

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬСТВО

Научно-теоретический журнал
Издается с марта 1958 г.
Выходит один раз в месяц

№ 11–12 (659–660)

Ноябрь–декабрь 2013 г.

Главный редактор В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.Л. Баладинский, д-р техн. наук, проф.
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
П.А. Дмитриев, д-р техн. наук, проф.
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)
Е.М. Лобанов, д-р техн. наук, проф.
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Тел./факс +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 23.12.13. Формат 70×108¹/16
Усл. печ. л. 10,5+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 4335

ООО «Партнеры Сибири»,
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2013

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Лабудин Б.В. Расчет пространственных конструкций с учетом деформативности податливых связей (развитие идей П.А. Дмитриева, В.М. Коченова, В.А. Лебедева, Г.В. Никитина и др.)	5
Деордиев С.В., Абовский Н.П., Енджиевский Л.В., Инжутов И.С., Палагушкин В.И. Формообразование строительных конструкций. Общие и частные принципы	13
Пятикрестовский К.П., Хунагов Х.С. Нелинейные деформации статически неопределеных деревянных конструкций	21
Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Лоскутова Д.В. Оценка деформированного состояния деревянных конструкций по результатам измерений динамических параметров	31
Федосов С.В., Котлов В.Г., Актуганов А.А. Индустримальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах	39
Стоянов В.В., Окунь И.В. Усиление балочных конструкций методом послойного армирования	44
Гребенюк Г.И., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Асташенков Г.Г. Конструирование, расчет и опти-	

мизация совмещенных ребристых конструкций на основе древесины	48
Михайленко О.А., Дмитриев П.А. Напряженно-деформированное состояние древесины под шайбой, установленной на торце стержня прямоугольного сечения, при ударе вдоль волокон	58
Актуганов А.Н., Актуганов А.А., Актуганов О.А., Котлов В.Г., Кузнецov И.Л. Работа тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с ортогональными ребрами жесткости в виде гофр различного сечения	66
Локтев Д.А., Инжутов И.С., Рожков А.Ф. Формообразование и конструирование деревянных сетчатых сводов с ортогональной сеткой для покрытий зданий и сооружений	73
Зиновьев В.Б., Русов Б.П., Шведов В.Н. Опыт применения интерферометрии во встречных пучках при исследовании элементов строительных конструкций из древесины	81
Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Особенности работы фланцевых соединений строительных конструкций. Контактные напряжения и рычажные силы	89
Герасимов С.И., Жилкин В.А., Остроменский П.И. Изучение процесса накопления деформаций при повторном нагружении с использованием накладного голограммического интерферометра	97
Митасов В.М., Логунова М.А., Криворотов А.П. Фундаментные платформы арочного типа	104
НАШИ ЮБИЛЯРЫ	
Крупный ученый и педагог (к 90-летию со дня рождения Петра Андреевича Дмитриева)	110
УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в 2013 г. (с № 1 по № 12)	112

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE

OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION

OF CONSTRUCTION

HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal

Published since March 1958

Monthly

N 11–12 (659–660)

November–December 2013

Editor-in-Chief V.G. Sebeshev, PhD, Prof.,
Honour. Mem. RAACS

Editorial Board:

- A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.L. Baladinsky, DSc (Eng), Prof.
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
P.A. Dmitriev, DSc (Eng), Prof.
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
Ye.M. Lobanov, DSc (Eng), Prof.
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS
Yu.P. Pravdivetz, DSc (Eng), Prof.
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008
 Phone number/fax +7(383)266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS

Labudin B.V. Calculation of spatial designs taking into account deformativnosti of pliable communications (development of ideas of P.A. Dmitriev, V.M. Kochenov, V.A. Lebedev, G.V. Nikitin and etc.)	5
Deordiev S.V., Abovsky N.P., Endzhievsky L.V., Inzhutov I.S., Palagushkin V.I. Form shaping of building structures. General and specific principles	13
Pyatikrestovsky K.P., Khunagov Kh.S. Nonlinear deformations of statically indefinable wooden structures	21
Kopanitsa D.G., Kaparulin S.L., Loskutova D.V. Investigation of the deformed state of wooden constructions based on the dynamic parameter measurements	31
Fedosov S.V., Kotlov V.G., Aktuganov A.A. Industrial wood constructions on metal gear plate	39
Stoyanov V.V., Okun I.V. Strengthening of frame designs by the method of layer-by-layer reinforcing	44
Grebennyuk G.I., Dmitriev P.A., Zhadanov V.I., Astashenkov G.G. Designing, calculation and optimization of the combined ridge designs on the basis of wood	48

Mikhailenko O.A., Dmitriev P.A. Stress-strain state of the wood under a washer installed on the end face of the rod of rectangular section, with the impact of fibres	58
Aktuganov A.N., Aktuganov A.A., Aktuganov O.A., Kotlov V.G., Kuzne-cov I.L. The real work of metallwood thin-walled double-T beam with orthogonal stiffening plates of various sections of the corrugations form	66
Loktev D.A., Inzhutov I.S., Rozhkov A.F. Forming and constructing wooden coving with an orthogonal mesh netting for covering buildings and constructions .	73
Zinovjev V.B., Rusov B.P., Shvedov V.N. Experience of interferometrii in counter beam element of investigation construction of wood	81
Shafray K.A., Shafray S.D. Features the work of flanged connections for building structures. Contact pressure and prying forces	89
Gerasimov S.I., Zhilkin V.A., Ostromenskiy P.I. Study of deformation accumulation reloading problem by a superposed holographic interferometer	97
Mitasov V.M., Logunova M.A., Krivorotov A.P. Arch type foundation platforms ...	104
JUBILEE'S ARTICLES	
The outstanding scientist and the teacher (to the 90th anniversary since the birth of Petr Andreevich Dmitriev)	110
LIST of articles in 2013 (N 1–12)	112

Этот номер журнала составлен из научных статей по материалам докладов на Международном симпозиуме, посвященном 90-летнему юбилею выдающегося ученого в области деревянных конструкций, доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента Международной академии наук высшей школы Петра Андреевича ДМИТРИЕВА

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.074.2.011.1

Б.В. ЛАБУДИН

**РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ПОДАТЛИВЫХ СВЯЗЕЙ**
**(развитие идей П.А. Дмитриева, В.М. Коченова,
В.А. Лебедева, Г.В. Никитина и др.)**

На примере сетчатых и ребристо-кольцевых куполов рассматривается методика расчета пространственных циклически симметричных систем из клееной древесины с учетом упругой податливости узловых соединений.

Ключевые слова: пространственные конструкции, податливость узловых соединений, расчет циклически симметричных систем.

Современные конструкции с их разнообразными инженерными решениями вызывают необходимость применения новых методов расчета, отражающих действительную работу конструкций зданий и сооружений. В соответствии с этим разработка методов статического и динамического расчета этих конструкций имеет большое теоретическое и прикладное значение. При расчете конструкций обычно оперируют идеализированными расчетными схемами, в которых соединения конструктивных элементов принимаются либо абсолютно жесткими, либо шарнирными. В действительности, соединения в конструкциях из дерева (кроме клеевых) являются упругоподатливыми и не всегда могут быть аппроксимированы идеальными.

Вопросам учета реальных характеристик деформативности узлов при расчете строительных конструкций посвящены исследования и ра-

боты ряда авторов (А.Ю. Гурьев, Д.С. Заварихин, В.А. Кононов, В.М. Коченов, Н.Б. Краснопольская, В.А. Лебедев, Г.В. Никитин, К.П. Пятикрестовский, А.В. Турков, Л.М. Туровский и др.). Особое внимание заслуживают работы П.А. Дмитриева, посвященные вопросам совершенствования клееных деревянных конструкций (КДК) и их соединений [1].

В изгибаемых системах деформативность характеризуется коэффициентом жесткости C и определяется как отношение действующего в узле усилия M к величине угла θ между нормалями концов соединяемых элементов. Податливость узлов является нелинейной функцией нагрузок и описывается, например, для изгибаемых элементов зависимостью

$$M = C\theta \pm C\theta^2 \pm C\theta^3 \pm \dots,$$

коэффициенты которой являются функции конечной деформации θ . Знаки плюс и минус могут чередоваться в зависимости от скорости деформации. При малых изменениях угла между стержнями (θ) достаточно удерживать в этом выражении только первый член, что приводит к линейному условию, характерному для упругой стадии расчета:

$$M = C\theta.$$

Пожалуй, впервые в отечественной литературе встречаются предпосылки учета податливости соединений в статье Г.В. Никитина [2].

Численные значения коэффициентов жесткости в каждом конкретном случае устанавливаются индивидуально и зависят от конструкции узла и вида применяемых связей. В общем случае они будут находиться в пределах от 0 (идеальный шарнир) до ∞ (абсолютно жесткое соединение). Учет их очень важен в первую очередь для статически неопределеных систем, к которым относятся купола (рис. 1).

Для определения жесткости связей следует использовать характеристики деформативности соединений деревянных конструкций, которые могут быть найдены опытным путем или взяты из [3].

Расчетную схему конструкции с упругоподатливыми связями удобно рассматривать как стержневую модель с жесткими узлами, к которым

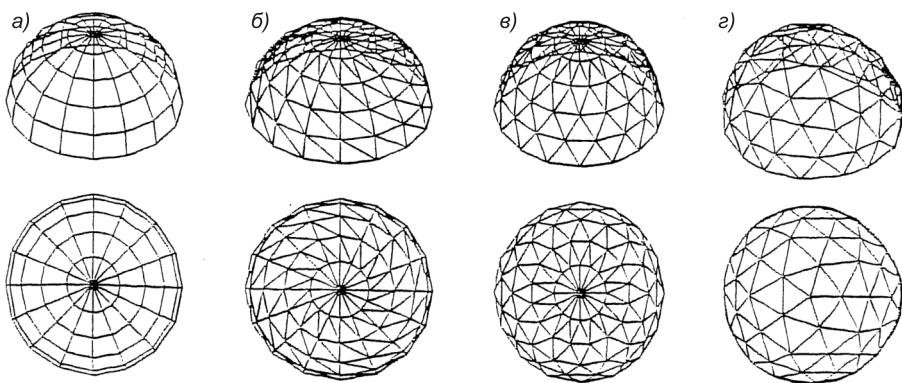


Рис. 1. Основные системы куполов

a — ребристо-кольцевой; *б* — сетчатый системы Шведлера; *в* — сетчатый системы Феппла; *г* — геодезический системы Фуллера

через упругие шарниры примыкают сами стержни. Тогда число неизвестных метода перемещений останется неизменным.

В общем виде при расчете конструкций в матричной форме все исходные данные представляются в виде матриц. Упругие свойства стержней или отдельных элементов, на которые разбивается конструкция, описываются обычно матрицей податливости δ_g или матрицей жесткости r_g . Эти матрицы дают соотношение между усилиями S_g и перемещениями V_g по направлению усилий в рассматриваемой системе.

В работах В.А. Лебедева, Л.Н. Лубо, А.М. Масленникова, В.А. Постнова и других приведена матрица жесткости для стержня с жестким и шарнирным закреплением в узлах. В развитие этих работ нами получены матрицы жесткости для стержневых элементов с упругодеформируемыми узлами [3, 4].

Используя значения реактивных сил, вызванных в узле i единичными перемещениями по направлению главных осей инерции концевого сечения j стержня $S(i, j)$ при упругоподатливом закреплении его на концах, запишем матрицу единичных реакций конечного элемента с упругоподатливыми связями, которая будет иметь вид:

$$r_{ij}^i = \Delta * \begin{vmatrix} \frac{12i_{2s}}{l_s^2}(1+\mu_i^u + \mu_j^u) & 0 & 0 & 0 & \frac{6i_{2s}}{l_s}(1+2\mu_j^u) & 0 \\ 0 & \frac{12i_{1s}}{l_s^2}(1+\mu_i^u + \mu_j^u) & 0 & \frac{6i_{1s}}{l_s}(1+2\mu_j^u) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\dot{l}_s}{(1+\mu_i^c + \mu_j^c)\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6i_{1s}}{l_s}(1+2\mu_j^u) & 0 & 4i_{1s}(1+3\mu_j^u) & 0 & 0 \\ \frac{6i_{2s}}{l_s}(1+2\mu_j^u) & 0 & 0 & 0 & 4i_{2s}(1+3\mu_j^u) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{i_{3s}}{(1+\mu_i^{kp} + \mu_j^{kp})\Delta} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Матрица единичных реакций узла j стержня $S(i, j)$, вызванных единичным перемещением противоположного узла i по направлению главных осей инерции стержня при упругоподатливом закреплении его в узлах i, j , будет

$$r_{ij}^j = \Delta * \begin{vmatrix} \frac{12i_{2s}}{l_s^2}(1+\mu_i^u + \mu_j^u) & 0 & 0 & 0 & \frac{6i_{2s}}{l_s}(1+2\mu_j^u) & 0 \\ 0 & \frac{12i_{1s}}{l_s^2}(1+\mu_i^u + \mu_j^u) & 0 & \frac{6i_{1s}}{l_s}(1+2\mu_j^u) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\dot{l}_s}{(1+\mu_i^c + \mu_j^c)\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6i_{1s}}{l_s}(1+2\mu_i^u) & 0 & 2i_{1s} & 0 & 0 \\ \frac{6i_{2s}}{l_s}(1+2\mu_i^u) & 0 & 0 & 0 & -2i_{2s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{i_{3s}}{(1+\mu_i^{kp} + \mu_j^{kp})\Delta} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $\Delta = \frac{1}{1+4(\mu_i + \mu_j) + 12\mu_i\mu_j}$; i_{ls} , i_{2s} , i_{3s} и f_s — погонные жесткости

стержня $S(i, j)$ при деформациях растяжения (сжатия), смещения и поворота опоры в двух плоскостях, а также кручения:

$$\begin{aligned} i_{ls} &= i_{Is} = \frac{EI_{ls}}{l_s} = \frac{EI_{Is}}{l_s}; \quad i_{2s} = i_{Ils} = \frac{EI_{2s}}{l_s} = \frac{EI_{Ils}}{l_s}; \\ i_{3s} &= i_{IIIls} + \frac{GI_{3s}}{l_s} = \frac{GI_{IIIls}}{l_s}; \quad f_s = \frac{EF_s}{l_s}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для расчета стержневой купольной конструкции применим метод перемещений. Покажем его на примере ребристо-кольцевого купола с треугольно-подкосными связями и геодезической разбивкой. Основная система образуется путем введения в узлы конструкции жестких тел (призм) и раскрепления их упругими связями, устраниющих линейные и угловые перемещения узлов по направлению осей τ , n , b в расчетном элементе (блок-модуле \mathbf{m}_0), представленном на рис. 2.

Тогда канонические уравнения для пространственного циклически симметричного блок-модуля \mathbf{m}_0 с треугольно-подкосными связями:

$$\left. \begin{aligned} r_{i,i}Z_i + r_{i,i+1}Z_{i+1} + r_{i,i-1}Z_{i-1} + r_{i,j}Z_j + r_{i,j+1}Z_{j+1} + r_{i+1,j-1}Z_{j-1} + \\ + r_{i,a}Z_a + r_{i,a-1}Z_{a-1} + R_{i,p} = 0; \\ r_{i+1,i+1}Z_{i+1} + r_{i+1,i}Z_i + r_{i+1,i+2}Z_{i+2} + r_{i+1,j}Z_j + r_{i+1,j+1}Z_{j+1} + \\ + r_{i+1,j+2}Z_{j+2} + r_{i+1,a}Z_a + r_{i+1,a+1}Z_{a+1} + R_{i+1,p} = 0; \\ r_{j,j}Z_j + r_{j,j+1}Z_{j+1} + r_{j,j-1}Z_{j-1} + r_{i,j}Z_i + r_{j,j+1}Z_{j+1} + r_{j,k-1}Z_{k-1} + r_{i,k}Z_k + \\ + r_{j,k+1}Z_{k+1} + r_{j,k-1}Z_{k-1} + r_{j,a}Z_a + r_{j,a-1}Z_{a-1} + r_{j,b}Z_b + r_{j,b-1}Z_{b-1} + R_{j,p} = 0; \\ r_{j+1,j+1}Z_{j+1} + r_{j+1,i+1}Z_{i+1} + r_{j+1,i}Z_i + r_{j+1,j}Z_j + r_{j+1,j+2}Z_{j+2} + r_{j+1,j+2}Z_{i+2} + \\ + r_{j+1,k}Z_k + r_{j+1,k+1}Z_{k+1} + r_{j+1,k+2}Z_{k+2} + r_{j+1,b}Z_b + r_{j+1,b+1}Z_{b-1} + r_{j+1,a}Z_a + \\ + r_{j+1,a+1}Z_{a+1} + R_{j+1,p} = 0; \\ r_{k,k}Z_k + r_{k,k+1}Z_{k+1} + r_{k,k-1}Z_{k-1} + r_{k,j}Z_j + r_{k,j+1}Z_{j+1} + r_{k,j-1}Z_{j-1} + r_{k,l}Z_l + \\ + r_{k,l+1}Z_{l+1} + r_{k,l-1}Z_{l-1} + r_{k,b}Z_b + r_{k,b-1}Z_{b-1} + r_{k,c}Z_c + r_{k,c-1}Z_{c-1} + R_{k,p} = 0; \\ r_{k+1,k+1}Z_{k+1} + r_{k+1,k}Z_k + r_{k+1,k+2}Z_{k+2} + r_{k+1,j}Z_j + r_{k+1,j+1}Z_{j+1} + r_{k+1,j+2}Z_{j+2} + \\ + r_{k+1,l}Z_l + r_{k+1,l+1}Z_{l+1} + r_{k+1,l+2}Z_{l+2} + r_{k+1,b}Z_b + r_{k+1,b+1}Z_{b+1} + r_{k+1,c}Z_c + \\ + r_{k+1,c+1}Z_{c+1} + R_{k+1,p} = 0; \\ r_{l,l}Z_l + r_{l,k}Z_k + r_{l,k+1}Z_{k+1} + r_{l,k-1}Z_{k-1} + r_{l,c}Z_c + r_{l,c-1}Z_{c-1} = 0; \\ r_{l+1,l+1}Z_{l+1} + r_{l+1,k+1}Z_{k+1} + r_{l+1,k}Z_k + r_{l+1,k+2}Z_{k+2} + r_{l+1,c}Z_c + r_{l+1,c+1}Z_{c+1} = 0; \\ r_{a,i}Z_i + r_{a,i+1}Z_{i+1} + r_{a,j}Z_j + r_{a,j+1}Z_{j+1} + R_{a,p} = 0; \\ r_{b,j}Z_j + r_{b,j+1}Z_{j+1} + r_{b,k}Z_k + r_{b,k+1}Z_{k+1} + R_{b,p} = 0; \\ r_{c,k}Z_k + r_{c,k+1}Z_{k+1} + r_{c,l}Z_l + r_{c,l+1}Z_{l+1} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Канонические уравнения для пространственной циклически симметричной системы блок-модуля **m₀** (см. рис. 2) с геодезической разбивкой на поверхности сферы можно представить:

$$\left. \begin{aligned} r_{0,0}z_0 + r_{0,i}z_i + r_{0,i+1}z_{i+1} + r_{0,i+2}z_{i+2} + r_{0,i+3}z_{i+3} + r_{0,i-1}z_{i-1} + R_{0,P} &= 0; \\ r_{i,i}z_i + r_{i,0}z_0 + r_{i,i+1}z_{i+1} + r_{i,i-1}z_{i-1} + r_{i,j}z_j + r_{i,j-1}z_{j-1} + r_{i,k}z_k + R_{i,P} &= 0; \\ r_{i+1,i+1}z_{i+1} + r_{i+1,0}z_0 + r_{i+1,i}z_i + r_{i+1,i+2}z_{i+2} + r_{i+1,j}z_j + r_{i+1,j+1}z_{j+1} + \\ + r_{i+1,k+1}z_{k+1} + R_{i+1,P} &= 0; \\ r_{j,j}z_j + r_{j,i+1}z_{i+1} + r_{j,i+1}z_{i+1} + r_{j,k}z_k + r_{j,k+1}z_{k+1} + R_{j,P} &= 0; \\ r_{k,k}z_k + r_{k,i}z_i + r_{k,i}z_i + r_{k,i-1}z_{i-1} + R_{k,P} &= 0; \\ r_{k+1,k+1}z_{k+1} + r_{k+1,i+1}z_{i+1} + r_{k+1,j}z_j + r_{k+1,j+1}z_{j+1} + R_{k+1,P} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В системе (5) коэффициенты r представляют 6×6 матрицы компонент бивекторов реактивных сил R в связях узлов, которым соответствует первый индекс, вызванных единичными перемещениями узлов, которым соответствует второй индекс; Z_0, Z_j, \dots, Z_{j-1} — 6×1 матрицы компонент бивекторов перемещений узлов $0, i, \dots, j-1$ по направлению осей τ, n, b , связанных с этими узлами; $R_{OP}, R_{iP}, \dots, R_{iP}$ — 6×1 матрица компонент бивекторов реактивных сил в связях узлов $0, i, \dots, j$ от воздействия внешних нагрузок. Матрицы r определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} r_{0,0} &= \varepsilon_0^{0,i} + \varepsilon_0^{0,i+1} + \varepsilon_0^{0,i+2} + \varepsilon_0^{0,i+3} + \varepsilon_0^{0,i-1}; \\ r_{i,i} &= \varepsilon_i^{0,i} + \varepsilon_i^{i,i+1} + \varepsilon_i^{i,j} + \varepsilon_i^{i,k} + \varepsilon_i^{i,i-1} + \varepsilon_i^{i,j-1}; \\ r_{i+1,i+1} &= \varepsilon_{i+1}^{0,i+1} + \varepsilon_{i+1}^{i,i+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,i+2} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,k+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,j+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,j}; \\ r_{j,j} &= \varepsilon_j^{j,i} + \varepsilon_j^{j,i+1} + \varepsilon_j^{j,k} + \varepsilon_j^{j,k-1} + \varepsilon_j^{j,l} + \varepsilon_j^{j,m}; \\ r_{k,k} &= \varepsilon_k^{k,i} + \varepsilon_k^{k,j} + \varepsilon_k^{k,j+1} + \varepsilon_k^{k,n} + \varepsilon_k^{k,l} + \varepsilon_k^{k,m-1}; \\ r_{k+1,k+1} &= \varepsilon_{k+1}^{k+1,i+1} + \varepsilon_{k+1}^{k+1,m} + \varepsilon_{k+1}^{k+1,j} + \varepsilon_{k+1}^{k+1,n+1} + \varepsilon_{k+1}^{k+1,l+1} + \varepsilon_{k+1}^{k+1,j+1}; \\ r_{0,i} &= \varepsilon_i^{0,i}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\varepsilon_0^{0,i}, \varepsilon_0^{0,i+1}, \dots, \varepsilon_k^{k,m}$ — 6×6 матрицы жесткости стержней, примыкающих к узлам, номер которых соответствует цифре нижнего индекса. Верхний индекс определяет стержень. Выражение для остальных матриц получается из последнего выражения системы (6) подстановкой соответствующих индексов.

При расчете циклически симметричных систем методом перемещений на воздействие внешних нагрузок, изменяющихся вдоль параллели по гармоническому закону, достаточно составить каноническое уравнение

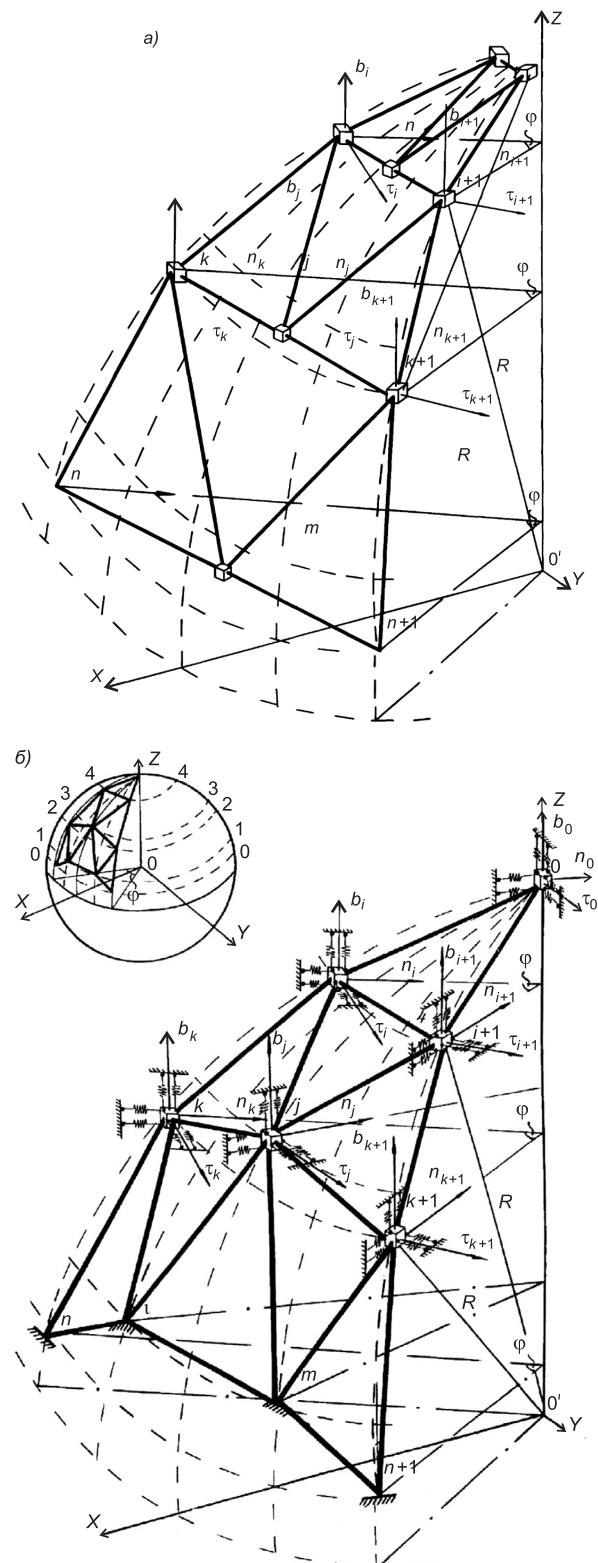


Рис. 2. Основная система расчетного элемента (блок-модуля)
m₀ с треугольно-подкосными связями (а) и с геодезической разбивкой на поверхности сферы (б)

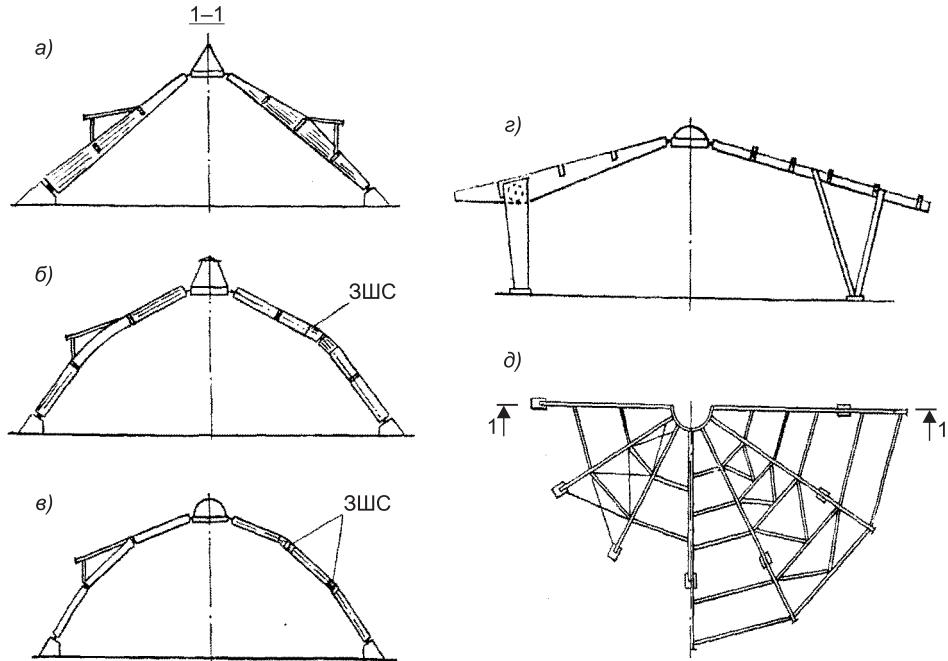


Рис. 3. Примеры формообразования пространственных систем из КДК с использованием прямолинейных и гнутоклееных блоков, а также сопряжения посредством ЗШС
а — шатер; б, в — купола; г — рамно-шатровая система; д — план покрытий а, б, в, г

ние для одного узла каждой параллели узлов. Эти уравнения будут одинаковыми для всех узлов данной параллели.

Примеры формообразования других пространственных конструкций типа шатров и куполов ребристо-кольцевой структуры с использованием гнутоклееных вставок на зубчато-шиповых соединениях (ЗШС) в узлах перелома [5–7] приведены на рис. 3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриев, П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруго-вязких и пластических деформаций : дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / П.А. Дмитриев. — Новосибирск, 1975. — 529 с.
2. Никитин, Г.В. К вопросу о влиянии жесткости узлов в пространственных стержневых системах [Текст] / Г.В. Никитин // Сб. науч. тр. — Вып. 3 / Ленингр. ин-т инженеров коммун. хоз-ва. — Л., 1936. — С. 58–62.
3. Лабудин, Б.В. Совершенствование kleевых деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой : моногр. [Текст] / Б.В. Лабудин. — Архангельск : Изд-во АГТУ, 2007. — 267 с.
4. Лабудин, Б.В. Геодезические купола из kleевых деревянных элементов [Текст] / Б.В. Лабудин, А.Ю. Гурьев. — Архангельск : Изд-во АГТУ, 2007. — 171 с.
5. Серов, Е.Н. Проектирование деревянных конструкций: учеб. пособие [Текст] / Е.Н. Серов, Ю.Д. Санников, А.Е. Серов; под ред. Е.Н. Серова. — М. : Изд-во АСВ, 2011. — 536 с.
6. Пятикрестовский, К.П. Силовое сопротивление пространственных деревянных конструкций при кратковременных и длительных нагрузках: дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / К.П. Пятикрестовский. — М., 2011. — 321 с.

7. Т ур к о в, А.В. Взаимосвязь задач динамики и статики сплошных и составных деревянных конструкций : дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / А.В. Турков. — Орел, 2008. — 386 с.

*ЛАБУДИН Борис Васильевич, д-р техн. наук, проф.
Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск*

Получено 12.10.13

Labudin Boris Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

**CALCULATION OF SPATIAL DESIGNS TAKING INTO ACCOUNT
DEFORMATIVNOSTI OF PLIABLE COMMUNICATIONS
(development of ideas of P.A. Dmitriev, V.M. Kochenov,
V.A. Lebedev, G.V. Nikitin and etc.)**

On the example of mesh and ridge and ring domes the method of calculation of spatial cyclic and symmetric systems from glued wood taking into account an elastic pliability of nodal connections is considered.

Key words: spatial designs, pliability of nodal connections, calculation of cyclic and symmetric systems.

REFERENCES

1. D m i t r i e v, P.A. Experimental studies of connections of elements of wooden designs on metal and plastic the dowels and the theory of their calculation taking into account elastic and viscous and plastic deformations : thesis of the doctor of engineering [Text] / P.A. Dmitriev. — Novosibirsk, 1975. — 529 p.
2. N i k i t i n, G.V. To a question of influence of rigidity of knots in spatial rod systems [Text] / G.V. Nikitin // The Collection of scientific works. — Iss. 3 / Lenigrad Institute of engineers of municipal services. — L., 1936. — P. 58–62.
3. L a b u d i n, B.V. Improvement of glued wooden designs with spatially organized structure: monograph [Text] / B.V. Labudin. — Arkhangelsk: AGTU publishing house, 2007. — 267 p.
4. L a b u d i n, B.V. Geodetic domes from glued wooden elements [Text] / B.V. Labudin, A.Yu. Guryev. — Arkhangelsk: AGTU publishing house, 2007. — 171 c.
5. S e r o v, E.N. Design of wooden designs: manual [Text] / E.N. Serov, Yu.D. Sannikov, A.E. Serov; under the editorship of E.N. Serov; — M. : ASV publishing house, 2011. — 536 p.
6. P y a t i k r e s t o v s k y, K.P. Power resistance of spatial wooden designs at short-term and long loadings : thesis of doctor of engineering [Text] / K.P. Pyatikrestovsky. — M., 2011. — 321 p.
7. T u r k s, A.V. Interconnection of problems of dynamics and statics of continuous and compound wooden designs : thesis of doctor of engineering [Text] / A.V. Turks. — Orel, 2008. — 386 p.

УДК 624.07

С.В. ДЕОРДИЕВ, Н.П. АБОВСКИЙ, Л.В. ЕНДЖИЕВСКИЙ,
И.С. ИНЖУТОВ, В.И. ПАЛАГУШКИН

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ОБЩИЕ И ЧАСТНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Статья посвящена междисциплинарному инновационному подходу к проблеме создания строительных конструкций. Философской основой служит системный подход, позволивший найти общие принципы среди традиционно разобщенных направлений создания строительных конструкций и в итоге сформулировать основы нового научного направления — формообразование строительных конструкций. Представлены общие и частные принципы активного формообразования конструкций, особенности конструктивных решений, обусловленных использованием разных строительных материалов и необходимым учетом многообразия сплошных грунтовых условий и влияния сейсмичности.

Ключевые слова: формообразование, строительные конструкции, системный подход, общие принципы, частные принципы.

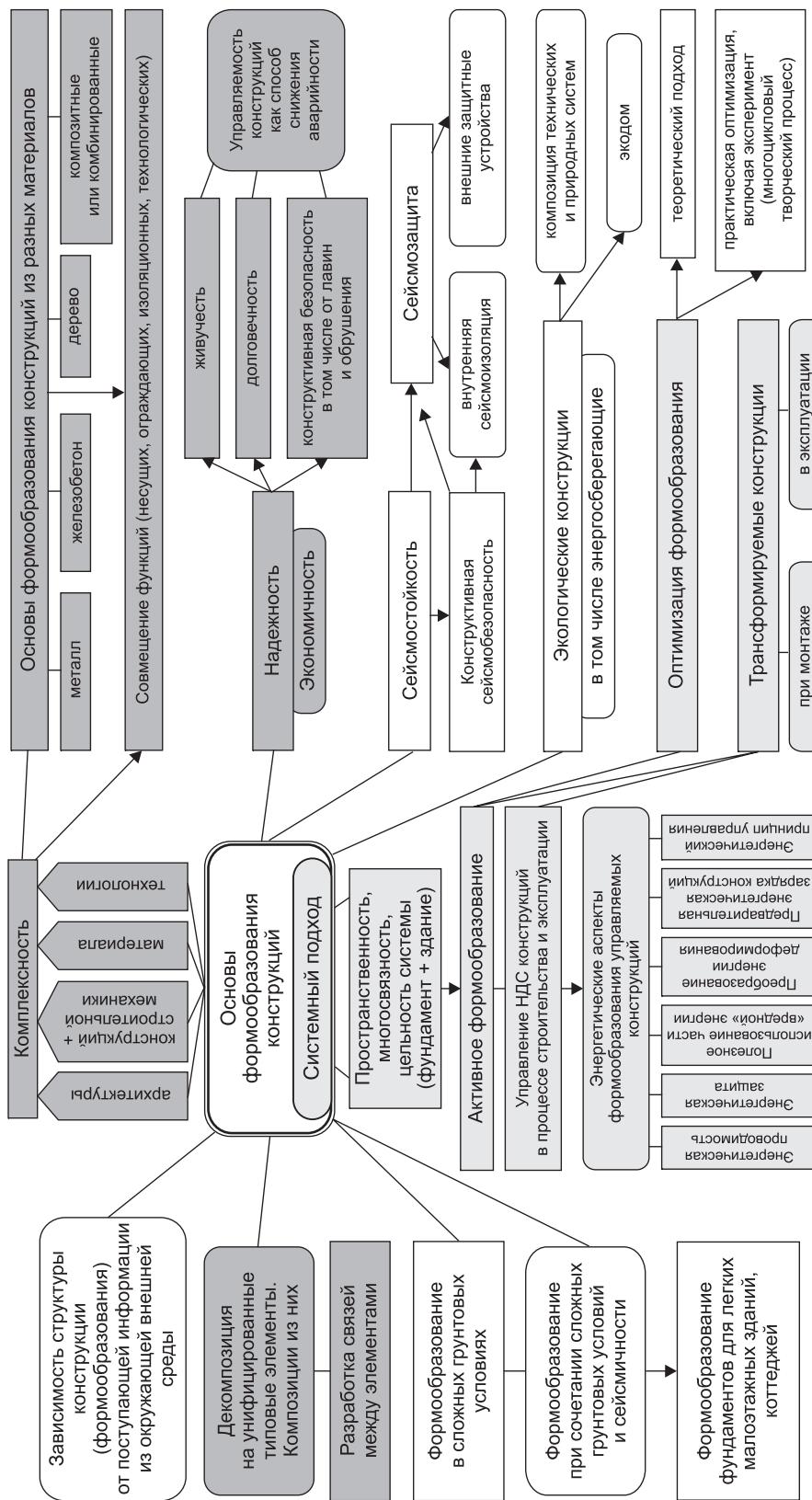
Формообразование представляет собой научное творчество, базирующееся на триаде творческого системного мышления: системный подход — законы развития техники — методы принятия решений. Системный подход к формообразованию позволяет взаимосвязано и целостно охватить многосторонние аспекты формообразования как традиционные, так и нетрадиционные. Становление науки формообразования связано, прежде всего, с принципами осуществления данного творческого процесса и с требованиями к конечному результату, т.е. к набору критериев его оценки. Эти принципы и требования составляют концептуальную основу науки формообразования конструкций.

Рациональное формообразование требует преодоления сложившейся узкой специализации, что нацеливает на творческое системное содружество архитектора, конструктора, технолога и материаловеда, обеспечивающее комплексное решение проблемы. Формообразование имеет целью принятие такого конструктивного решения, которое обеспечивает реализацию творческого архитектурного замысла, соответствует материальным возможностям и технологическому исполнению в конкретных условиях взаимодействия с внешней средой при соблюдении общих и специальных требований надежности и комфортности эксплуатации.

Принципы и критерии можно условно подразделить на общие и частные. Последние связаны с конкретными условиями реализации системы, с особыми условиями воздействия внешней среды. Объединяющей основой всех принципов является системный подход.

