

На правах рукописи



Каменев Иван Владимирович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ИЗ ПЕРЕКРЕСТНО-КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Черных Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: **Сабитов Линар Салихзанович**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Казанский (Приволжский) федеральный
университет», институт дизайна и пространственных
искусств, кафедра конструктивно-дизайнерского
проектирования, профессор;

Деордиев Сергей Владимирович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
г. Красноярск, кафедра строительных конструкций
и управляемых систем, заведующий;

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени
М.В. Ломоносова», г. Архангельск.**

Защита состоится 4 июня 2024 года в 11.00 на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса). Тел./ Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kamenev-ivan-vladimirovich>

Автореферат разослан «18» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Древесина является единственным возобновляемым конструкционным материалом, применяющимся в строительстве на протяжении тысячелетий. Современная тенденция «зеленого строительства» способствует ускорению развития деревянного строительства, в том числе и появлению новых конструкционных материалов из древесины, по своим параметрам близким или даже превосходящим некоторые традиционные материалы. Так, древесина перекрестно клееная (ДПК, от *англ.* CLT, cross-laminated timber), к основным преимуществам которой можно отнести низкую теплопроводность, высокое шумопоглощение, легкий вес и высокую прочность, уже применяется при возведении жилых и общественных зданий, в том числе и многоэтажных. При этом, благодаря своим характеристикам, ДПК позволяет создавать тонкие и при этом прочные покрытия, в том числе и криволинейные, такие как оболочки. Подобные конструкции уже появились в Японии, Швейцарии и Германии.

Несмотря на растущую популярность, на текущий момент отсутствуют методики расчета конструкций из этого материала, особенно это касается криволинейных элементов. Таким образом, разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек из ДПК, исследование прочности и устойчивости, а также рекомендации по их проектированию являются актуальными задачами.

Степень разработанности темы исследования.

Большой вклад в исследование работы ДПК-панелей внесли работы Лабудина Б. В., Туркова А. В., Погорельцева А. А., Турковского С. Б., Knippers J., Aicher S. и других. Wood D, Bechert S. и Knippers J рассматривают применение ДПК для проектирования криволинейных конструкций, в том числе оболочек двоякой кривизны из трехслойных сегментов, а также изогнутых панели из ДПК для сооружения покрытий зданий и сооружений. В работах Maderebner R. и Kraler A. экспериментально исследуется прочность 5-слойных и 9-слойных криволинейных панелей из ДПК.

Scheder-Bieschin L., Claus M. и Aicher S, а также специалисты японского центра жилищного строительства предлагают различные способы соединения сегментов цилиндрических оболочек.

В теорию оболочек большой вклад внесли работы Вольмира А. С., Гольденвейзера А. Л., Лурье А. И., Муштары Х. М., Новожилова В. В.,

Товстика П. Е., Черных К. Ф. и многих других. Развитие нелинейной теории оболочек положили Власов В. З., Петров В. В., Григолюк Э. И., Милейковский И.Е., Трушин С.И., Карпов В. В., Крысько В. А., Михайлов Б. К., Пятикрестовский К. П.

В работах Бакулина В. Н., Головой Т. А., Карпова В. В., Кондратьевой Л. Н. исследуется НДС многослойных оболочечных конструкций. В ряде работ немецких авторов, таких как Bechert S., Knippres J. и Scheder-Bieschin L., рассматривается проектирование оболочек двоякой кривизны из трехслойных сегментов, а также изогнутые панели из ДПК для сооружения покрытий зданий и сооружений.

Цель исследования – экспериментально-теоретическое обоснование применения ДПК в качестве строительного материала для цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины с развитием методов расчета НДС многослойных цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины из ДПК при статических воздействиях.

Задачи исследования:

- анализ состояния вопроса в области НДС оболочечных конструкций;
- разработка математической модели напряженно-деформированного состояния многослойных ортотропных цилиндрических оболочек из перекрестно-клееной древесины с учетом геометрической нелинейности, наличия ребер жесткости и вырезов произвольной формы для статического нагружения; разработка программного продукта, реализующего алгоритм исследования разработанной математической модели;
- исследование и анализ влияния числа слоев и ориентации волокон древесины в них на устойчивость и прочность цилиндрических оболочек из ДПК при помощи вычислительного эксперимента;
- экспериментальное исследование прочности и устойчивости элемента сегментной цилиндрической оболочки из ДПК под воздействием статического нагружения;
- разработка рекомендаций по проектированию и расчету НДС цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины, выполненных из ДПК.

