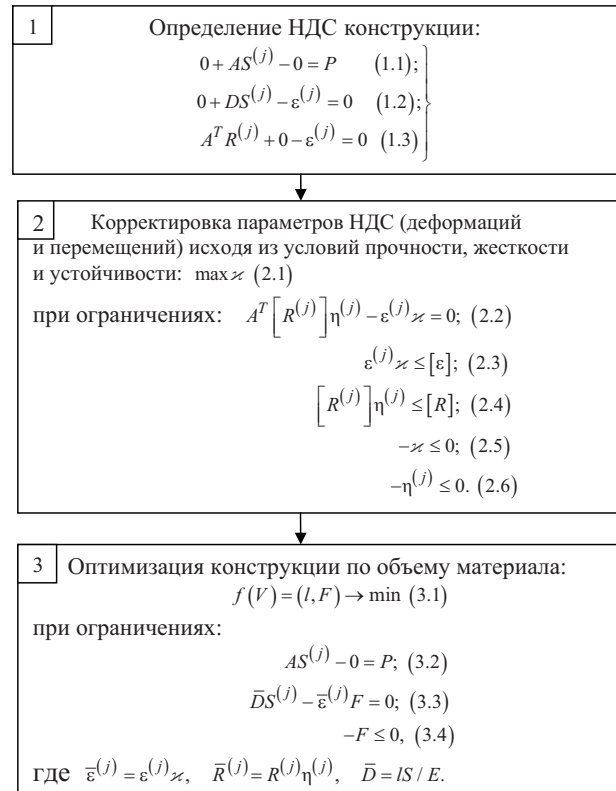


Рис. 3. Блок-схема алгоритмической модели задачи параметрического синтеза

Здесь A — матрица условий статического равновесия; D — диагональная матрица податливости элементов; S — вектор усилий; ε — вектор деформаций; R — вектор узловых перемещений; P — вектор внешних сил; j — количество загрузений.

Далее проводится корректировка параметров (\varkappa, η) конструктивной системы (выполняется 2-я компонента блок-схемы). Для этого предварительно определяются допустимые (критические) значения величин напряжений $[\sigma]$, деформаций элементов $[\varepsilon]$, перемещений узловых сопряжений $[[R]]$, определяющие допустимую область несущей способности стержневых систем по прочности, жесткости и устойчивости:

$$[\sigma^-] = S_{cr}^- / F = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2 F} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2};$$

$$[\sigma^+]; [\varepsilon^-] = \frac{(\mu l) [\sigma^-]}{E} = \frac{\pi^2 (\mu l)}{\lambda^2};$$

$$[\varepsilon^+] = \frac{l [\sigma^+]}{E};$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon^+ \\ \varepsilon^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cdot \sigma^+ / E \\ \pi^2 (\mu l) / \lambda^2 \end{bmatrix}; \quad [[R]] = \begin{bmatrix} R^+ \\ R^- \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

и решается задача линейного программирования, включающая условия совместности деформаций (2.2), условия прочности и устойчивости (2.3), условия жесткости (2.4).

В результате решения задач (2.1)–(2.6) получаются те соотношения между предельными значениями деформаций элементов и узловыми перемещениями конструктивной системы, при которых возможно получение минимального объема материала, необходимого для ее создания.

Для этого осуществляется оптимизация конструкции по объему материала (выполняется 3-я компонента блок-схемы) путем решения задачи линейного программирования (3.1)–(3.4).

Оптимизацию конструктивной системы по объему материала можно также осуществлять и без предварительной корректировки параметров, а прямо на основе параметров (усилий $S^{(j)}$, узловых перемещений $R^{(j)}$, деформаций элементов $\varepsilon^{(j)}$, полученных в процессе определения НДС конструктивной системы.

Для этого решается задача линейного программирования вида:

За	Оптимизация конструкции по объему материала: $f(V) = (\rho l, F) \rightarrow \min \quad (3.1a)$ при ограничениях: $AS^{(j)} - 0 = P^{(j)}; \quad (3.2a)$ $\bar{D}S^{(j)} - \varepsilon^{(j)}F = 0; \quad (3.3a)$ $S^{(j)} - [\sigma]F = 0; \quad (3.4a)$ $-F \leq 0. \quad (3.5a)$
----	--

2. Задача параметрического синтеза конструктивной системы

Покажем решение задачи параметрического синтеза на трехстержневой конструкции, исходные данные которой представлены в табл. 1.