Общие принципы и требования к формообразованию конструкций (рисунок) [1–7].

1. *Принцип системности* целостности, взаимосвязанности всех элементов конструктивного решения и их взаимодействия с окружающей



средой, в том числе с основанием, внешними воздействиями. Верхнее и нижнее строение здания (сооружения) рассматривается как единая цельная (замкнутая) система, связанная с внешней средой, в том числе с основанием. Пространственность (плоскостных конструкций в природе нет) создает возможность пространственного распределения напряжений, включая работу всех элементов.

2. Комплексная связь архитектурного и конструкторского замыслов с выбором материалов и технологии изготовления, транспортировки и производства работ, а также эксплуатации, т.е. всего жизненного цикла сооружений. В комплексности подхода реализуется красота, надежность и польза архитектурно-инженерного замысла, а также принцип совмещения функций.

3. Принцип совмещения в конструкции несущих, ограждающих, изолирующих (тепло-, гидроизоляция и т.п.), технологических и других функций. Например, при использовании в покрытиях оболочек, пластины, мембран совмещаются несущие и ограждающие функции. Применение пространственных фундаментных платформ совмещает теплоизоляционные и несущие конструкции покрытия пола, стен и др.

4. Принцип пространственности и многосвязности [1–7]. Закладывает (обеспечивает) возможности повышения живучести, безопасности и надежности конструктивного решения.

5. Принцип зависимости структуры формообразования конструкции от информации, поступающей из внешней окружающей среды.

6. Принцип декомпозиции глобальных конструкций на типовые (повторяемые) элементы [1–7]. Должен удовлетворять требованиям и возможностям современных материалов и технологии производства и позволять создавать структурные композиции разнообразных конструкций. Отметим, что при выборе типовых элементов, особенно композиционного типа, целесообразны такие конструктивные условия, при которых каждый из использованных материалов находился бы в наиболее выгодных условиях работы.

7. Принципы обеспечения надежности, живучести зданий и сооружений [4–7]. Заключаются в способности здания (сооружения) противостоять глобальному разрушению (или глобальному нарушению функционирования) из-за некоторых локальных повреждений, вызванных особыми нагрузками (сейсмическими, взрывными воздействиями), воздействиями, обусловленными деформациями основания, сопровождающимися коренными изменениями структуры грунта при оттаивании вечномерзлых или замачивании просадочных грунтов, а также оседании грунта в районах горных выработок.

Активное формообразование базируется на следующих аспектах.

1. Управление напряженно-деформированным состоянием (НДС) зданий и сооружений (уменьшение веса, повышение прочности, жесткости, устойчивости, живучести, безопасности конструкции). Позволяет перевести их в разряд автоматически управляемых конструкций и охватывает стадии создания, проектирования, эксплуатации, разрушения [2]. Активный подход к проектированию и управлению НДС дает но-

вые результаты, которые невозможно было получить при традиционных архитектурных и инженерных подходах.

2. Энергетические аспекты формообразования конструкций:

— принцип энергетической проводимости конструкции;
— принцип энергетической защиты от вредных внешних воздействий;
— принцип использования части вредной энергии внешнего воздействия для создания большего сопротивления конструкции. На этом перспективном пути запатентованы решения для мачт, мостов, кранов и др. [2];

— принцип перераспределения энергии деформирования конструкции;

— принцип предварительной энергетической зарядки (аккумулирования). Используя приток внешней энергии при производстве конструкции или в момент ее нагружения, формообразование должно предусматривать создание обратного противодействующего эффекта для повышения сопротивляемости конструкции и дополнительные внутренние связи и устройства, обеспечивающие рациональную работу всех элементов системы, их совместность и взаимоподдержку [2];

— энергетический принцип управления конструкциями предусматривает при формообразовании включение постоянного притока внешней энергии, необходимого для управления НДС конструкции, используя для этой цели соответствующие средства наблюдения, модули управления и актуаторы.

3. Разработка трансформируемых зданий и сооружений [4, 6] с подвижными (раздвижными) конструкциями покрытий и стен (их конструкции образуются из унифицированных пространственных элементов). Трансформируемые конструкции — это пример глобального управления конструкциями за счет изменения структуры (например, плоские конструкции при монтаже переходят в пространственные).

4. Инженерные аспекты оптимизации [2]. Наряду с методами математической оптимизации используются другие подходы, среди которых многоцикловая практическая оптимизация, сочетающая теоретические и экспериментальные результаты. Практическая оптимизация отличается тем, что в ней синтезируются теоретический и экспериментальный подходы, причем в многоциклическом процессе.

Частные принципы формообразования конструкций, нацеленные на преодоление конкретных специфических условий внешней среды [1–7].

1. Принцип сохранения внешней среды (в том числе основания) в естественном состоянии, т.е. экологичности конструкции. В первую очередь относится к фундаментостроению, в частности к разработанным пространственным фундаментным платформам (ПФП). ПФП не нарушают сложившиеся геологический и гидродинамический подземные режимы, так как не требуют заглубления при минимуме земляных работ. В случае вечномерзлых грунтов ПФП служит теплозащитным устройством, способствующим сохранению их естественных свойств. ПФП в сочетании с традиционными водозащитными мероприятиями на территории предотвращает попадание поверхностных и техногенных вод под здание, что способствует сохранению естественных свойств грунтов и эффектив-

ности применения ПФП на просадочных, пучинистых и других слабых грунтах.

2. Принцип рационального пространственного формообразования таких конструкций, которые малочувствительны к негативным воздействиям внешней среды (основания) [5–7]. Способствует преодолению фактически имеющейся неопределенности и недостаточности информации по результатам инженерно-геологических изысканий для строительства, вследствие изменчивости расположения неоднородных грунтов и обычно малого числа проб грунтов при изысканиях, а также предотвращению возможных негативных ситуаций при эксплуатации.

3. Принцип сейсмозащиты (сейсмоизоляции) системы фундамента и верхнего строения как цельной системы. Особое значение приобретает для строительства в сейсмических районах на слабых грунтах (в сложных грунтовых условиях) и позволяет найти эффективные конструктивные решения при совмещении негативных условий неравномерных деформаций слабых грунтов и сейсмических воздействий. Например, применение ПФП на скользящем слое снижает большие сейсмические воздействия на здание в десятки раз [2].

4. Принцип совмещения в ПФП конструктивных, функциональных и технологических свойств, включающих, например, ограждение, теплозащиту, несущий пол, размещение оборудования, коммуникаций и т.п., а также удобство устройства скользящего слоя на основании под ПФП [6]. Для его реализации целесообразно использовать возможности конструктивных решений: *пространственность, многосвязность, замкнутость, сплошность* пространственной платформы.

5. Формообразование фундаментов для легких малоэтажных зданий и коттеджей [4, 6].

6. Принципы создания экологически чистых конструкций [1]. Формообразование конструкций, удовлетворяющих экологическим требованиям, — важнейшее звено в решении проблемы, имея в виду не только надземные, но и подземные, в частности гидрологические, природные условия.

Формообразование пространственных конструкций из различных материалов [2–7]. Принцип создания комбинированных пространственных конструкций предполагает обеспечение для каждого материала наиболее выгодных условий работы, что увеличивает эффективность таких конструкций по сравнению с конструкциями, выполненными из мономатериалов. В конструкциях с четко выраженным законами сжатия и растяжения существенный экономический эффект может быть достигнут, если взамен мономатериала использовать, например, в сжатой зоне железобетон, дерево или другой композитный материал, а в растянутой — сталь.

1. Сталежелезобетонные пространственные конструкции [6, 7] — конструктивные формы частей или зданий в целом, основой которых является дискретно-континуальный строительный элемент. Универсальный строительный элемент применен для создания полнособорных зданий и сооружений различного типа. Создание таких конструкций основано на следующем принципе: каждый из используемых элементов нахо-

дится в наиболее выгодных условиях работы (бетон — сжатие, металл — растянут).

Широко используются унифицированные композитные однотипные строительные элементы, например, сталежелезобетонные, состоящие из тонкой легкой ребристой железобетонной плиты и подкрепляющего металлического шпренгеля. Связи между этими элементами однотипны и позволяют создавать полнособорные замкнутые здания и фундаментные платформы как пространственные многосвязные, достаточно легкие конструкции [6].

2. Деревометаллические пространственные конструкции [4, 6]. В основу таких конструкций положен принцип пространственности, когда из линейных деревянных элементов создают пространственную форму.

Использование пространственных совмещенных блок-ферм, блок-арок, плит на пролет, рамно-панельных блок-секций и др. позволяет: резко снизить трудоемкость монтажа благодаря уменьшению количества монтажных элементов; сократить расход строительных материалов; упростить конструктивную схему здания, в частности за счет отсутствия необходимости устройства горизонтальных и вертикальных связей; уже на стадии проектирования конструкций можно предусмотреть возможность для пропуска инженерных коммуникаций во внутренних пространствах конструкций; улучшить условия труда строительных рабочих благодаря уменьшению количества сборочных операций и трудоемкости верхолазных работ; ускорить ввод объектов в эксплуатацию и, следовательно, сократить сроки окупаемости зданий и сооружений.

3. Пространственные тонколистовые металлические конструкции [3, 4, 6]. Создание тонколистовых металлических конструкций основано на принципе пространственного формообразования, что придает тонкому металлическому листу большую пространственную жесткость. Разработаны и комплексно исследованы несколько типов облегченных, предварительно напряженных, двухпоясных конструкций покрытий или более сложных составных континуально-стержневых систем, в структуру которых входят отдельные блоки из стандартных и профилированных листов. При этом как в отдельных конструктивных элементах, так и в составленных из них системах в полной мере используются прочностные свойства материала за счет совмещения ограждающих и несущих функций.

Выводы. Авторами сформулированы общие и частные принципы активного формообразования строительных конструкций, особенности конструктивных решений, обусловленных использованием разных строительных материалов: комбинированных сборных сталежелезобетонных конструкций, пространственных конструкций из тонкостенных металлических элементов, принципы формообразования и конструирования блочных комбинированных конструкций на основе древесины с необходимым учетом многообразия сложных грунтовых условий, а также влияния сейсмичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абовский, Н.П. Основные принципы формообразования конструкций [Текст] / Н.П. Абовский // Вестн. Отд-ния строит. наук РААСН. — М., 2010. — Т. 1, вып. 14. — С. 15–19.

2. Современные аспекты активного обучения. Строительная механика. Теория упругости. Управление строительными конструкциями : учеб. пособие. — 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Н.П. Абовский, Л.В. Енджеевский и др.; под ред. Н.П. Абовского. — Красноярск : СФУ, 2008. — 407 с.
3. Енджеевский, Л.В. Формообразование как главный фактор эффективности большепролетных пространственных конструкций [Текст] / Л.В. Енджеевский // Успехи строительной механики и теории сооружений : сб. науч. ст. к 75-летию со дня рождения В.В. Петрова. — Саратов : СГТУ, 2010. — С. 58–63.
4. Индустриальные конструкции для строительства малоэтажных зданий и сооружений : учеб. пособие [Текст] / В.И. Жаданов и др. — Оренбург; Красноярск, 2009. — 416 с.
5. Конструктивная сейсмобезопасность зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях : препр. [Текст] / Н.П. Абовский и др. — Красноярск : СФУ, 2009. — 186 с.
6. Комбинированные из стали, бетона, дерева пространственные конструкции блочного типа : учеб. пособие : в 2 ч. [Текст] / Л.В. Енджеевский и др. — Красноярск : СФУ, ИПК ГОУ ОГУ, 2008. — Ч. 1. — 321 с.
7. Абовская, С.Н. Сталежелезобетонные конструкции. Панели и здания [Текст] / С.Н. Абовская. — Красноярск : КрасГАСА, 2001. — 460 с.

ДЕОРДИЕВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

АБОВСКИЙ Наум Петрович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ЕНДЖИЕВСКИЙ Лев Васильевич, д-р техн. наук, проф.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ИНЖУТОВ Иван Семенович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ПАЛАГУШКИН Владимир Иванович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 10.10.13

Deordiev Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abovsky Naum Petrovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Endzhievsky Lev Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Inzhutov Ivan Semenovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Palagushkin Vladimir Ivanovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

FORM SHAPING OF BUILDING STRUCTURES.

GENERAL AND SPECIFIC PRINCIPLES

The paper is devoted to an interdisciplinary innovative approach to the problem of building structures design. Its philosophical base is a system approach that has allowed to find general principles among traditionally disconnected trends of building structures design and as a result to formulate the fundamentals of a new scientific direction – form shaping of building structures. General and specific principles of active structures form shaping, features of constructive solutions stipulated by the use of different construction materials are presented taking into account the variety of ground conditions and the seismicity impact.

Key words: form shaping, building structures, system approach, general principles, specific principles.

REFERENCES

1. A b o v s k y, N.P. Basic principles of a form shaping of structures [Text] / N.P. Abovsky // Messenger of office of construction sciences of RAACS. — M., 2010. — Vol. 1, iss. 14. — P. 15–19.
2. Modern aspects of active training. Construction mechanics. Elasticity theory. Management of construction designs : manual. — the 3rd edition processed and added [Text] / N.P. Abovsky, L.V. Endzhiyevsky etc; under edition of N.P. Abovsky. — Krasnoyarsk : SFU, 2008. — 407 p.
3. E n d z h i y e v s k y, L.V. Form shaping as main factor of efficiency of wide-span spatial designs [Text] / L.V. Endzhiyevsky // Progress of construction mechanics and theory of constructions : the collection of scientific articles to the 75 anniversary since the birth of V.V. Petrov. — Saratov : SGTU, 2010. — P. 58–63.
4. Industrial designs for construction of low buildings and constructions: manual [Text] / V.I. Zhadanov etc. — Orenburg; Krasnoyarsk, 2009. — 416 p.
5. Constructive seismic safety of buildings and constructions in difficult soil conditions: pre-print [Text] / N.P. Abovsky etc. — Krasnoyarsk : SFU, 2009. — 186 p.
6. Combined from steel, concrete, a tree spatial designs of block type: the manual : in 2 part [Text] / L.V. Endzhiyevsky etc. — Krasnoyarsk : SFU, IPK OGУ GOU, 2008. — P. 1. — 321 p.
7. A b o v s k a y a, S.N. Steel iron concrete of a structures. Panels and buildings [Text] / S.N. Abovskaya. — Krasnoyarsk, 2001. — 460 p.

УДК 539.3 : 624.011.1.041.2

К.П. ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ, Х.С. ХУНАГОВ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматриваются статически неопределеные деревянные конструкции при несимметричных нагрузках. Используются свойства древесины и конструкций из нее — ползучесть, приспособляемость, живучесть для восприятия длительных нагрузок, в том числе запроектных. Перераспределение усилий позволяет получить экономию материалов и обеспечить безопасность сооружений. Приводятся алгоритм расчета и построение расчетных моделей применительно к пространственным конструкциям в виде ребристых оболочек. Используется метод интегрального модуля деформаций.

Ключевые слова: статически неопределеные конструкции, ползучесть, длительный и интегральный модули деформаций.

При расчете нелинейно и неравновесно деформируемых статически неопределеных деревянных конструктивных систем может быть использован метод интегральных оценок нелинейных и неравновесных свойств деформирования древесины. С помощью метода интегральных оценок осуществляются требуемая линеаризация задачи, временная фиксация неравновесных признаков деформирования.

Принимаются и считаются справедливыми следующие теоретические предпосылки, изложенные достаточно подробно в работе академика РААСН, проф., д-ра техн. наук В.М. Бондаренко [1]:

— геометрически конструкция не изменяется даже на этапах, предшествующих разрушению, так как в моменты, предшествующие разрушению, несущая способность существует, и жесткость имеет хотя и минимальную, но конечную величину;

— сечения стержневых конструкций остаются плоскими вплоть до разрушения, если оценивать форму сечений в среднем (гипотеза плоских сечений);

— сохраняется положение о малости деформаций (геометрически линейная задача).

Современная строительная механика статически неопределенных конструкций опирается на принцип возможных перемещений и на гипотезу об аддитивности (однозначной взаимосвязи) причин и следствий деформирования. Этот принцип обосновывается выбором достаточно мелкого разбиения процесса нагружения и анализом напряженно-деформированного состояния (НДС) при расчете конструкции.

В методе интегральных оценок процесс последовательных приближений является способом интегрального уточнения внутренних усилий и напряжений, трансформирующихся во времени, вследствие их перераспределения с более нагруженных участков и компонентов на менее нагруженные. Со временем под влиянием ползучести из-за ее нелинейности не только снижается жесткость всей конструкции, но, что особенно важно, изменяются соотношения между жесткостями отдельных сечений и компонентами сечений.

В статически неопределеных конструкциях, у которых распределение усилий обусловлено характером изменения жесткости, помимо процесса внутренних итераций, требуемого для уточнения жесткостей, необходим сочетающийся с ним процесс внешних итераций, уточняющий по данным жесткостям закон распределения усилий. Сочетание процессов внутренних и внешних итераций в решении задачи о напряженном и деформированном состоянии статически неопределеных нелинейно инеравновесно деформируемых систем с помощью последовательных приближений заключается в следующем [1]:

1) в обычной упруголинейной постановке известными приемами строительной механики рассчитывается заданная статически неопределенная система и строятся эпюры внутренних усилий (нулевое приближение);

2) назначаются сечения, в которых по данным об усилиях с помощью внутреннего процесса итерации уточняются расчетные жесткости (снижается модуль деформаций);

3) по новому закону распределения жесткостей повторяется статический расчет системы с учетом переменности вдоль пролетов расчетных жесткостей. Этим уточняются эпюры распределения усилий вдоль осей системы (первое приближение);

4) по усилиям первого приближения вновь уточняются расчетные жесткости, а по ним находятся эпюры усилий во втором приближении и т.д. до стабильной сходимости с заданной степенью точности.

Для учета переменности жесткости стержней каждый элемент статически неопределенной системы делится на несколько участков. В пределах каждого такого участка жесткость считается постоянной и равной среднему значению жесткости граничных зон участка. При использовании метода конечных элементов приведенный модуль деформаций определяется как среднеарифметическая нескольких промежуточных значений.

Процесс внутренних итераций имеет следующие особенности [1]:

1) внешнюю нагрузку целесообразно задавать в виде дискретных значений усилий в выбранных сечениях основной системы;

2) при расчете системы на длительное действие нагрузки разбивка по времени может производиться как на равные интервалы, так и по закону, отвечающему изменению во времени жесткостей и усилий;

3) проверку сходимости и оценку результатов по ожидаемой точности надо производить по всем сечениям. Расчет считается законченным, когда текущее и предыдущее значения фибровых напряжений, жесткостей, усилий или других характеристик системы в сечениях совпадают тождественно или с заданной степенью точности.

Итак, на каждом этапе приближения использование аппарата линейной строительной механики правомерно. При этом потери энергии учитываются в уравнениях баланса работ автоматически снижением соответствующих расчетных модулей деформации. В процессе последовательных приближений жесткость каждого участка, а также изменения обследуемых характеристик во времени уточняются.