Объект исследования – тонкостенные многослойные цилиндрические оболочки из перекрестно-клееной древесины ступенчато-переменной толщины с шарнирно-неподвижным закреплением контура, находящиеся под воздействием вертикально-ориентированной равномерно-распределенной статической нагрузки.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние многослойных цилиндрических оболочек из ДПК ступенчато-переменной толщины при статическом нагружении.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, пункт 1 «Построение и развитие теории, аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений» и пункт 3 «Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

Научная новизна заключается в том, что:

- разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния ортотропных многослойных цилиндрических оболочек, ослабленных вырезами произвольной формы и подкрепленных ребрами с учетом их сдвиговой и крутильной жесткости, учитывающая геометрическую нелинейность и поперечные сдвиги, для конструкций под воздействием статической нагрузки;

- предложен метод расчета цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины из ДПК, основанный на применении разработанной математической модели и совместном использовании критериев прочности Ашкенази Е. К. и максимальных напряжений;

- установлены зависимости устойчивости и прочности цилиндрической оболочки из ДПК от числа слоев и ориентации волокон древесины, подтвержденные экспериментальными данными несущей способности элемента сегментной цилиндрической оболочки из ДПК при статическом нагружении на изгиб.

Теоретическая значимость состоит в развитии методов расчета цилиндрических оболочек из ДПК, заключающемся в построении уточненной модели исследования НДС таких конструкций с учетом послойного анализа прочности оболочек, дискретного влияния вырезов и сдвиговой и крутильной жесткости ребер, а также геометрической нелинейности.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработан метод расчета несущей способности цилиндрических оболочек из ДПК ступенчато-переменной толщины;

– разработана программа для ЭВМ «PerfStiffShell: Calculation of perforated and stiffened shells», позволяющая проводить комплексные исследования несущей способности многослойных цилиндрических оболочек из ортотропных материалов, в том числе и из перекрестно-клееной древесины (свидетельство о регистрации в реестре программ для ЭВМ № 2021613035);

– предложены рекомендации по проектированию и расчету НДС цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины, выполненных из ДПК.

Методология и методы исследования.

Метод Ритца, который позволяет свести задачу поиска минимума функционала к решению системы нелинейных алгебраических уравнений.

Метод Ньютона, который для решения нелинейных систем алгебраических уравнений.

Исследования отечественных и зарубежных ученых в области строительной механики, программирования, математики.

Экспериментальные исследования.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель деформирования многослойных ортотропных цилиндрических оболочек в виде функционала полной потенциальной энергии деформации конструкции, позволяющая учитывать ортотропию материала, геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, введение ребер и вырезов;

– метод исследования НДС цилиндрических панелей из ДПК ступенчато-переменной толщины;

– зависимости устойчивости и прочности цилиндрических оболочек из ДПК от числа слоев и ориентации волокон древесины;

– результаты экспериментального исследования элемента сегментной оболочки, находящейся под воздействием статического нагружения.

Степень достоверности результатов обеспечивается использованием апробированных методов вычислительной математики и строительной механики, а также гипотезах теории оболочек; сравнении результатов расчетов тестовых задач с результатами, полученными при использовании метода конечных элементов в программном комплексе «Лира-САПР»; результатами натурного эксперимента; подтверждена публикациями в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, а также в издании, индексируемом в международной базе научного цитирования Scopus.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях:

– 12-я Международная конференция «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», СПбГАСУ, 25-26 ноября 2020 г.;

– 11-я Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 22-23 апреля 2021 г.;

– LXXV Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», СПбГАСУ, 11-14 октября 2022 г.;

– Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства», СПбГАСУ, 10-13 апреля 2023 г.;

– XII Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», СПбГАСУ, 20-22 апреля 2023 г.