Перейдем к применению изложенной методики решения задачи параметрического синтеза. Для этого воспользуемся алгоритмической моделью задачи параметрического синтеза, включающей компоненты 1, 2, 3.

Начнем с определения НДС конструктивной системы путем решения системы уравнений равновесия (1.1), физических уравнений (1.2), уравнений совместности деформаций (1.3).

Итак, составим уравнения равновесия для заданной конструкции:

$$-S_1 \cos 30^\circ + S_2 \cos 90^\circ + S_3 \cos 30^\circ = 0;$$

$$S_1 \cos 60^\circ + S_2 \cos 0^\circ + S_3 \cos 60^\circ = P,$$

которые после подстановки числовых значений принимают вид:

$$-0,866S_1 + 0 \cdot S_2 + 0,866S_3 = 0;$$

$$0,5S_1 + 1 \cdot S_2 + 0,5S_3 = 90.$$

Составим физические уравнения

$$(l_1 S_1 / EF) - 0 - 0 - \varepsilon_1 - 0 - 0 = 0;$$

$$0 + (l_2 S_2 / EF) - 0 - 0 - \varepsilon_2 - 0 = 0;$$

$$0 + 0 + (l_3 S_3 / EF) - 0 - 0 - \varepsilon_3 = 0,$$

уравнения совместности деформаций

$$-0,866R_x + 0,5R_y - \varepsilon_1 - 0 - 0 = 0;$$

$$0R_x + 1,0R_y - 0 - \varepsilon_2 - 0 = 0;$$

$$0,866R_x + 0,5R_y - 0 - 0 - \varepsilon_3 = 0$$

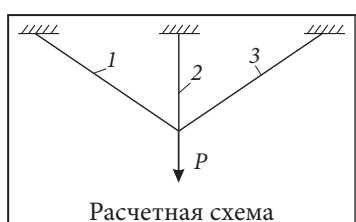
и запишем суммарную систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -0,866 & 0 & 0,866 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,976 \cdot 10^{-8} & 0 & 0 & -1,0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5,952 \cdot 10^{-8} & 0 & 0 & -1,0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,976 \cdot 10^{-8} & 0 & 0 & -1,0 \\ -0,866 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & -1,0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1,0 & 0 \\ 0,866 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1,0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В результате решения суммарной системы уравнений одним из математических методов (метод Гаусса, метод Крамера, метод обращения матрицы и т. д.) получим величины параметров НДС трехстержневой конструкции:

Таблица 1

Исходные данные

 <p>Расчетная схема</p>	<p>Геометрические параметры: длины стержней $l_1 = l_3 = 5,0$ м, $l_2 = 2,5$ м; площади поперечных сечений стержней $F_1 = F_3 = 8 \cdot 10^{-4}$ м²; $F_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ м²; угол пересечения стержня 2 стержнями 1, 3 $\beta = 60^\circ$. Физико-механические параметры: $[\sigma^+] = 180$ МН/м²; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МН/м²; $\rho = 7850$ кг/м³. Внешняя нагрузка: $P = 45$ кН.</p>
--	--

усилия в стержнях — $S_1 = 22,5$ кН, $S_2 = 22,5$ кН, $S_3 = 22,5$ кН; величины перемещений узла — $R_x = 0$; $R_y = 1,34$ мм = 0,134 см; величины продольных деформаций стержней — $\varepsilon_1 = 0,06696$ см, $\varepsilon_2 = 0,134$ см, $\varepsilon_3 = 0,06696$ см.

Теперь осуществим корректировку полученных параметров НДС.