Известно, что сжатые и сжато-изгибающие элементы из древесины деформируются нелинейно (рис. 1) [2]. Диаграммы деформирования древесины, полученные из многих экспериментальных работ, возможно аппроксимировать рядом уравнений. Для того чтобы полученное уравнение достаточно хорошо совпадало с экспериментальными кривыми, необходимо

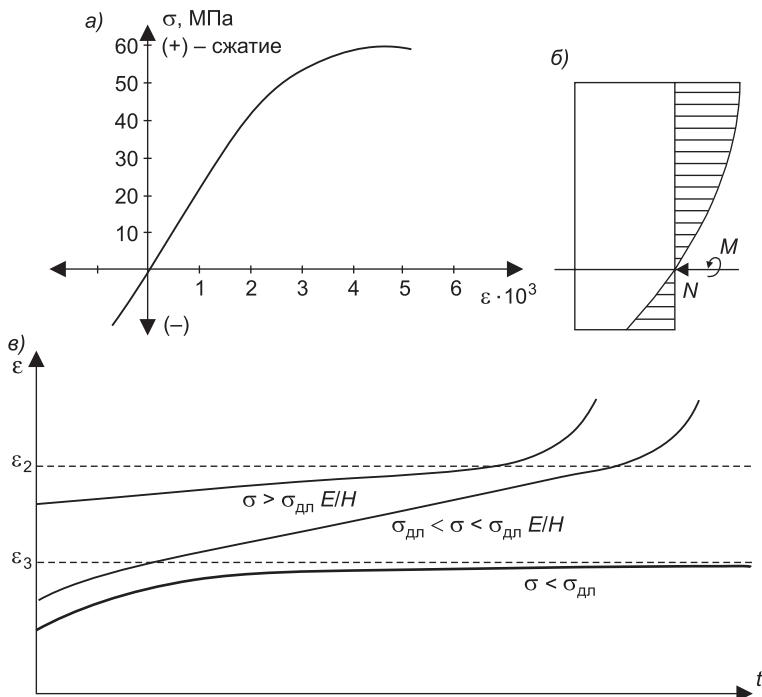


Рис. 1. Диаграмма деформирования древесины
а — при сжатии — растяжении; б — при кратковременном изгибе; в — при
длительном действии постоянной нагрузки

мо за основные (базовые) параметры, определяющие кривую, принимать те величины, которые наиболее устойчивы и имеют наименьший разброс. За базовые характеристики в данном случае приняты начальный модуль деформаций и кратковременный предел прочности. Для воздушно-сухой древесины если приняты $\sigma_{\text{пп}} = 55,0$ МПа и $E_0 = 1,48 \cdot 10^4$ МПа.

В качестве аппроксимирующей функции рекомендуется параболическая зависимость Ф.И. Герстнера [3]:

$$\sigma = E_0 \varepsilon - \frac{E_0^2}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon^2. \quad (1)$$

В этом уравнении выполнены сразу три требования: равенство пределов прочности, равенство производных в точке максимума экспериментальной и аппроксимирующих кривых, равенство начальных модулей деформации для растянутой и сжатой зон.

Если принять за (+) относительные деформации сжатия, эта зависимость удачно аппроксимирует диаграмму в зоне предельных напряжений и, особенно, диаграмму изгибающего элемента (см. рис. 1), поскольку по-разному описывает сжатую и растянутую зоны, что соответствует экспериментальным данным.

Уравнения механического состояния древесины. Для древесины при достаточно высоких уровнях напряжений характерна сложная нелинейная ползучесть. В связи с этим к ней применим метод, разработанный А.Р. Ржаницыным, позволяющий учитывать сложность процесса деформирования древесины во времени с помощью разбиения процессов деформирования на три стадии и замены сложной нелинейной связи

между напряжениями и деформациями кусочно-линейными зависимостями, удовлетворяющими условию неразрывности деформаций, напряжений и скоростей деформирования при переходе от одной стадии деформирования к другой [4].

Для древесины данные стадии характеризуются следующими особенностями:

а) в первой стадии деформирования ползучесть является обратимой, подчиняется основным положениям линейной теории ползучести;

б) во второй стадии — установившейся ползучести — деформирование идет с постоянной скоростью нарастания деформаций ползучести (при постоянных нагрузках), деформации здесь большей частью необратимы;

в) в третьей стадии имеет место критическое нарастание необратимых деформаций во времени.

На рис. 1, в изображены кривые ползучести при разных уровнях напряжений. Чтобы описать процесс деформирования на этих стадиях приняты уравнения:

первая стадия — стадия линейной ползучести — описывается основным упрощенным законом линейной ползучести (здесь сохранены обозначения автора)

$$nE_0\dot{\varepsilon} + H\varepsilon = \sigma + n\dot{\sigma}; \quad (2)$$

вторая стадия — стадия установившейся ползучести

$$nE_0\dot{\varepsilon} = \sigma + n\dot{\sigma} - \sigma_{\text{дл}}; \quad (3)$$

третья стадия — стадия с возрастающей скоростью деформирования

$$nE_0\dot{\varepsilon} - B\varepsilon = \sigma + n\dot{\sigma} - \sigma_{\text{пп}}. \quad (4)$$

Переход из одной стадии в другую определяется величиной максимальной относительной деформации, критической для каждой стадии.

Величина критической деформации для первой стадии равна:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \frac{\sigma}{H} = \text{const}; \quad (5)$$

для второй стадии

$$\varepsilon = \varepsilon_2 = \frac{\sigma_{\text{пп}} - \sigma_{\text{дл}}}{B} = \text{const}. \quad (6)$$

Пределные деформации для первой и второй стадий (ε_1 и ε_2) согласно многим экспериментальным и теоретическим данным не зависят от величины и режима приложения нагрузок и являются постоянными величинами для данного вида напряженного состояния древесины, что соответствует основным положениям деформационной теории разрушения.

В (1)–(6) приняты обозначения:

E_0 — мгновенный начальный модуль деформаций;

H — константа, имеющая физический смысл длительного модуля деформаций (для древесины $H = (0,6+0,75) E_0 = 10^4$ МПа [3]);

B — константа, имеющая смысл модуля деформации при критическом нарастании деформаций;

σ, ε — напряжения и относительные деформации (текущие);

n — время релаксации;

$\sigma_{\text{дл}}$ — длительный предел прочности; $\sigma_{\text{дл}} = 22,0$ МПа;

$\sigma_{\text{пп}}$ — кратковременный предел прочности; $\sigma_{\text{пп}} = 55,0$ МПа.

Каждая из стадий характеризуется специфическими условиями деформирования. Деформации в каждой стадии могут описываться разными уравнениями.

В работе¹ исследуется поведение древесины во всех трех стадиях. В области линейной ползучести при $\sigma = \text{const}$ Ю.М. Иванов предложил зависимость:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0)(1 + bt^{0.21}), \quad (7)$$

где

$$b = \frac{10^{-2}}{0.735 - 0.02086 W}, \quad (8)$$

W — влажность древесины, %.

В качестве основной рабочей зависимости в исследовании принята зависимость (7), предложенная Ю.М. Ивановым (могут быть применены также и другие зависимости). Эта зависимость может быть использована вместо решения уравнения (2).

В проведенных Ю.М. Ивановым и Е.Н. Квасниковым исследованиях^{1, 2} показано, что после разгрузки развиваются деформации упругого последействия, т.е. деформации, связанные со стремлением упругого скелета древесины к восстановлению своих первоначальных размеров. Абсолютные значения деформации последействия и ползучести равны. Следовательно, не только упругие, но и деформации ползучести полностью обратимы. Эти исследования показали, что данное положение сохраняется и при более сложных режимах изменения нагрузок во времени.

Таким образом, длительное деформирование древесины в условиях, когда $\sigma < \sigma_{\text{дл}}$, при ступенчатом изменении напряжений можно уравнение (7) записать в виде:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0)(1 + b(t - t_0)^{0.21}) + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta\sigma_i}{E_0 - \frac{E_0^2}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon_{i-1}^a} (1 + b(t - t_i)^{0.21}), \quad (9)$$

где

$$\varepsilon_{i-1}^a = \varepsilon(t_0) + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta\sigma_i}{E_0 - \frac{E_0^2}{4\sigma_{\text{пп}}} (\varepsilon_{i-2}^a + \Delta\varepsilon_{i-1}^a)}; \quad (10)$$

ε_{i-1}^a — суммарное значение мгновенных (кратковременных) приращений относительных деформаций.

Уравнение (8) учитывает влияние влажности W , однако в форме записи (9) подразумевается постоянство влажности при всех этапах деформирования.

¹ Иванов Ю.М. Области упругого и неупругого деформирования древесины и фанеры // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1979. № 12. С. 17–22.

² Квасников Е.Н. Вопросы длительного сопротивления древесины и конструктивных элементов из дерева и слоистых пластиков: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1973. 49 с.

Если $\sigma < \sigma_{\text{дл}}$, то деформации не превысят величины $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_{\text{дл}}}{H}$ при сколь угодно большой продолжительности действия нагрузки, и вторая стадия деформирования не наступит. Если $\sigma > \sigma_{\text{дл}}$, то в определенный момент времени t_1 деформации превзойдут величину ε_1 , и начнется вторая стадия деформирования. При этом время наступления второй стадии деформирования определяется по формуле (10):

$$t_1 = \frac{E_0 n}{H} \ln \frac{\sigma(E_0 - H)}{(\sigma - \sigma_{\text{дл}})E_0}. \quad (11)$$

Если $\sigma > \frac{E_0}{H} \sigma_{\text{дл}}$, то деформирование сразу начнется со второй стадии.

При ступенчатом изменении нагрузки решение уравнения (3) при ($t > t_1$) примет вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_{\text{дл}}}{H} + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\text{дл}}}{nE_0} (t - t_1) + \sum_{i=0}^k \frac{\Delta \sigma_i}{nE_0} (t - t_i). \quad (12)$$

При ступенчатом изменении нагрузки и в этой стадии применим принцип наложения. При $\sigma > \sigma_{\text{дл}}$ упругое последействие по абсолютному значению меньше деформаций ползучести. Эта разница является следствием местных нарушений связей скелета древесной структуры при длительном действии относительно высоких сжимающих напряжений. Следовательно, для древесины при длительном действии напряжений $\sigma_{\text{дл}} < \sigma < \sigma_{\text{пп}}$ характерно проявление пластических деформаций. Невязка при этом деформировании служит как бы погрешностью расчета и в каждом конкретном случае требует собственной оценки (особенно при переходе от стадии к стадии).

Переход в третью стадию произойдет в момент времени t_2 , определяемый как время до разрушения (очень близкое к времени разрушения). Отличие t_2 от времени разрушения незначительно, так как интенсивный процесс нарастания деформаций в этой стадии происходит сравнительно быстро. Время t_2 при $\sigma = \text{const}$ вычисляется по формуле:

$$t_2 = t_1 + nE_0 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\sigma - \sigma_{\text{дл}}}. \quad (13)$$

В третьей стадии деформирования кривая ползучести ($\sigma = \text{const}$) выражается формулой:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma - \sigma_{\text{дл}}}{B} e^{\frac{B(t-t_2)}{nE_0}} - \frac{\sigma - \sigma_{\text{пп}}}{B}. \quad (14)$$

Длительный модуль деформаций. Относительная деформация зависит от режима, длительности, уровня загружения тела, свойств стадий и наследственности материалов. Использование нелинейного уравнения механического состояния материала в решениях задач строительной механики, как правило, неосуществимо ввиду его громоздкости.

С.Е. Фрайфельд, исследуя одноосное напряженное состояние, предложил для линейной постановки задачи ввести временной модуль деформаций (длительный модуль деформаций)

$$E_{\text{дл}}(t_0, t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t_0, t)}, \quad (15)$$

где $\sigma(t)$ — напряжения, действующие в момент наблюдения t ;
 $\varepsilon(t_0, t)$ — относительные деформации к моменту наблюдения t , устанавливаемые с учетом влияния возраста материала, его свойств старения, режима и длительности нагружения.

В зависимости от уровня напряжений относительные деформации $\varepsilon(t_0, t)$ описываются формулами (9), (12), (14)

$$E_{\text{дл}}(t_0, t) = \left[\frac{\varepsilon(t_0, t)}{\sigma(t)} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Для выражения (9), соответствующего линейной ползучести, имеем

$$E_{\text{дл}}(t_0, t) = \left[\frac{\varepsilon(t_0)(1+b(t-t_0)^{0.21})}{\sigma(t)} + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta\varepsilon_i}{\sigma(t)} (1+b(t-t_i)^{0.21}) \right]^{-1}. \quad (17)$$

При ступенчатом изменении напряжений $E_{\text{дл}}(t_0, t)$ имеет вид

$$E_{\text{дл}}(t_0, t) = \frac{E_0 - \frac{E_0^2}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon(t_0)}{1+b(t-t_0)^{0.21}} \left[1 + \sum_{i=1}^k \frac{1+b(t-t_i)^{0.21}}{1+b(t-t_0)^{0.21}} \cdot \frac{\Delta\sigma_i}{4\sigma_{\text{пп}} \left(1 - \frac{E_0}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon_{i-1}^a \right)^2} \right]^{-1}. \quad (18)$$

На каждом этапе приближений нагрузка считается постоянной.

Во второй стадии деформирования длительный модуль деформации имеет вид

$$E_{\text{дл}}(t_0, t) = \left[\frac{\sigma_{\text{дл}}}{H\sigma(t)} + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\text{дл}}}{nE_0\sigma(t)} (t-t_1) + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta\sigma_i}{\sigma(t)nE_0} (t-t_i) \right]^{-1}. \quad (19)$$

При деформировании в третьей стадии длительный модуль деформаций при постоянном напряжении σ равен

$$E_{\text{дл}}(t_0, t) = \left[\frac{\sigma - \sigma_{\text{дл}}}{B\sigma} e^{\frac{B(t-t_2)}{nE_0}} - \frac{\sigma - \sigma_{\text{пп}}}{B\sigma} \right]^{-1}. \quad (20)$$

Интегральный модуль деформаций*. Применение уравнений механического состояния (9), (12), (14) для описания НДС тел, материалы которых деформируются нелинейно и с запаздыванием, встречают в общем случае математические трудности. Математические трудности зна-

* Метод разработан и изложен В.М. Бондаренко в работе [1].

чительно снижаются при решении поставленных задач, если применить метод интегральных оценок, в основу которого положено использование интегрального модуля деформаций.

Для определения значений интегрального модуля деформации рассматриваем сжато-изгибающий деревянный элемент. Такой элемент имеет неоднородное НДС. Нормальные напряжения изменяются по высоте сечения. В случае сжатого по всей высоте сечения элемента напряжения меняются от определенного σ_{\min} до максимального σ_{\max} одинакового знака, при наличии растянутой зоны — от какого-то отрицательного значения растягивающих напряжений σ_{\min} до какого-то положительного значения сжимающих напряжений σ_{\max} , переходя через нулевое значение напряжений (рис. 2). При этом нелинейность деформирования материалов предопределяет различие модулей деформаций в точках с разными напряжениями и приводит задачу к упомянутым математическим трудностям.

Оценивая реальную деформативность элементов и вместе с тем не оперируя различными модулями деформаций в каждом дискретном слое, уравнение механического состояния материалов $\varepsilon(\sigma, t_0, t)$ по аналогии с (16), независимо от характера нелинейности и термодинамического содержания, записывается в виде

$$\varepsilon_{\text{ин}}(x, z, t) = \frac{\sigma(z, x, t)}{E_{\text{ин}}(x, t)}, \quad (21)$$

где $E_{\text{ин}}(x, t)$ — искомый интегральный модуль деформаций для сечения с абсциссой x .

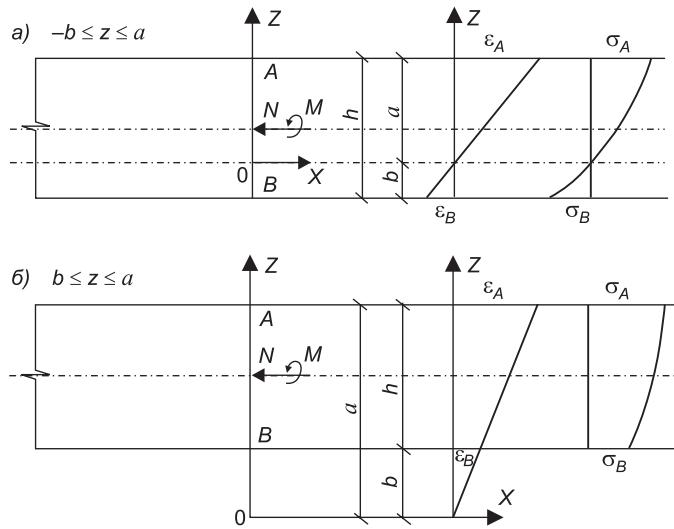


Рис. 2. Диаграммы деформированного и напряженного состояний стержня при сжатии с изгибом. Основные соотношения для определения относительных деформаций по высоте сечения стержня

а — при наличии растянутой зоны; б — при отсутствии растянутой зоны

Записываем отклонение значений реальных деформаций ε и деформаций $\varepsilon_{\text{ин}}$, определенных с помощью $E_{\text{ин}}(x, t)$:

$$\Delta = \varepsilon[\sigma(z, x, t), t_0, t] - \varepsilon_{\text{ин}}[\sigma(z, x, t), t_0, t] \neq 0. \quad (22)$$

Суть интегральной оценки состоит в минимизации отклонения, которая осуществляется для сечения в целом.

Принимая нелинейную зависимость σ от ε в виде (7), учитывая непрерывность зависимости $\sigma(z)$ и принимая во внимание соотношения на рис. 2, получим:

$$E_{\text{ин}}(x, t) = \frac{\int_p^q \left(E_0 \varepsilon^a(x, z, t) - \frac{E_0^2}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon^{a^2}(x, z, t) \right)^2 dz}{\int_p^q \varepsilon^a(x, z, t) \left(E_0 \varepsilon^a(x, z, t) - \frac{E_0^2}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon^{a^2}(x, z, t) \right) dz}. \quad (23)$$

Преобразуя выражение (23) при $p = b$, $q = a$, после преобразований получим выражение $E_{\text{ин}}(x, t) = E_{\text{дл}}^\Phi(\varepsilon_\Phi, t, t_0)\Phi(\varepsilon_\Phi^A, b, a)$.

Первая стадия при ступенчатом изменении напряжений:

$$E_{\text{ин}}(x, t) = \Phi(\varepsilon_\Phi^A, b, a) \frac{E_0 - \frac{E_0^2 \varepsilon_\Phi^A}{4\sigma_{\text{пп}}}}{1 + bt^{0.21}} \left[1 + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta \sigma_i (1 + b(t - t_i)^{0.21})}{4\sigma_{\text{пп}} (1 - \frac{E_0}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon_{i-1}^a)^2 (1 + bt)^{0.21}} \right]^{-1}. \quad (24)$$

Вторая стадия при ступенчатом изменении напряжений:

$$E_{\text{ин}}(x, t) = \Phi(\varepsilon_\Phi^A, b, a) \left[\frac{\sigma_{\text{дл}}}{H\sigma(t)} + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\text{дл}}}{nE_0\sigma(t)} (t - t_1) + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta \sigma_i (t - t_i)}{\sigma(t)nE_0} \right]. \quad (25)$$

Третья стадия при постоянной нагрузке:

$$E_{\text{ин}}(x, t) = \Phi(\varepsilon_\Phi^A, b, a) \left[\frac{\sigma_0 - \sigma_{\text{дл}}}{B\sigma_0} e^{\frac{B(t-t_2)}{nE_0}} - \frac{\sigma_0 - \sigma_{\text{пп}}}{B\sigma_0} \right], \quad (26)$$

$$\text{где } \Phi(\varepsilon_\Phi^A, b, a) = \frac{1}{1 - \frac{E_0}{4\sigma_{\text{пп}}} \varepsilon_\Phi^A} \cdot \frac{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^3 - 100\varepsilon_\Phi^A \left(1 - \left(\frac{b}{a}\right)^4\right)}{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^3 - 50\varepsilon_\Phi^A \left(1 - \left(\frac{b}{a}\right)^4\right)}; \quad (27)$$

$\Phi(\varepsilon_\Phi^A, b, a)$ — функция, отражающая нелинейность деформирования изгибающего элемента, уровень напряжений;

$E_{\text{дл}}^\Phi(\varepsilon_\Phi, t, t_0)$ — длительный модуль деформации фибрового волокна сжатой кромки элемента.