Личный вклад соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в анализе разработанности темы исследования; разработке математической модели напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины из перекрестно-клееной древесины при шарнирно-неподвижном закреплении контура для статического нагружения; разработке метода оценки напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины из перекрестно-клееной древесины при статическом нагружении; анализе влияния числа слоев и ориентации волокон древесины в цилиндрических оболочках из перекрестно-клееной древесины на их несущую способность; получении и анализе результатов экспериментального исследования фрагмента сегментной цилиндрической оболочки из перекрестно-клееной древесины, находящейся под воздействием статического нагружения; разработке рекомендаций по проектированию цилиндрических оболочек из перекрестно-клееной древесины.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 11 печатных работах общим объемом 5,21 п.л., в том числе 6 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ, 1 работа опубликована в издании, индексируемом международной системой цитирования Scopus.

Внедрение научных результатов диссертации:

Результаты исследований внедрены в практической области в проектную деятельность АО «НПП «Радар ММС» (г. Санкт-Петербург) при разработке и изготовлении испытательных поворотных стендов для проверки и настройки магнитометрических систем и приемо-передающих комплексов, о чем получен соответствующий Акт о внедрении.

Теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, используются кафедрой металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» (г. Санкт-Петербург) в спецкурсе по проектированию металлических и деревянных конструкций (для обучающихся по программе подготовки по специальностям 08.03.01 «Строительство» и 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»), о чем получен соответствующий Акт о внедрении.

Структура и объем диссертационной работы. Работа включает в себя введение, 4 главы с выводами по каждой из них, заключение, список литературы и приложение. Объем диссертационного исследования составляет 203 страницы машинописного текста, включая 82 рисунка и 17 таблиц. Список литературы состоит из 111 источников, в том числе 37 – на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована и обоснована актуальность изучения и применения цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины из перекрестно-клееной древесины, раскрыта степень разработанности проблемы, поставлены цель и задачи исследования, указаны научная новизна, методология, а также теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе «Анализ состояния вопроса и задачи исследований цилиндрических оболочек из ДПК» приведена общая характеристика древесины перекрестно-клееной как конструкционного материала, проведен анализ литературных источников по развитию теории пластин и оболочек, предпосылок и практики применения древесины перекрестно-клееной в качестве строительного материала для цилиндрических оболочек покрытия. Выявлена проблема, состоящая в отсутствии метода расчета при проектировании цилиндрических оболочек из ДПК.

Во второй главе приводятся основные допущения и гипотезы, применяемые в работе, предложена и теоретически обоснована математическая модель напряженно-деформированного состояния многослойных цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины. Предложен метод анализа НДС многослойных цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины, позволяющий определять местные и общие критические нагрузки потери устойчивости, а также критические нагрузки потери прочности в каждом слое используемого материала.

Рассматривается математическая модель НДС многослойных цилиндрических пологих оболочек из перекрестно-клееной древесины. Закрепление контура – шарнирно-неподвижное, нагрузка q – вертикально ориентированная (рисунок 1) Срединная поверхность принята за координатную, ось криволинейных координат y направлена вдоль главной кривизны оболочки, ось x – вдоль прямой стороны конструкции, ось z – по нормали к срединной поверхности. В рамках исследования принимаются следующие допущения:

- 1) теория Тимошенко-Рейснера;
- 2) пренебрегают величинами порядка малости большего, чем $\max\{h/R, h/\min(a, b)\}$. Здесь R – главный радиус кривизны оболочки, h – толщина, a и b – линейные размеры оболочки;
- 3) возникающие в оболочке напряжения, направленные перпендикулярно срединной поверхности, считаются пренебрежимо малыми в сравнении с другими напряжениями;
- 4) физические соотношения имеют линейную зависимость.

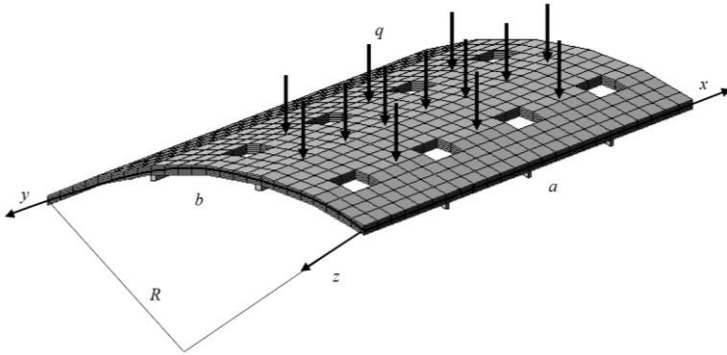


Рисунок 1. Схематичное изображение многослойной цилиндрической оболочки из перекрестно-клееной древесины ступенчато-переменной толщины