Для этого сначала, воспользовавшись формулами (3.5), определим критические значения (величины) напряжений, деформаций и перемещений, определяющие допустимую область несущей способности трех стержневой конструкции:

$$\begin{aligned} [\sigma^-] &= \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^7}{117,5^2} = 15\,000 \text{ Н/см}^2, \\ [\sigma^+] &= 18\,000 \text{ Н/см}^2; \\ [\varepsilon_1^-] = [\varepsilon_3^-] &= \frac{(\mu l) [\sigma^-]}{E} = \frac{500 \cdot 15\,000}{2,1 \cdot 10^7} = 0,357 \text{ см}; \\ [\varepsilon_1^+] = [\varepsilon_3^+] &= \frac{l [\sigma^+]}{E} = \frac{500 \cdot 18\,000}{2,0 \cdot 10^7} = 0,428 \text{ см}; \\ [\varepsilon_2^-] &= \frac{(\mu l) [\sigma^-]}{E} = \frac{250 \cdot 15\,000}{2,0 \cdot 10^7} = 0,178 \text{ см}; \\ [\varepsilon_2^+] &= \frac{l [\sigma^+]}{E} = \frac{250 \cdot 18\,000}{2,1 \cdot 10^7} = 0,214 \text{ см}; \\ [R] &= 0,214 \text{ см}. \end{aligned}$$

Далее полученные численные значения критических величин деформаций, перемещений подставляются в систему уравнений (2.2)–(2.4) и решается задача линейного программирования.

В результате решения задачи линейного программирования (2.1)–(2.6) получаем предельные значения деформаций и узловых перемещений (табл. 2), при которых выполняются условия жесткости и прочности трехстержневой конструкции: $R_x = 0$, $R_y = 0,214$ см; $\varepsilon_1^+ = 0,107$ см; $\varepsilon_2^+ = 0,214$ см; $\varepsilon_3^+ = 0,107$ см.

При полученных значениях предельных деформаций и перемещений устанавливались те величины поперечных сечений элементов, при которых объем материалов трехстержневой конструкции принимает минимальное значение. Для этого осуществлялось решение задачи оптимизации (3.1)–(3.4), в результате которого была получена трехстержневая конструкция минимальной массы. В табл. 2 показан графоаналитический процесс параметрического синтеза

архитектурной формы конструктивной системы бионического типа [4].

3. Структурный синтез конструктивной системы

Для решения задачи поиска оптимальной структуры (геометрической схемы) конструктивной системы предлагается использовать математическую модель, представленную в алгоритмической форме.

Алгоритмическая модель задачи структурного синтеза представляется в виде блок-схемы (рис. 4), включающей компоненты 4, 5.

Представленная в матрично-векторной форме система уравнений (4.1) получается из уравнений равновесия, выраженных через узловые перемещения конструкции:

$$(ACA^T)R = P, \text{ или } \left(A \frac{EF}{l} A^T \right) R = P.$$

Выразив площади поперечных сечений элементов через их массы, получим следующие выражения:

$$A \left(\frac{Em}{l^2 \rho} \right) A^T R = P, \text{ или } A \left(\frac{E\varepsilon}{l^2 \rho} \right) m = P, \\ \text{или } A[W]m = P,$$

где $W = \frac{E\varepsilon}{l^2 \rho}$ — вектор ускорений в процессе деформаций элементов конструктивной системы.

Математическая модель оптимизации включает целевую функцию, выражающую энергозатраты (5.1); систему уравнений равновесия (5.2); систему неравенств, представляющих ограничения на величину искомой массы (5.3) и на неотрицательность этой массы (5.4). Здесь θ — заданный вектор энергозатрат на единицу массы кон-