При расчете $E_{\text{ин}}(x, t)$ во всех случаях была принята гипотеза плоских сечений. Значения краевых напряжений находятся из рис. 2 по заранее

установленным на предыдущем этапе усилиям (для первого этапа по усилиям, определенным по линейно-упругому расчету).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко, В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко. — Харьков : Изд-во ХГУ, 1968. — 323 с.
2. Александров, А.В. Методы расчета стержневых систем, пластин и оболочек с использованием ЭВМ : в 2 ч. [Текст] / А.В. Александров, В.Я. Лашченников, Н.Н. Шапошников, В.А. Смирнов; под ред. проф. А.Ф. Смирнова. Ч. 1. — М. : Стройиздат, 1976. — 248 с.
3. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики [Текст] / П.А. Лукаш. — М. : Стройиздат, 1978. — 208 с.
4. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести [Текст] / А.Р. Ржаницын. — М. : Стройиздат, 1968. — 416 с.

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ Константин Пантелейевич, д-р техн. наук, проф.

Московский государственный строительный университет

ХУНАГОВ Хазрет Саферович, канд. техн. наук, проф.

ОАО «Центр проектирования конструкций», г. Краснодар

Получено 10.10.13

Pyatikrestovsky Konstantin Panteleevich, doctor of technical sciences, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Khunagov Khazret Saferovich, candidate of technical sciences, professor, ISC «Center of design constructions», Krasnodar, Russia

NONLINEAR DEFORMATIONS OF STATICALLY INDEFINABLE WOODEN STRUCTURES

Statically indefinable wooden structures at asymmetrical loadings are considered. Properties of wood and structures from it — creep, adaptability, survivability for perception of long loadings, including beyond design basis are used. Redistribution of efforts allows to receive economy of materials and to ensure safety of constructions. The algorithm of calculation and creation of settlement models in relation to spatial structures in the form of ridge covers are given. The method of the integrated module of deformations is used.

Key words: statically indefinable structures, creep, long and integrated modules of deformations.

REFERENCES

1. Bondarenko, V.M. Some questions of the nonlinear theory of reinforced concrete [Text] / V.M. Bondarenko. — Kharkov : HGU publ. house, 1968. — 323 p.
2. Александров, А.В. Methods of calculation of rod systems, plates and covers with COMPUTER use : in 2 parts [Text] / А.В. Александров, В.Я. Лашченников, Н.Н. Шапошников, В.А. Смирнов; under the editorship of the prof. А.Ф. Смирнов. Р. 1. — М. : Стройиздат, 1976. — 248 p.
3. Lukash, P.A. Bases of nonlinear construction mechanics [Text] / P.A. Lukash. — М. : Стройиздат, 1978. — 208 p.
4. Rzhanitsyn, A.R. Creep theory [Text] / A.R. Rzhanitsyn. — М. : Стройиздат, 1968. — 416 p.

УДК 624.011.2.001.8

Д.Г. КОПАНИЦА, С.Л. КАПАРУЛИН, Д.В. ЛОСКУТОВА

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ*

Приводятся результаты экспериментальных исследований сквозных конструкций из древесины с узловыми сопряжениями на металлических зубчатых пластинах. Испытания проведены при постепенном увеличении нагрузки. На каждом этапе нагружения измерялись спектральные характеристики конструкций. Показано, что характер изменения спектра мощности колебаний отражает напряженно-деформированное состояние конструкции и позволяет выявить моменты ее перехода из упругого состояния к упругопластическому. Полученные результаты использованы при анализе технического состояния эксплуатируемых пространственных сквозных конструкций из древесины.

Ключевые слова: техническое состояние конструкции, сквозные деревянные конструкции, спектры мощности колебаний, частота собственных колебаний, упругие и упругопластические деформации, разрушение.

В процессе экспериментальных исследований конструкций при действии нагрузок, вызывающих большие деформации, возникает потребность в определении значения нагрузки, при которой появляются неупругие деформации. Изменение состояния конструкции под нагрузкой может быть оценено из анализа обобщенных параметров, без детализации ее физических свойств. Наиболее общими параметрами, характеризующими динамические свойства, являются спектральные характеристики, исследование которых позволяет оценить результат действия нагрузки на физическое состояние конструкции.

На рис. 1, *a* показана диаграмма $\sigma - \varepsilon$, характеризующая упругие деформации конструкции, к которой приложена гармоническая нагрузка $x(t)$. Реакция упруго работающей конструкции $y(t)$ соответствует приложенной нагрузке и имеет вид гармонической функции с амплитудой колебания A_1 .

В стадии упругопластического деформирования диаграмма $\sigma - \varepsilon$ принимает нелинейный характер, как показано на рис. 1, *б*. В этом случае, при действии гармонической нагрузки $x(t)$ реакция конструкции $y(t)$ изменилась, амплитуды A_1 и A_2 имеют разные значения. Из рис. 1, *б* следует, что реакция конструкции на гармоническую нагрузку при упругопластической работе изменяется и становится не гармонической.

В радиотехнике по характеристикам сигнала на входе и выходе определяют свойства самой системы. В линейных системах форма сигнала и спектральные характеристики на входе и выходе системы остаются неизменными. При нелинейном преобразовании форма сигнала

* Исследование выполнено при финансовой поддержке работ по проекту Министерства образования и науки РФ.

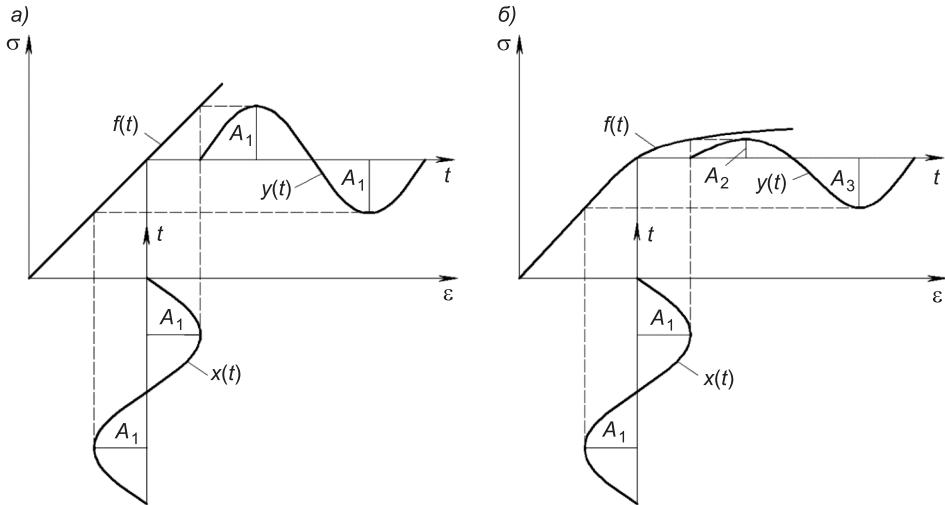


Рис. 1. Диаграммы работы конструкции под действием гармонической нагрузки
а — упругая деформация; б — упругопластическая деформация

и спектральные характеристики на выходе изменяются по сравнению с входными характеристиками. Упругопластическая работа конструкции соответствует нелинейному преобразованию и изменяет форму сигнала и спектр. На рис. 2 приведены динамические характеристики конструкции при упругих и упругопластических деформациях. Пунктирной линией показан спектр, характеризующий упругие колебания конструкции $S_e(f)$ с собственной частотой f_1 . Сплошная линия спектра $S_i(f)$ соответствует неупругой работе конструкции, характеризующейся появлением новых форм колебаний с частотами kf_1 , кратными собственной частоте.

Методика оценки динамических свойств конструкции посредством спектральных характеристик использована при проведении экспериментальных исследований треугольных дощатых ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах типа GNA 20 фирмы Mitek. Общая длина ферм 9,0 м, с пролетом между опорами 7,6 м. Высота в коньке фермы — 2,74 м, уклон верхних поясов — 1:30.

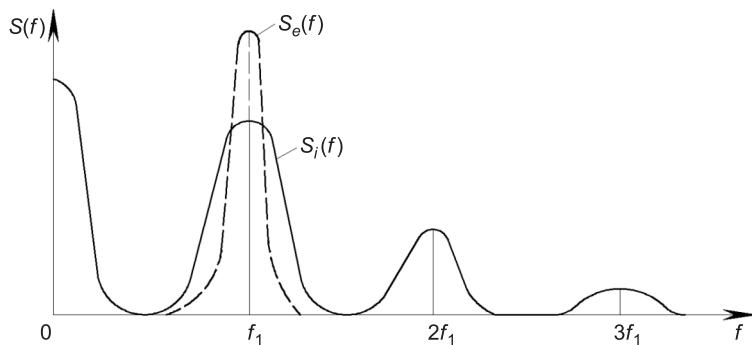


Рис. 2. Спектр мощности колебаний при упругой работе конструкции на частоте f_1 и неупругой работе конструкции на кратных частотах kf_1

Для каждого элемента конструкции были заготовлены стандартные образцы, вырезанные из элементов фермы, для экспериментальной проверки модуля упругости и предела прочности при сжатии вдоль волокон. Влажность деревянных образцов на момент испытания составила $W = 10,2 \%$. Для элементов верхнего пояса прочность при кратковременном сжатии $R_c = 65,0$ МПа. После приведения к стандартной влажности $W = 12,0 \%$ прочность на сжатие $R_c = 60,63$ МПа. Соответственно модуль упругости для древесины верхнего пояса при влажности $W = 10,2 \%$, $E = 11256,0$ МПа, при $W = 12,0 \%$, $E = 10500,0$ МПа. Для элементов нижнего пояса прочность при кратковременном сжатии $R_c = 47,0$ МПа. После приведения к стандартной влажности $W = 12,0 \%$ прочность на сжатие $R_c = 43,84$ МПа. Модуль упругости для древесины нижнего пояса при влажности $W = 10,2 \%$, $E = 8361,5$ МПа, при $W = 12,0 \%$, $E = 7800,0$ МПа. Для элементов решетки при влажности $W = 10,2 \%$, прочность при кратковременном сжатии $R_c = 57,83$ МПа. После приведения к стандартной влажности прочность на сжатие $R_c = 53,78$ МПа. Модуль упругости для древесины элементов решетки при влажности $W = 10,2 \%$, $E = 10259,0$ МПа, при $W = 12,0 \%$, $E = 9570,0$ МПа.

Эксперименты проведены на стенде, предназначенном для одновременного испытания двух ферм, объединенных в пространственный блок шириной 1,0 м. Поперечные вертикальные связи установлены по стойкам крестовой решеткой. Горизонтальные связи устроены по верхнему поясу, по нижнему поясу — маузерлат и полураскосная решетка. Блок ферм установлен в проектное положение на две металлические опоры (рис. 3).

Опоры центрировались в соответствии с проектным положением и закреплялись от случайного смещения [1]. Нагрузка прикладывалась к верхним узлам ферм поэтапно и увеличивалась от 7,0 до 76,0 кН. На каждом этапе определялись динамические параметры конструкции. Для регистрации динамических параметров на конструктивных элементах ферм



Рис. 3. Общий вид испытаний

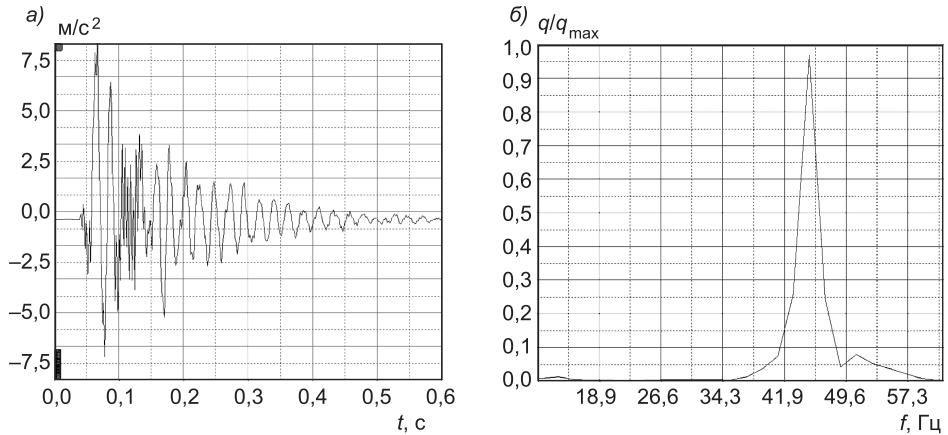


Рис. 4. Динамические характеристики фермы при действии статической нагрузки 25,2 кН
а — акселерограмма; б — спектр мощности колебаний

устанавливались акселерометры, измеряющие ускорение в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. Для измерения относительных деформаций использованы тензометрические преобразователи.

Определение динамических характеристик на каждом этапе нагружения проведено приемно-измерительным комплексом, предназначенным для измерения и обработки пространственно-временных динамических и статических характеристик конструкций. Колебания ферм возбуждались ударной нагрузкой.

На рис. 4 показаны акселерограмма и соответствующий спектр колебаний фермы под нагрузкой 25,2 кН. Собственная частота конструкции равна 47,0 Гц, ширина спектра 2,2–3,8 Гц.

С увеличением нагрузки до 46,0 кН появились признаки неупругих деформаций, видимые на спектре колебаний (рис. 5). Собственная частота фермы на данном этапе составила 46,8 Гц, ширина спектра 3,2–4,5 Гц. В спектре колебаний появились новые частоты, кратные собственной

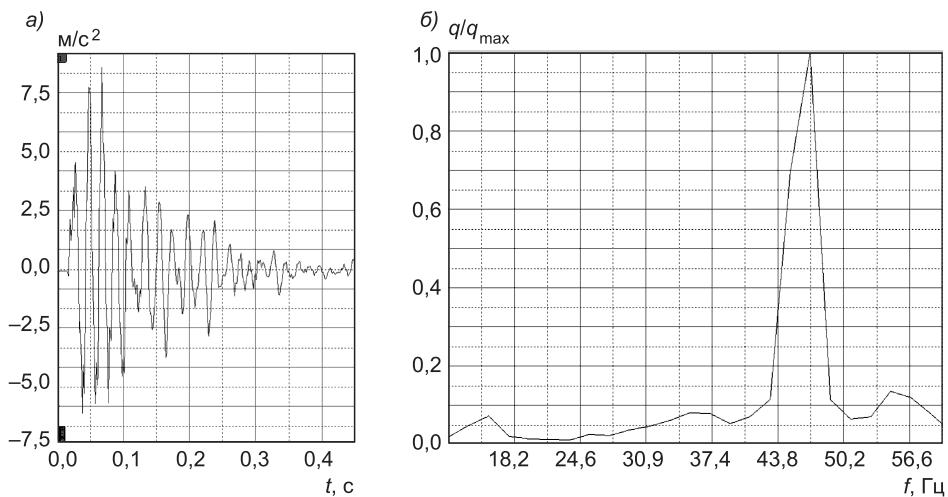


Рис. 5. Динамические характеристики фермы при действии статической нагрузки 46,0 кН
а — акселерограмма; б — спектр мощности колебаний

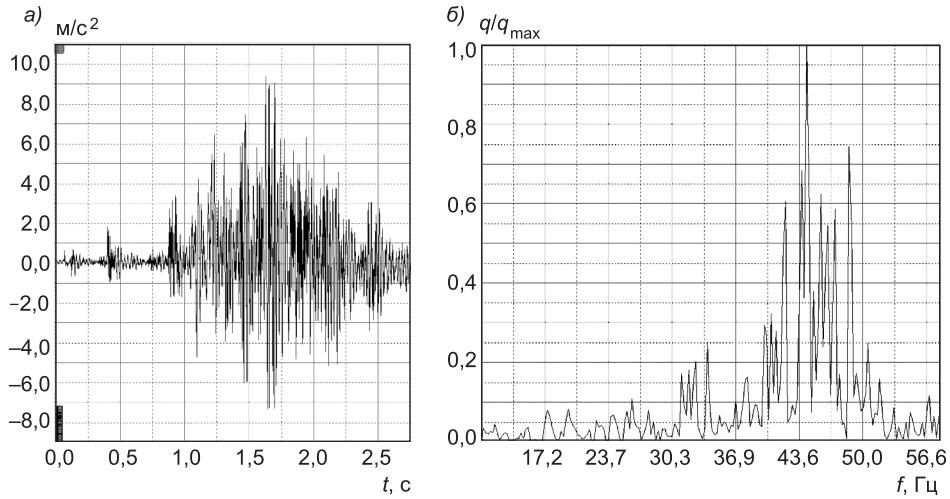


Рис. 6. Спектральные характеристики фермы при действии статической нагрузки 76,0 кН
а — акселерограмма; б — спектр мощности колебаний

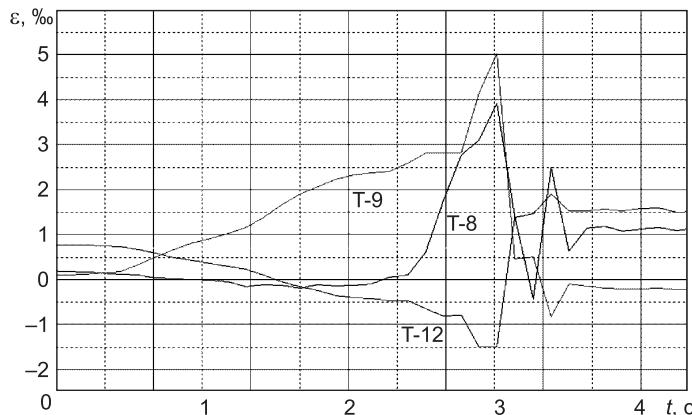


Рис. 7. Диаграмма относительных деформаций конькового узла во времени

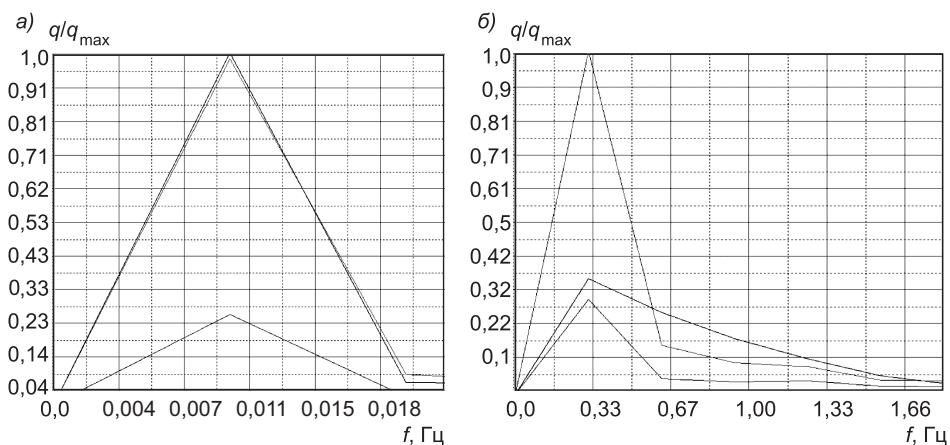


Рис. 8. Спектры перемещений фермы при упругопластическом деформировании (а) и при разрушении (б)

частоте колебаний фермы. Расширение спектра и появление новых частот указывают на нелинейную работу конструкции и развитие пластических деформаций.