С учетом принятых допущений физические соотношения для ортотропной тонкостенной оболочки в линейно-упругой постановке будут иметь вид (1):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E_1} \sigma_x - \frac{\mu_{12}}{E_2} \sigma_y; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E_2} \sigma_y - \frac{\mu_{21}}{E_1} \sigma_x; \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{23}} \tau_{yz}; \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{G_{13}} \tau_{xz}; \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{12}} \tau_{xy}.\end{aligned}\tag{1}$$

Геометрически соотношения с учетом геометрической нелинейности запишутся в виде (2):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x} - k_x W + \frac{1}{2} \theta_1^2; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} - k_y W + \frac{1}{2} \theta_2^2; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \theta_1 \theta_2; \\ \theta_1 &= -\left(\frac{\partial W}{\partial x} + k_x U \right), \theta_2 = -\left(\frac{\partial W}{\partial y} + k_y V \right).\end{aligned}\quad (2)$$

Функция изменения кривизны χ_1, χ_2 и кручения χ_{12} имеют вид (3):

$$\chi_1 = \frac{\partial \Psi_x}{\partial x}; \quad \chi_2 = \frac{\partial \Psi_y}{\partial y}; \quad 2\chi_{12} = \frac{\partial \Psi_y}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_x}{\partial y}.\quad (3)$$

С учетом (2) соотношение (1) можно переписать в виде (4):

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} \left[\varepsilon_x + \mu_{21}\varepsilon_y + z(\chi_1 + \mu_{21}\chi_2) \right]; \\ \sigma_y &= \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} \left[\varepsilon_y + \mu_{12}\varepsilon_x + z(\chi_2 + \mu_{12}\chi_1) \right]; \\ \tau_{xy} &= G_{12} \left[\gamma_{xy} + 2z\chi_{12} \right]; \\ \tau_{xz} &= G_{13} k f(z) [\Psi_x - \theta_1]; \\ \tau_{yz} &= G_{23} k f(z) [\Psi_y - \theta_2].\end{aligned}\quad (4)$$

Поскольку ДПК представляет собой N_l склеенных слоев древесины с различными физическими характеристиками в различных направлениях для четных и нечетных слоев, то оболочки, выполненные из данного материала, будем рассматривать как многослойные. Чтобы получить выражения для усилий, приведенных к срединной поверхности оболочки и приходящихся на единицу длины сечения, в i -м слое конструкции, проинтегрируем напряжения (4) по z в пределах толщины i -го слоя h_i , приведенного к общей толщине оболочки. Таким образом предел интегрирования по переменной z будет иметь вид (5):

$$[z_{i-1}; z_i] = \left[-\frac{h}{2} + \sum_{k=1}^{i-1} h_k; -\frac{h}{2} + \sum_{k=1}^i h_k \right].\quad (5)$$

Тогда выражения для усилий и моментов гладкой оболочки примут вид (6):

$$\begin{aligned}
 N_x^0 &= \sum_{i=1}^{N_l} \frac{E_{i,1} h_i}{1 - \mu_{i,12} \mu_{i,21}} \left[(\varepsilon_x + \mu_{i,21} \varepsilon_y) + (\chi_1 + \mu_{21} \chi_2) \left(z_{i-1} + \frac{h_i}{2} \right) \right]; \\
 N_y^0 &= \sum_{i=1}^{N_l} \frac{E_{i,2} h_i}{1 - \mu_{i,12} \mu_{i,21}} \left[(\varepsilon_y + \mu_{i,12} \varepsilon_x) + (\chi_2 + \mu_{i,12} \chi_1) \left(z_{i-1} + \frac{h_i}{2} \right) \right]; \\
 N_{xy}^0 &= N_{yx}^0 = \sum_{i=1}^{N_l} G_{12} h_i \left[\gamma_{xy} + \chi_{12} \left(2z_{i-1} + h_i \right) \right]; \\
 M_x^0 &= \sum_{i=1}^{N_l} \frac{E_{i,1} h_i}{1 - \mu_{i,12} \mu_{i,21}} \left[\left(z_{i-1}^2 + z_{i-1} h_i + \frac{h_i^2}{3} \right) (\chi_1 + \mu_{i,21} \chi_2) + \left(z_{i-1} + \frac{h_i}{2} \right) (\varepsilon_x + \mu_{i,21} \varepsilon_y) \right]; \\
 M_y^0 &= \sum_{i=1}^{N_l} \frac{E_{i,2} h_i}{1 - \mu_{i,12} \mu_{i,21}} \left[\left(z_{i-1}^2 + z_{i-1} h_i + \frac{h_i^2}{3} \right) (\chi_2 + \mu_{i,12} \chi_1) + \left(z_{i-1} + \frac{h_i}{2} \right) (\varepsilon_y + \mu_{i,12} \varepsilon_x) \right]; \\
 M_{xy}^0 &= M_{yx}^0 = \sum_{i=1}^{N_l} G_{12} h_i \left[2 \left(z_{i-1}^2 + z_{i-1} h_i + \frac{2}{3} h_i^2 \right) \chi_{12} + \left(z_{i-1} + \frac{h_i}{2} \right) \gamma_{xy} \right]; \\
 Q_x^0 &= \sum_{i=1}^{N_l} G_{13} k h_i \left[\Psi_x - \theta_1 \right]; \\
 Q_y^0 &= \sum_{i=1}^{N_l} G_{23} k h_i \left[\Psi_y - \theta_2 \right]. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Для введения ребер жесткости из M_l слоев воспользуемся функцией (7):