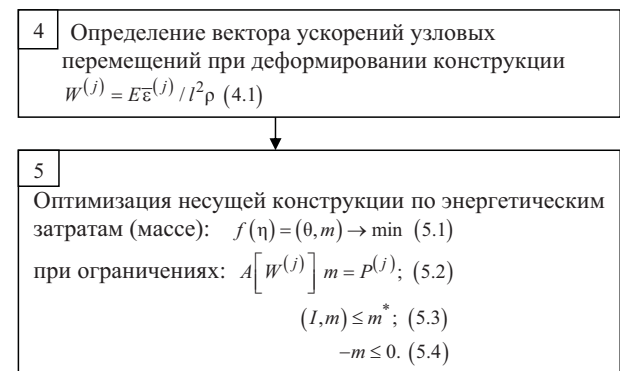




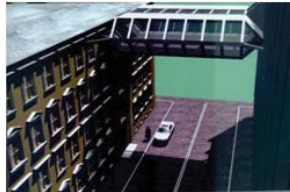



Рис. 4. Блок-схема алгоритмической модели задачи структурного синтеза

Таблица 2

Варианты параметрического синтеза конструктивных систем

а) Параметрический синтез трехстержневой конструктивной системы (фермы) по массе		
$m_1 = 66,725 \text{ кг}$  $P = 45 \text{ кН}$	$m_2 = 35,325 \text{ кг}$  $P = 45 \text{ кН}$	$m_3 = 19,625 \text{ кг}$  $P = 45 \text{ кН}$
$F_1 = F_3 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}; F_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа};$ $S_1 = S_2 = S_3 = 22,5 \text{ кН};$ $\varepsilon_1^+ = \varepsilon_3^+ = 0,6696 \text{ мм};$ $\varepsilon_2^+ = 1,339 \text{ мм}; R_x = 0; R_y = -1,339 \text{ мм}$	$F_1 = F_3 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}; F_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа};$ $S_1 = S_3 = 15,0 \text{ кН}; S_2 = 30,0 \text{ кН};$ $\varepsilon_1^+ = \varepsilon_3^+ = 0,8929 \text{ мм};$ $\varepsilon_2^+ = 1,786 \text{ мм}; R_x = 0; R_y = -1,786 \text{ мм}$	$F_1 = F_2 = F_3 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ МПа};$ $S_1 = S_3 = 9,0 \text{ кН}; S_2 = 36,0 \text{ кН};$ $\varepsilon_1^+ = \varepsilon_3^+ = 1,07 \text{ мм};$ $\varepsilon_2^+ = 2,14 \text{ мм}; R_x = 0; R_y = -2,14 \text{ мм}$
б) Параметрический синтез архитектурной формы конструктивной системы бионического типа		
		
Пешеходный переход через ул. Егорова (Санкт-Петербург) (инж. В. Г. Темнов, инж.-арх. А. С. Рыбкин, А. С. Трапезников)		

структивного элемента длиной l с плотностью материала ρ ; W — вектор ускорений деформирования конструктивных элементов; m^* — предельная величина искомой массы конструктивной системы.

Система уравнений (5.2), записанная в матрично-векторной форме, как суммарное произведение ускорений деформирования конструктивных элементов на их массы отражает физический смысл второго закона Ньютона.

4. Задача структурного синтеза конструктивной системы

Перейдем к применению изложенной методики решения задачи структурного синтеза. Покажем решение задачи параметрического синтеза на той же трехстержневой конструкции, исходные данные которой представлены в табл. 1.

Для этого воспользуемся алгоритмической моделью задачи структурного синтеза, включающей компоненты 4, 5.

Начнем с определения величин ускорений деформирования стержневых элементов конструктивной системы, подверженной внешнему силовому воздействию путем решения системы уравнений (4.1):

$$W_1 = W_3 = W = \frac{E\varepsilon}{l_{1,3}^2 \cdot \rho} = \frac{2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2 \cdot 0,216 \text{ см}}{500^2 \text{ см}^2 \cdot 0,00785 \text{ кг/см}^3} = 2311,3376 \text{ м/с}^2 = 2311,3376 \text{ Н/кг}.$$

$$W_2 = \frac{E\varepsilon}{l_2^2 \cdot \rho} = \frac{2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2 \cdot 0,216 \text{ см}}{250^2 \text{ см}^2 \cdot 0,00785 \text{ кг/см}^3} = 9245,3503 \text{ м/с}^2 = 9245,3503 \text{ Н/кг}.$$

Определим скорости деформационных волн в элементах:

$$v_{1,2,3} = v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2}{0,00785 \text{ кг/см}^3}} = \sqrt{26751592,356687 \text{ м}^2/\text{с}^2} = 5172,19415 \text{ м/с}.$$