Разрушение конструкции произошло от действия нагрузки 76,0 кН. В процессе разрушения проведены измерения динамических параметров фермы. Акселерограмма и соответствующий спектр мощности на рис. 6 отражают процесс разрушения, характеризующийся появлением частот колебаний, не связанных с частотами собственных колебаний фермы.

Помимо ускорений, в реальном масштабе времени были измерены относительные деформации. На рис. 7 диаграмма относительных деформаций тензометрических преобразователей отражает процесс развития деформаций во времени конькового узла фермы [2].

Сопоставление спектров на рис. 8–10 показало, что развитие пластических деформаций происходило на частоте 0,02 Гц, а разрушение — на частоте 0,3 Гц. Общее разрушение фермы показано на рис. 9.

Динамические параметры могут служить основанием для оценки технического состояния эксплуатируемых деревянных конструкций в процессе их обследования.



Рис. 9. Конструкция фермы после разрушения



Рис. 10. Общий вид конструкций эксплуатируемой крыши

а — конструкции ферм на металлических зубчатых пластинах; б — измерительный блок на узле фермы

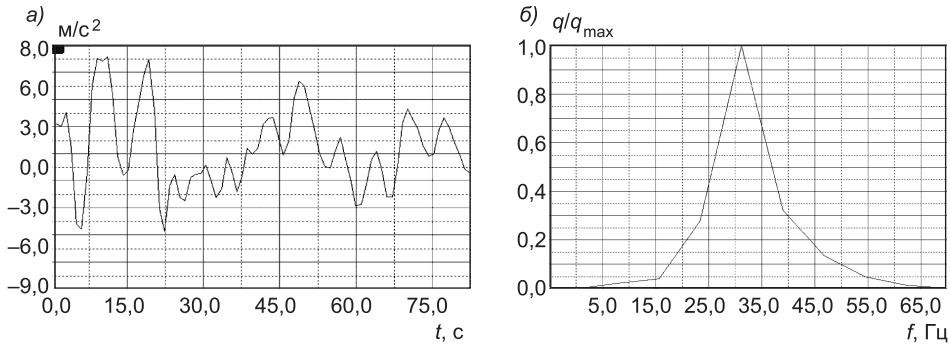


Рис. 11. Спектральные характеристики фермы
а — акселерограмма; б — спектр ускорения колебаний

Рассмотрим результаты обследования пространственной стержневой системы покрытия из древесины с узловыми сопряжениями на металлических зубчатых пластинах. Конструкции деревянных ферм находились в эксплуатации более четырех лет. Общий вид конструкций покрытия с установленными акселерометрами показан на рис. 10.

Для определения частотно-временных характеристик и технического состояния ферм в узлах были закреплены акселерометры. Колебания конструкций возбуждались ударом. Полученные акселерограммы и соответствующие спектры колебаний показаны на рис. 11, а. Из рис. 11, б видно, что конструкции исследуемых ферм работают в упругой стадии. Этому соответствует одиночный гладкий пик спектра мощности колебаний [3].

Результаты исследований деревянных ферм показали возможность использования динамических параметров для оценки технического состояния конструкций. Анализ частотно-временных характеристик позволяет оценить состояние конструкции при увеличении нагрузки и определить момент перехода работы из упругой стадии в упругопластическую и до разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копаница, Д.Г. Экспериментально-теоретические исследования треугольной деревянной фермы на металлических зубчатых пластинах [Текст] / Д.Г. Копаница, Л.И. Офицерова, Д.В. Лоскутова // Вестн. ТГАСУ. — 2008. — № 3. — С. 164–170.
2. Лоскутова, Д.В. Анализ разрушения деревянной фермы с соединением на металлических зубчатых пластинах [Текст] / Д.В. Лоскутова // Строительство : материалы, конструкции, технологии : материалы V Межрегион. науч.-техн. конф. — Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. — С. 22–27.
3. Лоскутова, Д.В. Частотно-временной анализ деревянной фермы с соединениями на МЗП [Текст] / Д.В. Лоскутова // Актуальные проблемы современного строительства : сб. материалов 60-й междунар. науч.-техн. конф. — СПб. : СПбГАСУ, 2007. — С. 114–118.

КОПАНИЦА Дмитрий Георгиевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Korpantsa@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет
КАПАРУЛИН Сергей Львович, канд. техн. наук, ст. науч. комп.; E-mail: skaparulin@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет

*ЛОСКУТОВА Диана Владимировна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: di-81@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 06.10.13

Kopanitsa Dmitry Georgievich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Kopanitsa@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Kaparulin Sergey Lvovich, candidate of technical sciences, senior scientist; E-mail: skaparulin@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Loskutova Diana Vladimirovna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: di-81@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

INVESTIGATION OF THE DEFORMED STATE OF WOODEN CONSTRUCTIONS BASED ON THE DYNAMIC PARAMETER MEASUREMENTS

In this paper we present the experimental results of the investigation of wooden skeleton constructions with metal timming joint points. The tests were made under a continuously increased load. The spectral parameters of the constructions were measured on each step of the load's increasing. It was proved that the power spectrum change corresponds to the mode of deformation of the constructions. This allows revealing the points of the constructions' transition from the elastic to the elastic-plastic state. The results of the research were applied to analyze the parameters of wooden space frames.

Key words: technical state, wooden space frames, power spectrum, natural-vibration frequency, elastic and elastic-plastic deformations, destruction.

REFERENCES

1. Kopanitsa, D.G. Experimental and theoretical study of triangle wooden frame with steel plates [Text] / D.G. Kopanitsa, L.I. Ofitserova, D.V. Loskutova // Letters of Tomsk State University of Architecture and Building. — 2008. — Vol. 3. — P. 164–170.
2. Loskutova, D.V. The analysis of a destruction of wooden frame with steel toothed plates [Text] / D.V. Loskutova // Building: materials, constructions, technologies in proceedings of the 5th regional conference. — Bratsk, 2007. — P. 22–27.
3. Loskutova, D.V. Frequency-time analysis of a wooden frame with steel plates [Text] / D.V. Loskutova // Proceedings of the 60th international conference «Problems of modern building engineering». — Saint-Petersburg, 2007. — P. 114–118.

УДК 624.011

С.В. ФЕДОСОВ, В.Г. КОТЛОВ, А.А. АКТУГАНОВ

ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЛАСТИНАХ

Рассматриваются индустриальные деревянные конструкции с применением металлических зубчатых пластин на примере исследований, проведенных в Поволжском государственном технологическом университете. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований и примеры использования деревянных конструкций в Республике Марий Эл и в других регионах Российской Федерации.

Ключевые слова: металлическая зубчатая пластина, индустриальные деревянные конструкции, прогнозирование и деформация соединений деревянных конструкций, долговечность.

Металлические зубчатые пластины (МЗП) предназначаются для использования в узловых и стыковых соединениях дощатых ферм, рам, каркасов, плит покрытий и панелей стен и других конструкций¹ (рис. 1).

Впервые в Советском Союзе МЗП были внедрены в Марийской АССР. Исследованием этих пластин и конструкций уже более 40 лет занимаются ученые Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ). За это время в ПГТУ (бывший Марийский политехнический институт) была создана методика расчета узловых соединений деревянных конструкций на МЗП, основанная на исследованиях таких авторов, как В.М. Коченов [1], П.А. Дмитриев², В.А. Цепаев [2].

В течение всего времени под руководством А.К. Наумова [3], В.Г. Котлова [4] с участием магистров, аспирантов были проведены мно-

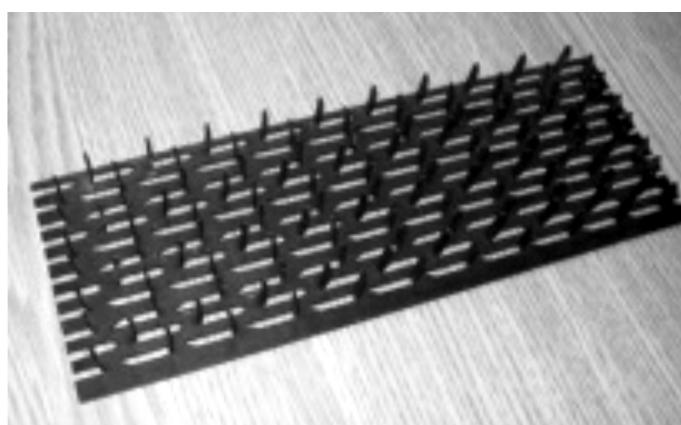


Рис. 1. Металлическая зубчатая пластина

¹ СНиП II-25-80 Деревянные конструкции / Минстрой России. М.: ГП ЦПП, 1996. 44 с.

² Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1975. 67 с.

гочисленные испытания узловых соединений на МЗП и моделей конструкций. Методика расчета основывается на работе нагеля зуба в древесине. Метод расчета соединений на МЗП по 1-й группе предельных состояний был предложен А.К. Наумовым [3] и в части расчета несущей способности одного нагеля-зуба целиком полагался на гипотезы, принятые в исследованиях В.М. Коченова [1].

Усовершенствовал методику расчета соединений на МЗП В.А. Цепаев [2], отклонив условное ограничение расчетной предельной деформации в исследованиях А.К. Наумова [3] и применив теорию линейной наследственности для прогнозирования деформаций соединений во времени. Прогноз прочности рассматриваемых соединений по методике В.А. Цепаева оказался достаточно точным. Результат же расчета осевых деформаций соединений, подверженных действию продольной силы, с применением теории линейной наследственности завышен по сравнению с результатами экспериментов до 55 %, а сама расчетная схема не допускала возможности образования шарнира пластичности при эксплуатационных нагрузках, т.е. величина изгибающего момента в основании зуба не контролировалась и изначально считалась меньше значения момента, соответствующего образованию пластического шарнира. Тем не менее, ограничение осевых деформаций в соединениях предлагалось осуществлять с помощью эмпирического коэффициента m_d , полученного из длительных испытаний ряда образцов.

К недостаткам предложенных способов определения и ограничения деформаций соединений можно отнести, с одной стороны, рассмотрение лишь симметричных соединений и исключение возможности внецентренной передачи усилия через зубчатую пластину, что вызывает кручение последней относительно соединяемых деревянных элементов. Это явление характерно для большинства узлов сквозных конструкций, и его игнорирование приводит к занижению прогибов конструкций. С другой стороны, введение в формулы несущей способности соединений на МЗП эмпирического коэффициента m_d , полученного в результате испытаний осесимметричных образцов на действие только продольной силы, не может ограничить линейные и угловые деформации в соединениях, вызванных внецентренным действием продольного усилия по отношению к центру тяжести пластины, но увеличивает затраты на зубчатые пластины.

Несколько позднее В.Г. Котловым [4] исследованы структурные деревянные конструкции с соединениями на МЗП. Опираясь на теоретические и экспериментальные изыскания А.К. Наумова [3] и В.А. Цепаева [2] и проведя серию экспериментов, он ввел понятие единичной эмпирической податливости $\bar{\Delta}_A$ соединений. На основании данной методики были разработаны экспериментальные деревянные конструкции, рекомендованные к внедрению на сельскохозяйственных объектах и жилых зданиях Республики Марий Эл (РМЭ). Это фермы — пролетом 9 м для сельскохозяйственных зданий, фермы для индивидуального блочно-модульного жилищного строительства, фермы для 27-квартирных жилых домов и т.д.



Рис. 2. Деревянные фермы с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах

Первые объекты в РМЭ с использованием ферм с узловыми соединениями на МЗП были построены в начале 1970-х гг. (птицефабрика совхоза «Сила» Горномарийского района (рис. 2), овцеводческий комплекс «Шойбулакский»). На сегодняшний день в РМЭ с использованием узловых соединений на МЗП построено более 100 объектов различного значения. В настоящее время до 80 % всех деревянных конструкций в развитых странах мира изготавливается с применением МЗП.

Для данных конструкций характерны индустриальность изготовления, снижение расхода древесины до 20 % и расхода стали до 30 % по сравнению с традиционными стропильными конструкциями, невысокий собственный вес, хорошая транспортабельность, простота монтажа без применения кранов большой грузоподъемности для целого ряда производственных, гражданских и сельскохозяйственных зданий³.

Особенно эффективны деревянные конструкции на МЗП для покрытий со сложными архитектурными формами (рис. 3). С их помощью можно воплотить все замыслы архитектора. Технология строительства из деревянных конструкций заводского изготовления выгодно отличается от других. Поскольку проектирование ведется с использованием современных компьютерных программ, точность при проектировании ± 1 мм, а при производстве ± 10 мм.

Соединения на МЗП долговечны, так как соединительные элементы защищают от коррозии цинкованием или гидроксилированным алюминированием. Все изготавливаемые конструкции прочны, рассчитываются на нагрузки с использованием современных программных средств, в соответствии с требованиями ТУ 5389-001-48314050-98 и СНиП II-25-80 «Конструкции деревянные. Нормы проектирования».

Индустриальные деревянные конструкции на МЗП эффективны при надстройке мансард реконструируемых домов. Легкость конструкций позволяет отработать особую технологию строительства без отселения жильцов, обеспечить их максимальную безопасность. Сорокалетний опыт эксплуатации таких конструкций в условиях РМЭ подтверждает

³ Котлов В.Г., Машинова С.Л. Перспективные направления развития деревянных конструкций. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002.

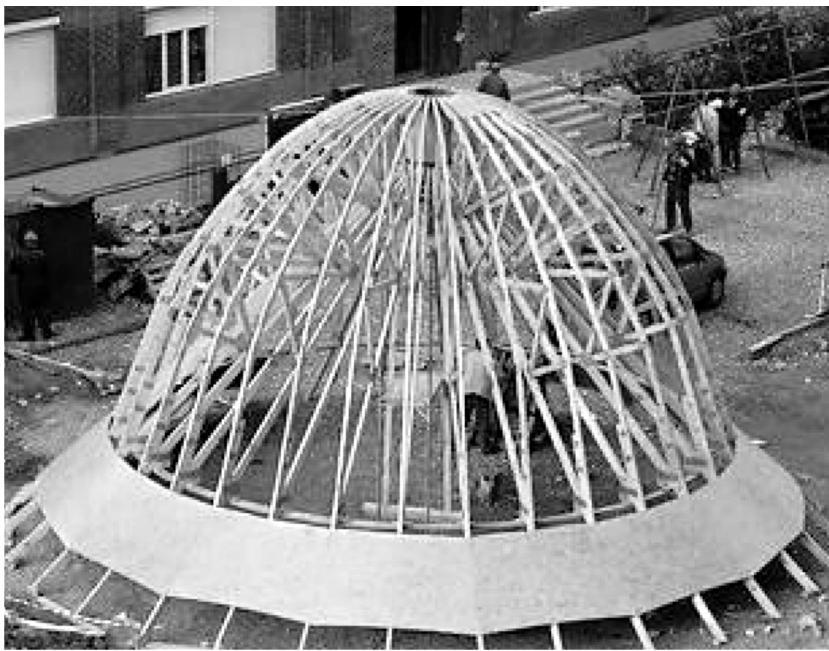


Рис. 3. Купол с использованием сегментных деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах

целесообразность применения деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП взамен трудоемких традиционных стропильных систем для устройства покрытий зданий при реконструкции и в новом строительстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коченов, В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций [Текст] / В.М. Коченов. — М. : Стройиздат, 1953. — 319 с.
2. Цепаев, В.А. Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах : дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.А. Цепаев. — М., 1982. — 201 с.
3. Наумов, А.К. Исследование соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах : дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.К. Наумов. — М., 1978. — 143 с.
4. Котлов, В.Г. Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах : дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.Г. Котлов. — Казань, 1991. — 215 с.

ФЕДОСОВ Сергей Викторович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ивановский государственный политехнический университет

КОТЛОВ Виталий Геннадьевич, канд. техн. наук, доц.

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

АКТУГАНОВ Александр Анатольевич, ст. препод.

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Получено 10.10.13

Fedosov Sergey Viktorovich, academician RAACS, doctor of technical sciences, professor, Ivanovo State Polytechnic University, Russia

Kotlov Vitalij Gennadievich, candidate of technical sciences, assistant professor, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia
Aktuganov Alexandr Anatolievich, senior lecturer, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

INDUSTRIAL WOOD CONSTRUCTIONS ON METAL GEAR PLATE

Examined industrial wood constructions using the metallic plate fasteners on example of researches in Volga State University of Technology. Showed the results of theoretical and experimental researches and examples of wooden structures in Mari El Republic and other regions of the Russian Federation.

Key words: metal gear plate, industrial wood constructions, predicting the deformation of joints and wooden structures, durability.

REFERENCES

1. Kochenov, V.M. Bearing ability of elements and connections of wooden designs [Text] / V.M. Kochenov. — M. : Stroyizdat, 1953. — 319 p.
 2. Tsepayev, V.A. Research of long durability and deformativnost of connections of elements of wooden designs on metal gear plates : Yew. Cand. Tech. Sci. [Text] / V.A. Tsepayev. — M., 1982. — 201 p.
 3. Naumov, A.K. Research of connections of elements of wooden designs on metal gear plates : Yew. Cand. Tech. Sci. [Text] / A.K. Naumov. — M., 1978. — 143 p.
 4. Kotlov, V.G. Coppers spatial designs from wooden farms with nodal connections on metal gear plates : Yew. Cand. Tech. Sci. [Text] / V.G. Kotlov. — Kazan, 1991. — 215 p.
-

УДК 624.011

В.В. СТОЯНОВ, И.В. ОКУНЬ

УСИЛЕНИЕ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО АРМИРОВАНИЯ

Рассмотрены известные методы армирования деревянных конструкций. Приводится новый способ — метод послойного армирования в новом решении как метод усиления при опорных частей балочных конструкций с целью повышения сдвиговой прочности.

Ключевые слова: деревянные балочные конструкции, метод послойного армирования, развитие трещин, усиление, сдвиговая прочность.

Весомую часть научных исследований деревянных конструкций представляют собой армированные деревянные конструкции. Существует много известных способов армирования деревянных конструкций: от армирования отдельными арматурными стержнями наиболее напряженных областей до армирования холстами или сетками каждого слоя клееной балки. Последний вариант представляет собой метод послойного армирования (МПА), разработанный на кафедре МД и ПК ОГАСА (патент на изобретение UA № 87286 «Деревянная балка». Опубл. в бюл. № 13 от 10.07.2003, Стоянов В.В. и др.). Высокая технологичность процесса выполнения МПА достигается, когда анодированная сетка (толщиной не более 2 мм) устанавливается в процессе набора kleedoштатого пакета. При этом послойное армирование может производиться различными армирующими, т.е. высокомодульными материалами, модуль упругости которых в

разы больше древесины. При данном способе открывается возможность получить эффективные двутавровые kleedoштатые балочные конструкции, так как усиливаются краевые зоны, и экономично перейти от полнотелого прямоугольного сечения к коробчатому или двутавровому (рис. 1).