$$St(x, y) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{M_l^j} h_k^j \bar{\delta}(x - x_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{M_l^i} h_k^i \bar{\delta}(y - y_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h^{ij} \bar{\delta}(x - x_j) \bar{\delta}(y - y_i). \tag{7}$$

Для ввода вырезов также воспользуемся единичными столбчатыми функциями (11):

$$H(x, y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h \bar{\Delta}(x - x_j) \bar{\Delta}(y - y_i), \tag{8}$$

На основе данных функций строятся жесткостные коэффициенты ребер и вырезов, с последующим построением выражений для их усилий и моментов (более подробно их вывод по аналогии с выражениями для гладких многослойных оболочек приведен в диссертационной работе).

Окончательно усилия и моменты для цилиндрической оболочки ступенчато-переменной толщины примут вид (14):

$$N_x = N_x^0 + N_x^H + N_x^{St}; \quad N_y = N_y^0 + N_y^H + N_y^{St};$$

$$\begin{aligned}
N_{xy} &= N_{xy}^0 + N_{xy}^H + N_{xy}^{St}; \quad M_x = M_x^0 + M_x^H + M_x^{St}; \\
M_y &= M_y^0 + M_y^H + M_y^{St}; \quad M_{xy} = M_{xy}^0 + M_{xy}^H + M_{xy}^{St}; \\
Q_x &= Q_x^0 + Q_x^H + Q_x^{St}; \quad Q_y = Q_y^0 + Q_y^H + Q_y^{St},
\end{aligned} \tag{9}$$

где N_x^H , N_y^H , M_x^H , M_y^H , Q_x^H , Q_y^H – выражения для усилий и моментов для вырезов, N_x^{St} , N_y^{St} , M_x^{St} , M_y^{St} , Q_x^{St} , Q_y^{St} – выражения для усилий и моментов для ребер.

Окончательно математическая модель НДС многослойных цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины из ортотропного материала в виде функционала полной потенциальной энергии деформации примет вид (10):

$$\begin{aligned}
E_S = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b & \left[N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + N_{xy} \gamma_{xy} + M_x \chi_1 + M_y \chi_2 + 2M_{xy} \chi_{12} + \right. \\
& \left. + Q_x (\Psi_x - \theta_1) + Q_y (\Psi_y - \theta_2) - 2P_x U - 2P_y V - 2qW \right] AB dx dy.
\end{aligned} \tag{10}$$

Краевые условия для ребристой оболочки при шарнирно-неподвижном закреплении контура имеют вид (11), (12):
при $x = 0$, $x = a$:

$$U = V = W = \Psi_y = 0, M_x = 0, \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 = 0; \tag{11}$$

при $y = 0$, $y = b$:

$$U = V = W = \Psi_x = 0, M_y = 0, \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 = 0. \tag{12}$$

Для верификации предложенной модели проводились расчеты ряда цилиндрических оболочек, выполненных из эли, с аналогичными расчетами в ПК «Лира-САПР». Расчеты проводились как для гладких цилиндрических оболочек, так и для оболочек ступенчато-переменной толщины. Физические параметры материала принимались в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции».