Определяем время деформирования элементов:


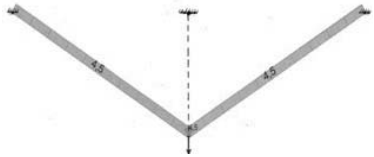

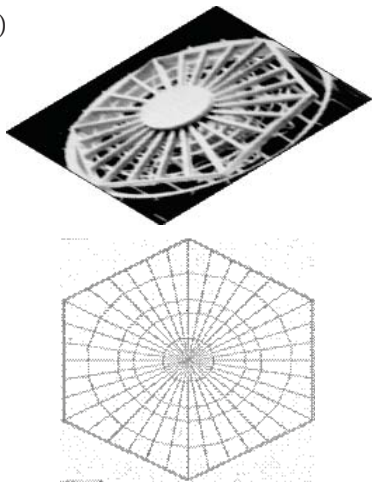
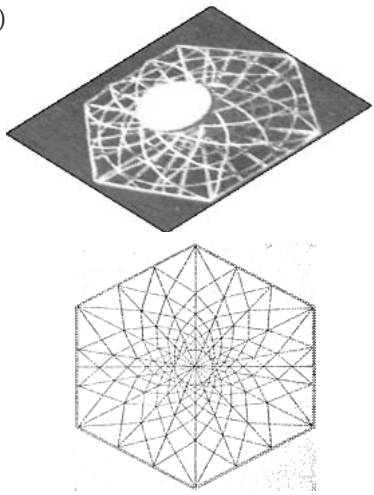

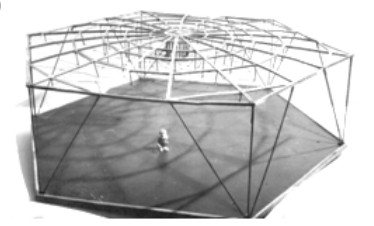
$$t_{1,3} = t = l_{1,3} / v = 5 / 5172,19415 = 9,66708 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

$$t_2 = l_2 / v = 2,5 / 5172,19415 = 4,83354 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Определяем скорости деформации элементов:

$$\begin{aligned} V_1 = V_3 = V &= W \cdot t = \\ &= 2311,3376 \text{ м/с}^2 \cdot 9,66708 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 2,2344 \text{ м/с}; \\ V_2 &= W_2 \cdot t_2 = 9245,3503 \text{ м/с}^2 \cdot 4,83354 \cdot 10^{-4} \text{ с} = \\ &= 4,4688 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Технология структурного синтеза конструктивных систем

Структурный синтез трехстержневой конструктивной системы по массе		
$m_1 = 66,725 \text{ кг}$  $P = 45 \text{ кН}$	$m_2 = 19,625 \text{ кг}$  $P = 45 \text{ кН}$	$m_3 = 4,906 \text{ кг}$  $P = 45 \text{ кН}$
$F_1 = F_3 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ М}^2; F_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ М}^2;$ $S_1 = S_2 = S_3 = 22,5 \text{ кН};$ $\varepsilon_1^+ = \varepsilon_3^+ = 0,6696 \text{ мм};$ $\varepsilon_2^+ = 1,339 \text{ мм}; R_x = 0; R_y = -1,339 \text{ мм}$	$F_1 = F_3 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ М}^2; F_2 = 0;$ $S_1 = S_3 = 45,0 \text{ кН}; S_2 = 0;$ $\varepsilon_1^+ = \varepsilon_3^+ = 4,285 \text{ мм};$ $\varepsilon_2^+ = 0; R_x = 0; R_y = -8,57 \text{ мм}$	$F_1 = F_3 = 0; F_2 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ М}^2;$ $S_1 = S_3 = 0; S_2 = 45,0 \text{ кН};$ $\varepsilon_1^+ = \varepsilon_3^+ = 0;$ $\varepsilon_2^+ = 2,14 \text{ мм}; R_x = 0; R_y = -2,14 \text{ мм}$
Графоаналитический процесс структурного синтеза конструктивной системы бионического типа: двухслойной сетчатой оболочки «Турнесоль»		
а) 	б) 	в)  г) 
а — радиально-кольцевая структура верхнего слоя оболочки; б — спиралеобразная структура нижнего слоя оболочки; в — моделирование двухслойной оболочки; г — конструктивное решение сетчатой оболочки с траекториальной структурой (инж. В. Г. Темнов, технолог Ю. Е. Жучков).		