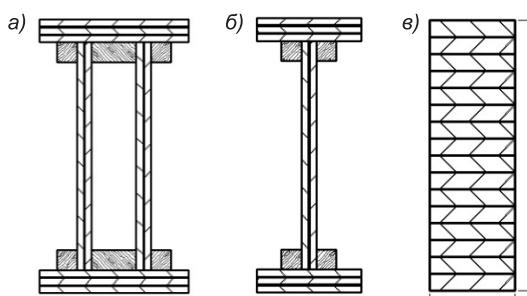


Рис. 1. Коробчатая (а), двутавровая (б) и прямоугольная (в) балки

МПА предотвращает развитие поперечных и наклонных трещин, позволяет регулировать их преимущественно в продольном направлении, т.е. в пределах одной доски, не пересекая высокомодульные материалы (рис. 2). Он может быть использован для усиления отдельных наиболее напряженных частей конструкции в зависимости от видов нагрузления и условий работы.

В данной работе особое внимание удалено опорным узлам балок, местам максимальных касательных напряжений τ_{\max} . Так, послойное армиро-

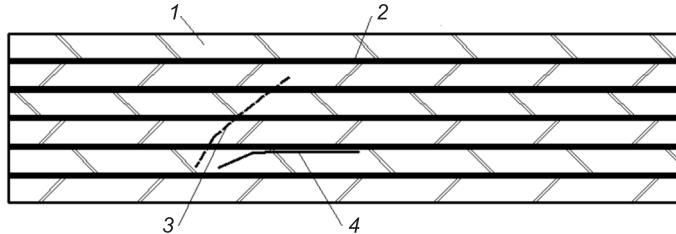


Рис. 2. Развитие трещин клеедощатой и армированной балки по длине конструкции

1 — древесина; 2 — высокомодульный материал; 3 — развитие трещины в kleеных балках без армирования; 4 — развитие трещины при послойном армировании

вание пакета досок в опорном узле при определенной конструктивной доработке позволит обойтись без трудоемкой установки наклонных стержней в опорной зоне.

В рамках научной работы была рассмотрена балка прямоугольного сечения с различными разработанными на основе МПА вариантами усиления опорных частей. В качестве армирующего материала использовалась стальная нержавеющая сетка. Новая предложенная схема армирования балки представляет собой устройство стальных накладок в приопорной зоне на боковой поверхности балки и по торцу балки по высоте (рис. 3, а, б). Также было предложено устройство армирующего материала внутри тела балки — вклейванием стальной нержавеющей сетки в пропил, устроенный в торцевой части балки (рис. 3, в).

На рис. 4 приведены эпюры касательных напряжений в приопорных частях балок. Численный расчет выбранных вариантов усиления балки показал целесообразность предложенных подходов. Эпюры по результатам численного расчета дают значение наибольших касательных напряжений (МПа) в обычной балке без армирования. Наименьшие напряжения и прогибы возникают в балке, усиленной вклейванием сетки в пропил в торце балки. Усиление балки в приопорной части путем устройства накладок по боковой поверхности и в торце также значительно уменьшает напряжение и деформативность конструкции, но в меньшей мере по сравнению с усилением посредством пропила.

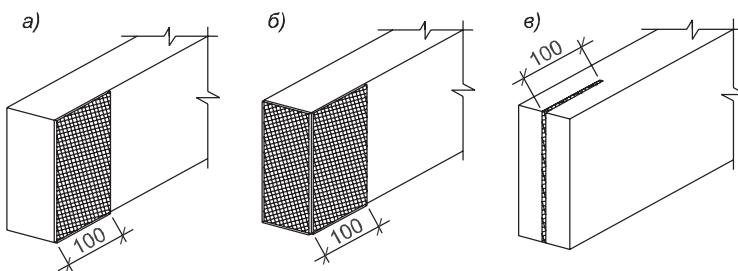


Рис. 3. Новые подходы к армированию проблемных участков балки (в данном примере приопорная часть балки)

а — устройство накладок по боковой поверхности; б — устройство накладок по боковой поверхности и по торцу; в — вклейвание армирующего материала в пропил в торце балки

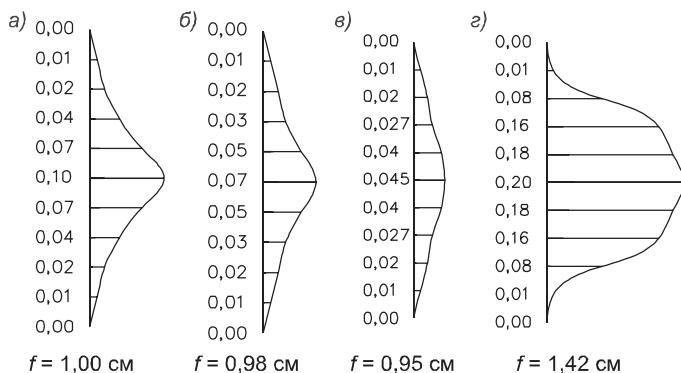


Рис. 4. Эпюры касательных напряжений и прогибы балки
а — с накладками по боковой поверхности; б — с накладками по боко-
вой поверхности и на торцах; в — с устройством армирующей вставки
внутри тела в пропиле; г — без усиления

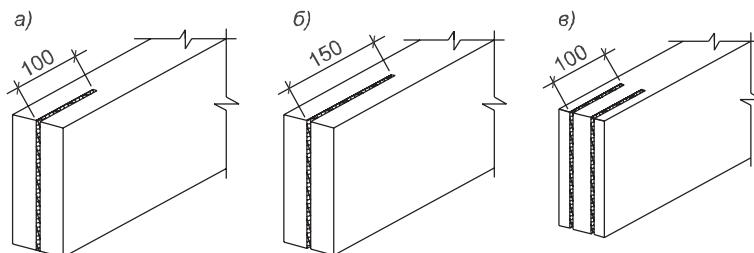


Рис. 5. Армирование при опорной части балки путем устройства про-
пила
а — длина пропила 100 мм; б — длина пропила 150 мм; в — два пропила по
ширине

На основании результатов численных расчетов усиление балки через устройство пропила было рассмотрено в нескольких вариантах. Во втором варианте увеличили длину пропила, и соответственно, армирования.

В третьем варианте по ширине сечения симметрично оси устроили два пропила (процент армирования при этом остался такой же, как в варианте 1) (рис. 5). Эпюры касательных напряжений и прогибы приведены на рис. 6.

Результаты численного расчета показали практически одинаковые напряжения и прогибы в балках с одним процентом армирования, но разным количеством пропилов. Наиболее выгодный вариант 2. В общем, рассмотренные новые подходы показали свою эффективность и являются интересной темой для дальнейших исследований.

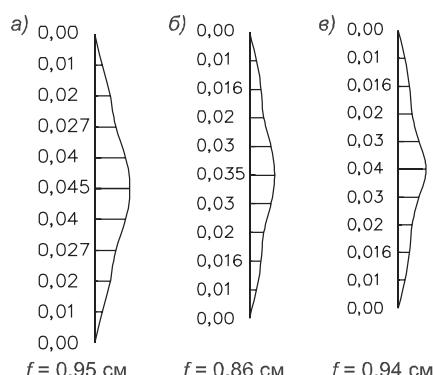


Рис. 6. Эпюры касательных напряжений
и прогибы балок
а — длина пропила 100 мм; б — длина про-
пила 150 мм; в — два пропила по ширине

СТОЯНОВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина
ОКУНЬ Ирина Викторовна, ассист.*

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина

Получено 10.10.13

Stoyanov Vladimir Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, Odessa State Academy of Construction and Architecture, Ukraine

Okun' Irina Victorovna, assistant, Odessa State Academy of Construction and Architecture, Ukraine

STRENGTHENING OF FRAME DESIGNS BY THE METHOD OF LAYER-BY-LAYER REINFORCING

Known methods of reinforcing of wooden designs are considered. The new way — a method of layer-by-layer reinforcing is given in the new decision as a method of strengthening of parts of frame designs at a support for the purpose of increase of shift durability.

Key words: wooden frame designs, method of layer-by-layer reinforcing, development of cracks, strengthening, shift durability.

УДК 624.011.045

**Г.И. ГРЕБЕНЮК, П.А. ДМИТРИЕВ, В.И. ЖАДАНОВ,
Г.Г. АСТАШЕНКОВ**

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОВМЕЩЕННЫХ РЕБРИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

Изложены основные положения конструирования и приведены примеры новых конструктивных решений совмещенных ребристых плит и панелей на основе клееной древесины. Представлен вариант инженерной методики расчета сжато-изогнутых панелей, разработанный с использованием энергетического метода. Даны постановка и алгоритм решения задачи оптимизации панелей, выполнен анализ результатов решения задач оптимизации ребристых панелей с различной обшивкой.

Ключевые слова: конструирование, расчет, сжато-изогнутая панель, энергетический метод, критерий оптимальности, варьируемые параметры, результаты оптимизации.

1. Основные положения и примеры конструирования. При проектировании зданий из конструкций на основе древесины особое место занимает выбор типа ограждающих конструкций покрытия и стен, так как они являются наиболее материалоемкими и существенно влияют на сметную стоимость зданий и сооружений. Исследованиями установлено, что, например, на изготовление несущих конструкций (арок, рам) древесины расходуется в 2–3 раза меньше, чем на изготовление ограждающих конструкций. Поэтому вполне закономерно, что вопросам совершенствования конструктивных решений ограждающих элементов уделяется большое внимание.

Развитие базы клеенных деревянных конструкций обусловило не только техническую возможность, но и экономическую целесообразность применения в зданиях и сооружениях различного назначения ребристых плит на деревянном каркасе с наибольшими габаритными размерами, допустимыми по технологическим параметрам и условиям транспортабельности. Наиболее ярко преимущества крупноразмерных ребристых конструкций проявляются при совмещении ими несущих и ограждающих функций, когда основные продольные ребра выполняют функции колонн или балок перекрытий, а обшивки, включенные в общую работу плиты вместе со вспомогательными элементами, служат ограждающими элементами зданий и сооружений.

Фактором, тормозящим применение совмещенных ребристых конструкций на основе древесины, является отставание конструкторских работ и научных исследований в направлении развития теории расчета подобных систем. Отсутствуют также данные по оптимальному проектированию совмещенных ребристых плит покрытий и панелей стен на деревянном каркасе, что не позволяет сократить расход материалов как на отдельные конструкции, так и на здание или сооружение в целом.

© Гребенюк Г.И., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Асташенков Г.Г., 2013

Для устранения вышеперечисленных недостатков авторами выполнена разработка серии новых конструктивных решений совмещенных ребристых плит покрытия и панелей стен из клееной древесины, которая базировалась на обязательном соблюдении следующих положений:

- максимальное уменьшение массы зданий;
- максимальная заводская готовность конструкций, поставляемых на строительную площадку;

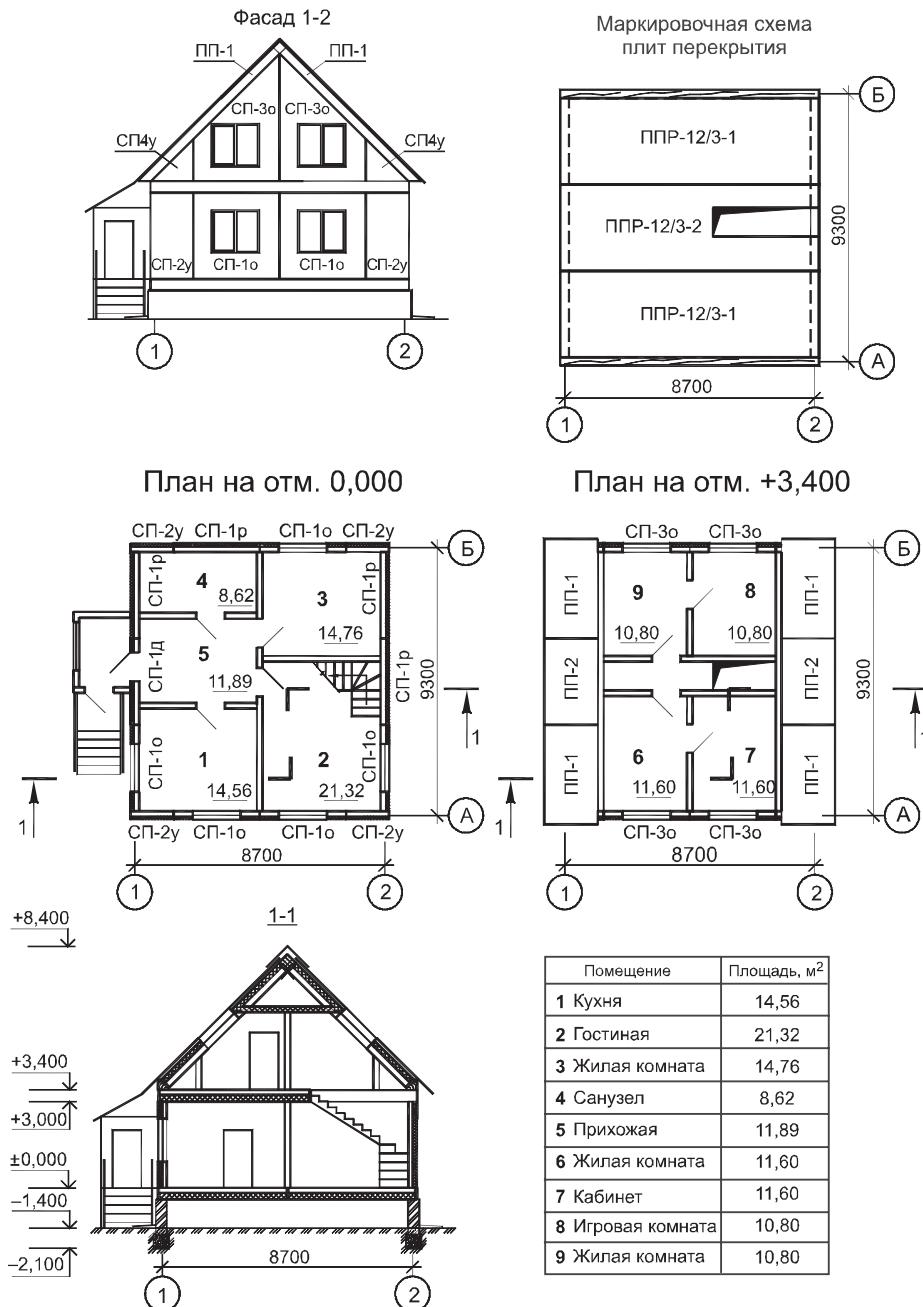


Рис. 1. Одноквартирный жилой дом общей площадью 150 м² с мансардным этажом из совмещенных ребристых плит

- высокие теплотехнические свойства и герметичность стыков при значительных температурных воздействиях;
- минимальная трудоемкость монтажа;
- возможность изготовления на существующих технологических линиях заводов kleеных деревянных конструкций.

Примеры разработанных конструкций показаны на рис. 1, 2.

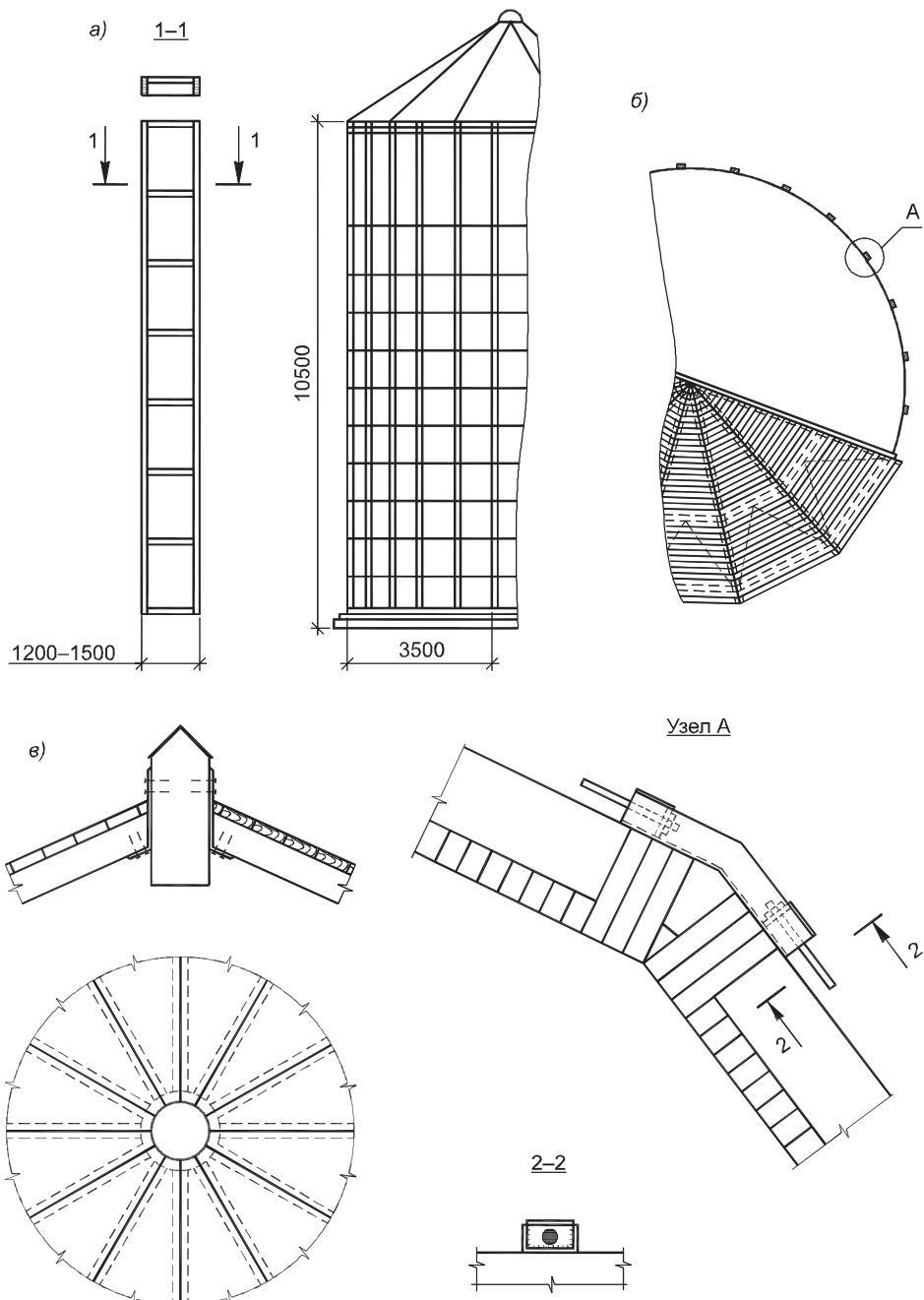


Рис. 2. Сборная башенная конструкция из дощатоклеенных плит П-образного сечения
а — внешний вид; б — вид сверху; в — верхний узел

2. Совершенствование методики расчета стеновых панелей.

Методики расчета изгибаемых ребристых плит покрытия и сжато-изогнутых стеновых панелей с использованием «балочной» расчетной схемы с достаточной полнотой изложены в [1, 2]. Применение «балочной» расчетной схемы снижает трудоемкость расчетов, но не позволяет учесть работу ребристой конструкции в поперечном направлении, что дает достаточно существенную погрешность в случае расчета сжато-изогнутых стеновых панелей, когда размеры панели по высоте и ширине соизмеримы. Ниже предлагается методика расчета, свободная от этого недостатка.