Предложенная математическая модель для исследования НДС гладких многослойных цилиндрических оболочек обеспечивает точность вычислений, не выходящую за 10%-ный интервал в сравнении с расчетами ПК «Лира-САПР». Для конструкции ступенчато-переменной толщины разрыв значений несколько больше и достигает 14,9%. Данный эффект связан с тем, что

наибольшие и наименьшие прогибы возникает в точках на краях выреза и в местах присоединения ребер соответственно, где оценка деформаций сильно зависит от выбранной формы аппроксимирующих функций или конечного элемента.

В результате теоретических и экспериментальных исследований был разработан метод оценки НДС цилиндрических оболочек из ДПК. Предложенный метод заключается в:

1) нахождении функций перемещения и поперечных сдвигов точек срединной поверхности оболочки при заданной нагрузке;

2) определении наибольшего прогиба оболочки для оценки по второй группе предельных состояний (превышение максимально-допустимого прогиба) (13):

$$W \leq W_{\max}. \quad (13)$$

3) определении нормальных и касательных напряжений в каждом слое по (4);

4) определении несущей способности цилиндрической оболочки из перекрестно-клееной древесины по первой группе предельных состояний путем совместной оценки критерия максимальных напряжений (14) и критерия Ашкенази Е. К. (15):

$$\begin{aligned} R_{c,0}^p &\leq \sigma_x \leq R_{p,0}^p; \\ R_{c,90}^p &\leq \sigma_y \leq R_{p,90}^p; \\ |\tau_{xy}| &\leq R_s^p; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_1^2} + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_2^2} + \frac{\tau_{xy}^2}{\tau_{12}^2} + \frac{\sigma_x \sigma_y \left(\frac{1}{\sigma_1^+} + \frac{1}{\sigma_2^-} + \frac{1}{\tau_{12}} \right)}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \tau_{xy}^2}} \leq 1. \quad (15)$$

5. построении полей превышения критерия максимальных напряжений и критерия Ашкенази Е. К. для оценки концентрации напряжений в каждом слое оболочки.

При проектировании цилиндрических оболочек из ДПК рекомендуется:

1) применять в нечетных слоях оболочки ориентацию волокон древесины поперек образующей цилиндра;

2) использовать нечетное число слоев в ДПК-панели;

3) проводить оценку несущей способности по первой группе предельных состояний путем совместной оценки критерия максимальных напряжений и критерия Ашкенази.

В третьей главе представлен программный продукт для ЭВМ, реализующий предложенный метод исследования НДС многослойных цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины. Проведена верификация разработанной математической модели НДС цилиндрических оболочек из ДПК на основе сравнения результатов тестовых задач с результатами, полученных методом конечных элементов в ПК «Лира-САПР». Выявлена достаточно хорошая сходимость (от 3.38% до 14.9%) расчетных прогибов. Исследовано влияние числа слоев и ориентации волокон в них на прочность и устойчивость цилиндрических оболочек из ДПК.

Путем вычислительного эксперимента исследовалось влияние числа слоев и ориентации волокон в них на прочность и устойчивость цилиндрических оболочек из ДПК, находящихся под воздействием вертикально-ориентированной равномерно-распределенной нагрузки. Рассматривались три многослойные цилиндрические оболочки, также выполненные из ели.

Для исследования влияния ориентации волокон в слоях древесины и число этих слоев, при фиксированной общей толщине конструкции будет увеличиваться число слоев N_l от 3 до 9. При этом расчеты будут проводиться как для верхнего слоя, ориентированного вдоль оси x , так и для ориентированного вдоль оси y (рисунок 2). Во втором случае для нечетных слоев модули упругости и коэффициенты Пуассона соответственно меняются местами.