Запишем уравнения равновесия, выраженные через массы элементов трехстержневой конструктивной системы, воспользовавшись системой уравнений (5.2):

$$\begin{bmatrix} -\cos \alpha_1 W_1 & \cos \alpha_2 W_2 & \cos \alpha_3 W_3 \\ \sin \alpha_1 W_1 & \sin \alpha_2 W_2 & \sin \alpha_3 W_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P \end{bmatrix}.$$

Полученные выше величины ускорений деформирования стержневых элементов конструктивной системы (W_1, W_2, W_3) подставляем в систему уравнений равновесия математической модели (5.1)–(5.4) и решаем задачу линейного программирования вида:

$$f(\eta) = 1 \cdot m_1 + 1 \cdot m_2 + 1 \cdot m_3 \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$-\cos \alpha_1 W_1 m_1 + \cos \alpha_2 W_2 m_2 + \cos \alpha_3 W_3 m_3 = 0,$$

$$\sin \alpha_1 W_1 m_1 + \sin \alpha_2 W_2 m_2 + \sin \alpha_3 W_3 m_3 = P,$$

$$1 \cdot m_1 + 1 \cdot m_2 + 1 \cdot m_3 \leq m^* ;$$

$$-m_1 \quad 0 \quad 0 \leq 0;$$

$$0 \quad -m_2 \quad 0 \leq 0;$$

$$0 \quad 0 \quad -m_3 \leq 0.$$

Результаты решения задачи структурного синтеза трехстержневой конструкции, а также графоаналитический процесс структурного синтеза конструктивной системы бионического типа (двухслойной сетчатой оболочки «Турнесоль» [5]) представлены в табл. 3.

Выводы

При проектировании в среде САПР появилась возможность не только синтезировать и прорабатывать множество архитектурно-конструктивных вариантов, но и оценивать с позиции эффективности (по расходу материалов, энергозатратам, стоимости изготовления и монтажа и т. д.) принятые конструктивные решения несущих систем ранее созданных объектов строительства.

Для достижения этой цели эффективно использовать предложенные математические модели, формально описывающие технологию синтеза несущих конструктивных систем проектируемых объектов строительства на принятом уровне детализации САПР.

Библиографический список

1. Темнов В. Г. Бионический синтез конструктивных систем по несущей способности в процессе компьютерного проектирования // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 64–71.
2. Schmit L. A. Structural Synthesis – Its Genesis and Development // AIAA Journal. 1981. Vol. 19. № 10. Pp. 1249–1263.

3. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.

4. Темнов В. Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике. Л.: Стройиздат, 1987. 256 с.

5. А. с. СССР № 2752005 29–33, 07.05.1981. Темнов В. Г. Пространственное покрытие // А. с. СССР № 2122745. 1979. Бюл. № 17.

References

1. Temnov V. G. *Bionicheskiy sintez konstruktivnykh sistem po nesushchey sposobnosti v protsesse komp'yuternogo proektirovaniya* [Bionic synthesis of structural systems on the load capacity in the process of computer design]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 64–71.
2. Schmit L. A. Structural Synthesis – Its Genesis and Development. *AIAA Journal*, 1981, vol. 19, no. 10, pp. 1249–1263.
3. Koryachko V. P., Kureychik V. M., Norenkov I. P. *Teoreticheskie osnovy SAPR* [Theoretical basics of the CAD tools usage in design]. Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 1987, 400 p.
4. Temnov V. G. *Konstruktivnye sistemy v prirode i stroitel'noy tekhnike* [Construction systems in the nature and in construction engineering]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1987, 256 p.
5. Temnov V. G. *Prostranstvennoe pokrytie* [Volumetric covering]. A. S. SSSR no. 2122745 [Academy of Sciences of the USSR, no. 2122745], 1979, Bulletin no. 17.