Пусть каким-либо образом закрепленная по контуру стеновая панель загружена по двум кромкам продольной сжимающей нагрузкой q_1 , а по боковой поверхности — поперечной нагрузкой q_2 (рис. 3).

При аппроксимации панели ортотропной пластинкой приведенные цилиндрические жесткости панели в ортогональных направлениях могут быть определены по формулам (1–11), представленным в [2]. По аналогии с приближенным решением при продольно-поперечном изгибе стержня будем строить приближенное решение для ортотропной пластинки при сжатии с изгибом, используя решение для поперечного изгиба:

$$w(x, y) = \frac{\bar{w}(x, y)}{1 - \frac{q_1}{q_{1\text{экп}}}}, \quad (1)$$

$q_{1\text{экп}}$

где $\bar{w}(x, y)$ — решение задачи поперечного изгиба ортотропной пластинки;

q_1 — интенсивность заданной сжимающей нагрузки;

$q_{1\text{экп}}$ — критическое Эйлерово значение сжимающей нагрузки, для определения которого используем энергетический метод.

Величины внутренних усилий при сжатии с изгибом ортотропной пластинки будем определять по формулам, аналогичным (1).

Решение $\bar{w}(x, y)$ задачи поперечного изгиба ортотропной пластинки для некоторых частных случаев получено энергетическим методом.

В случае 1 (шарнирное опирание панели по граням $x = 0$, $x = a_n$ и свободные от закрепления грани $y = 0$, $y = b_n$ (рис. 4, а)) аппроксимация функции прогибов принята в виде:

$$\bar{w}(x, y) = a_1 \sin \frac{\pi x}{a_n} + a_2 \sin \frac{\pi x}{a_n} \sin \frac{\pi y}{b_n}, \quad (2)$$

где a_1 , a_2 — коэффициенты аппроксимации.

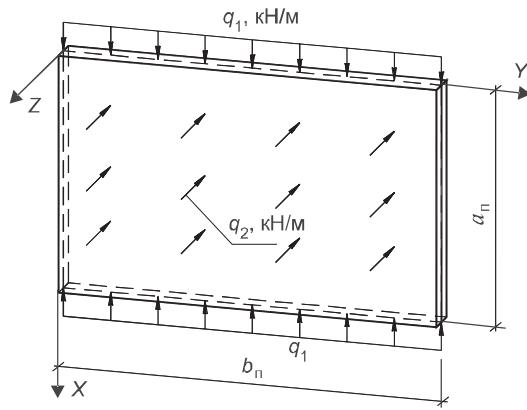


Рис. 3. Схема нагружения сжато-изгибающейся панели

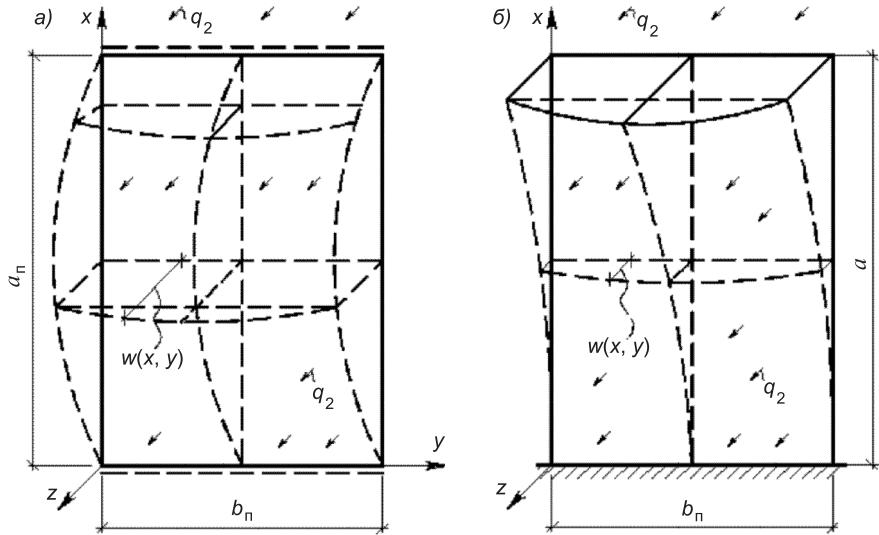


Рис. 4. Схемы деформирования панелей

а — случай 1; б — случай 2

В случае 2 (неподвижное защемление панели по нижней грани $x = 0$ и свободные от закрепления остальные грани (рис. 4, б)) функция прогибов принята в виде:

$$\bar{w}(x, y) = a_1 \left(\frac{x^4}{24a_n^4} - \frac{x^3}{6a_n^3} + \frac{x^2}{4a_n^2} \right) + a_2 \left(\frac{x^4}{24a_n^4} - \frac{x^3}{6a_n^3} + \frac{x^2}{4a_n^2} \right) \sin \frac{\pi y}{b_n}. \quad (3)$$

Пусть $\mathcal{E} = U - \Pi$ — полная энергия системы, где U — потенциальная энергия упругой деформации пластиинки; Π — изменение потенциала внешних сил.

Для ортотропной пластиинки, пренебрегая влиянием сдвигов, получим:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{b_n} \int_0^{a_n} \left[D_{1\text{пп}} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial x^2} + v_{21\text{пп}} \frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial x^2} + D_{2\text{пп}} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial y^2} + v_{12\text{пп}} \frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial x^2} \right) \frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial y^2} + 4D_k \left(\frac{\partial^2 \bar{w}(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy. \quad (4)$$

Изменение потенциала внешней нагрузки на заданных перемещениях равно

$$\Pi = \int_0^{b_n} \int_0^{a_n} \bar{w}(x, y) q_2(x, y) dx dy. \quad (5)$$

Подставляя в случае 1 выражение (2) в (4), (5), после преобразований получим:

$$U = a_1^2 k_1 + a_1 a_2 k_2 + a_2^2 k_3; \Pi = q_2 \left(a_1 \frac{2a_n b_n}{\pi} + a_2 \frac{4a_n b_n}{\pi^2} \right), \quad (6)$$

где k_1, k_2, k_3 — выражения, зависящие от цилиндрических жесткостей и размеров a_n, b_n ортотропной пластиинки.

С учетом (6), условия стационарности \mathcal{E} записываются в виде:

$$2k_1a_1 + k_2a_2 - \frac{2q_2a_n b_n}{\pi} = 0, \quad (7)$$

$$k_2a_1 + 2k_3a_2 - \frac{4q_2a_n b_n}{\pi^2} = 0. \quad (8)$$

Решая систему (7), (8), получим:

$$a_2 = \frac{q_2 \left(\frac{4a_n b_n}{\pi^2} - \frac{a_n b_n}{\pi} \frac{k_2}{k_1} \right)}{2k_3 - \frac{(k_2)^2}{2k_1}}; \quad a_1 = \frac{\frac{4q_2 a_n b_n}{\pi^2} - 2k_3 a^2}{k_2}. \quad (9)$$

Аналогично могут быть получены коэффициенты аппроксимации для случая 2.

Для получения значения $q_{1\text{экп}}$, входящего в соотношение (1), также использован энергетический метод. При этом формы потери устойчивости для случаев 1, 2 задавались в виде соотношений (2), (3), что позволило использовать ранее найденные соотношения для U . Работа сжимающих внешних сил получена при распределении нагрузки q_1 по основным ребрам в направлении x :

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_{\text{оп1}}} N_{pi} \int_0^{a_n} \left(\frac{\partial w}{\partial x}(x, y_i) \right)^2 dx, \quad (10)$$

где N_{pi} — нагрузка на i -е ребро;

$m_{\text{оп1}}$ — количество основных ребер в направлении 1;

y_i — координата (по оси y) i -го основного ребра.

При равномерной нагрузке q_1 и равномерной расстановке ребер:

$$N_{p1} = N_{pm_{\text{оп1}}} = \frac{1}{2} \frac{q_1 b_n}{m_{\text{оп1}} - 1}; \quad N_{p2} = N_{p3} = \dots = N_{pm_{\text{оп1}}-1} = \frac{q_1 b_n}{m_{\text{оп1}} - 1}, \quad (11)$$

$$y_i = \frac{b_n}{m_{\text{оп1}} - 1} (i - 1), \quad i = 1, \dots, m_{\text{оп1}}.$$

Для случая 1 придем к соотношению:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = U - W &= a_1^2 k_1 + a_1 a_2 k_2 + a_2^2 k_3 - \\ &- \frac{1}{4} \frac{\pi^2}{a_n} \sum_{i=1}^{m_{\text{оп1}}} N_{pi} \left(a_1^2 + 2a_1 a_2 \sin \frac{\pi y_i}{b_n} + a_2^2 \sin^2 \frac{\pi y_i}{b_n} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

С использованием условий стационарности (12) получим уравнение устойчивости для определения $q_{1\text{экп}}$

$$\begin{vmatrix} \left(2k_1 - \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{a_n} \sum_{i=1}^{m_{\text{оп1}}} N_{pi} \right) & \left(k_2 - \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{a_n} \sum_{i=1}^{m_{\text{оп1}}} N_{pi} \sin \frac{\pi y_i}{b_n} \right) \\ \left(k_2 - \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{a_n} \sum_{i=1}^{m_{\text{оп1}}} N_{pi} \sin \frac{\pi y_i}{b_n} \right) & \left(2k_3 - \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{a_n} \sum_{i=1}^{m_{\text{оп1}}} N_{pi} \sin^2 \frac{\pi y_i}{b_n} \right) \end{vmatrix} = 0, \quad (13)$$

а далее, после определения $q_{1\text{экп}}$, по (1) находится функция прогибов $w(x, y)$. Усилия в сечениях, связанные с продольно-поперечным изгибом панели, устанавливаются через усилия в изгибающей ортотропной пластинке по аналогичным зависимостям.

3. Оптимизация параметров сжато-изгибаемых панелей.

Представленная выше методика расчета ребристой панели была использована при решении задач оптимизации панелей. За «базовый» вариант сжато-изгибающей конструкции принята панель с размером в плане 3,0×6,0 м с ребрами прямоугольного поперечного сечения, рассчитанная на действие поперечной нагрузки интенсивностью 0,4 кН/м² и погонной продольной нагрузки величиной 14 кН/м (табл. 1). Задача оптимизации

Таблица 1
Основные параметры «базового» варианта панели (3,0×6,0 м)

Размеры сечений элементов, мм					Количество	
основные ребра		поперечные ребра		толщина фанеры	основные ребра	поперечные ребра
b_1	h_1	b_2	h_2	δ_ϕ	m_{op1}	m_{op2}
70	300	50	300	15	3	4

ребристых панелей на основе древесины и древесных материалов ставилась как задача нелинейного математического программирования [1]. В качестве критерия оптимальности конструкции принят минимум затрат на основные материалы (древесина, фанера) в расчете на 1 м² перекрываемой площади, при этом в целевой функции учитываются условные затраты:

$$f(X) = \frac{C_{dp} V_{dp}(X) + C_\phi V_\phi(X)}{a_n b_n}, \quad (14)$$

где X — вектор переменных;

$V_{dp}(X), V_\phi(X)$ — объемы древесины и фанеры в изготовленной панели;

a_n, b_n — пролет и ширина панели соответственно;

C_{dp}, C_ϕ — «весовые» коэффициенты древесины и фанеры.

Разработанный и программно реализованный алгоритм оптимизации сжато-изогнутых панелей соответствует следующей трехуровневой системе:

$$\min f(X) = \min_{X^{(3)}} (\min_{X^{(2)}} (\min_{X^{(1)}} f(X^{(1)}, \bar{X}^{(2)}, \bar{X}^{(3)})), \quad X \in G(X)), \quad (15)$$

где $X^{(1)} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$ — вектор переменных параметров первого уровня (ширина и высота сечений основных ребер, толщина обшивки и ширина сечений вспомогательных ребер);

$X^{(2)} = \begin{cases} X_5 \\ X_6 \end{cases}$ — переменные второго уровня (число основных и вспомогательных ребер);

$X^{(3)} = \begin{cases} X_7 \\ X_8 \end{cases}$ — переменные третьего уровня (размеры панели в плане).

Учитывались ограничения по максимальным нормальным и касательным напряжениям в ребрах и обшивке, ограничение по максимальному прогибу и конструктивные ограничения. Надчерки над обозначением групп переменных ($\bar{X}^{(2)}$, $\bar{X}^{(3)}$) означают, что эти переменные фиксированы при решении задачи оптимизации на первом уровне.

При решении задач оптимизации на втором и третьем уровнях ограничения учитывались косвенно (через решение вложенных задач первого уровня), и для получения оптимального решения достаточно аппроксимировать функцию оптимального решения по переменным соответствующего уровня. В разработанном алгоритме, в силу дискретного характера переменных $X_5 - X_8$ и сравнительно небольшого числа комбинаций, для получения оптимального решения использовался метод перебора.

Так как функциональные зависимости $M_{x \max}(X)$, $M_{y \max}(X)$, $Q_{x \max}(X)$ и других параметров состояния панели не известны, то при поиске оптимального решения на первом уровне были построены аппроксимации, соответствующие разложению в неполный ряд Тейлора:

$$P(X) \approx P(X^0) + \nabla P(X^0)^T(X - X^0) + \frac{1}{2}(X - X^0)^T \nabla \nabla P(X^0)(X - X^0), \quad (16)$$

где $P(X)$ — рассматриваемый параметр состояния;

$\nabla P(X^0)$ — вектор градиента;

$\nabla \nabla P(X^0)$ — диагональная матрица вторых производных;

X^0 — начальная точка поиска.

Для решения условно-экстремальных задач первого уровня использовался метод подвижного внешнего штрафа [3].

В табл. 2 приведены результаты решения сформулированной задачи оптимизации панели с фанерной и дощатой обшивками при $q_1 = 14 \text{ кН/м}$, $q_2 = 0,4 \text{ кН/м}^2$, $[w] = \frac{1}{250}a_n$, $C_{\text{др}} = 1,6$, $C_{\text{об}} = 2,5$. Анализируя результаты вычислений, приведенные в табл. 2, можно отметить следующее.

Таблица 2
Результаты решения глобальной задачи оптимизации панелей

Оптимальные параметры	Фанерная обшивка панели		Дощатая обшивка панели	
	шарнирно опертой	защемленной	шарнирно опертой	защемленной
X_1^* , м	0,034	0,034	0,034	0,034
X_2^* , м	0,08421	0,1797	0,08718	0,165
X_3^* , м	0,008	0,008	0,016	0,016
X_4^* , м	0,034	0,034	0,034	0,034
X_5^*	2,0	2,0	2,0	2,0
X_6^*	2,0	2,0	2,0	2,0
X_7^* , м	3,0	3,0	3,0	3,0
X_8^* , м	2,5	2,5	3,0	3,0
$f(X^*)$	0,02672	0,03433	0,01995	0,02348

В случае фанерной обшивки наиболее экономичной (в смысле затрат на единицу площади панели, соответствующих целевой функции (14)) является панель с размерами: $a_n = 3$ м, $b_n = 2,5$ м. При этом параметры ширины сечения основных ребер и толщины обшивки выходят на нижнюю границу. Оптимальным количеством ребер наиболее экономичной панели является два ребра. Соотношение высоты и ширины основного ребра защемленной панели в оптимальном проекте также выходит на границу конструктивного ограничения.

Результаты решения глобальных задач оптимизации панелей с дощатой обшивкой несколько отличаются от результатов, полученных при решении задач оптимизации панелей с фанерной обшивкой. В частности, наиболее экономичным проектом шарнирно опертой панели при «весовых» коэффициентах $C_p = C_{ob} = 1,0$ является панель с размерами $a_n = 3$ м, $b_n = 3$ м. Сравнивая полученный оптимальный и представленный в табл. 1 «базовый» проекты (случай 1) по выбранному критерию оптимальности, отметим, что оптимальный проект с фанерной обшивкой снижает удельные затраты на 69 %. Это говорит о существенном перерасходе материала в «базовом» проекте. Оптимальный проект с дощатой обшивкой требует больших затрат древесины, но по выбранному критерию оптимальности снижает удельные затраты по сравнению с проектом с фанерной обшивкой на 21,6 %.

В заключение данного анализа следует отметить, что применение «балочной» расчетной модели, принятой в [1, 2], предпочтительно в случае $a_n >> b_n$ (что характерно для ребристых плит покрытий и верхних поясов пространственных ферм). Использование при решении задач оптимизации рассмотренной модели расчета скжато-изогнутой анизотропной пластины позволяет уточнить оптимальный проект и более обоснованно назначать размеры сечений поперечных ребер при $a_n \approx b_n$, что соответствует ребристым стеновым панелям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гребенюк, Г.И. Выявление оптимальных параметров крупноразмерных ребристых плит на основе древесины. Сообщение 1 [Текст] / Г.И. Гребенюк, Е.В. Яньков, А.В. Ажермачев, В.И. Жаданов // Изв. вузов. Строительство. — 2004. — № 9. — С. 4–10.
2. Жаданов, В.И. Совершенствование алгоритмов расчета нелинейно-деформируемых ребристых скжато-изгибающихся панелей на основе древесины. Сообщение 1 [Текст] / В.И. Жаданов, Е.В. Тисевич, Г.И. Гребенюк // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 8. — С. 87–93.
3. Гребенюк, Г.И. Метод подвижного внешнего штрафа в задачах оптимального проектирования конструкций [Текст] / Г.И. Гребенюк, В.В. Безделев // Вопросы динамики и прочности в машиностроении : межвуз. сб. — Омск : ОмПИ, 1983. — С. 34–40.

ГРЕБЕНЮК Григорий Иванович, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ДМИТРИЕВ Петр Андреевич, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ЖАДАНОВ Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф.

Оренбургский государственный университет

АСТАШЕНКОВ Геннадий Григорьевич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено 10.10.13

Grebnyuk Grigoriy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Dmitriev Petr Andreevich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Zhadanov Viktor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Orenburg State University, Russia

Astashenkov Gennady Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

DESIGNING, CALCULATION AND OPTIMIZATION OF THE COMBINED RIDGE DESIGNS ON THE BASIS OF WOOD

Substantive provisions of designing are stated and examples of new constructive decisions of the combined ridge plates and panels on a basis of wood are resulted. The variant of an engineering design procedure of the compressed-bent panels, developed with use of a power method is presented. Statement and algorithm of the decision of a problem of optimization of panels are stated; the analysis of results of the decision of problems of optimization of ridge panels with a various covering is made.

Key words: designing, the calculation, compressed-bent panel, a power method, criterion of the optimality, varied parametres, results of optimization.

REFERENCES

1. Grebenyuk, G.I. Reveal of optimal paramerts large-size ribbed plates based on wood. Message 1 [Text] / G.I. Grebenjuk, E.V. Jankov, A.V. Azhermachev, V.I. Zhadanov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2004. — N 9. — P. 4–10.
2. Zhadanov, V.I. Improvement of algorithms to calculate nonlinearly-strained and compressed-bend wood-based ribbed panels. Message 1 [Text] / V.I. Zhadanov, E.V. Tisevich, G.I. Grebenyuk // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 8. — P. 87–93.
3. Grebenyuk, G.I. A method of the mobile external penalty in problems of optimum designing of designs [Text] / G.I. Grebenyuk, V.V. Bezdelev // Questions of dynamics and durability in mechanical engineering: interhigh school collec. — Omsk : OmPI, 1983. — P. 34–40.