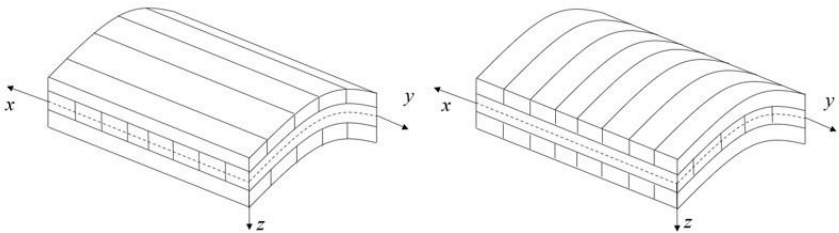


Рисунок 2. Схематичное расположение ориентации слоев для трехслойной оболочки — нечетный слой вдоль оси x (слева) и поперек (справа)

На рисунках 3-5 показана зависимость значений критической нагрузки потери устойчивости и потери прочности от числа слоев: сплошной линией для нечетного числа, пунктиром – для четного. Для ориентации волокон вдоль оси x графики «нагрузка – число слоев» показаны синим, поперек – красным. Слева – значения критических нагрузок потери устойчивости, справа – прочности.

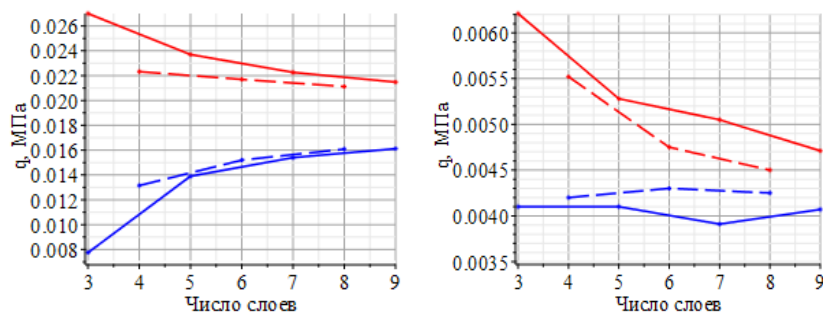


Рисунок 3. Графики зависимости критических нагрузок потери устойчивости (слева) и прочности (справа) для оболочки варианта геометрии 1

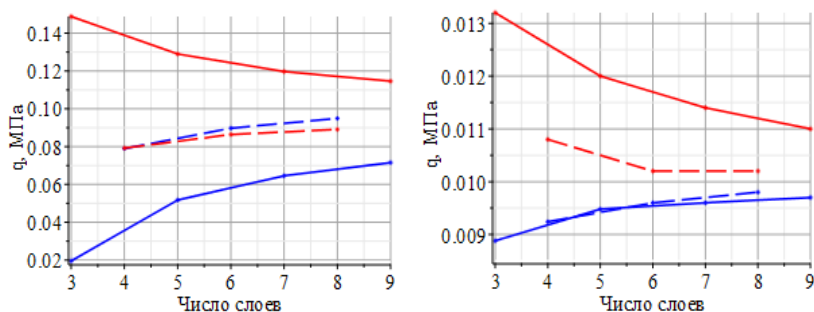


Рисунок 4. Графики зависимости критических нагрузок потери устойчивости (слева) и прочности (справа) для оболочки варианта геометрии 2

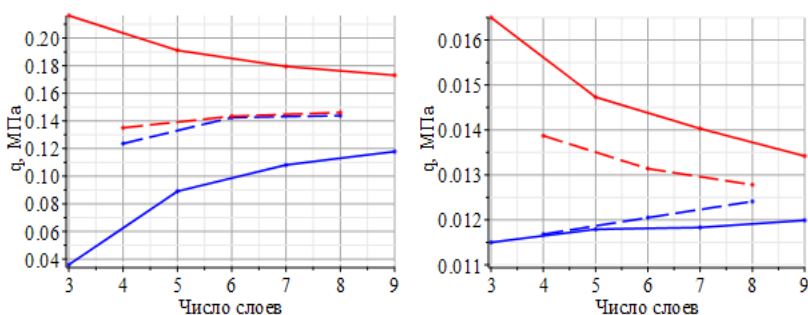


Рисунок 5. Графики зависимости критических нагрузок потери устойчивости (слева) и прочности (справа) для оболочки варианта геометрии 3

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что при ориентации волокон нечетных слоев поперек образующей цилиндра устойчивость и прочность конструкции выше, чем при ориентации вдоль образующей. При этом с увеличением числа слоев при таком способе ориентации волокон значения критических нагрузок потери устойчивости и потери прочности уменьшаются, приближаясь к значениям критических нагрузок потери устойчивости и потери прочности, полученным при продольном способе укладки ламелей нечетных слоев, где значения критических нагрузок потери устойчивости, наоборот, возрастают с увеличением числа слоев. Было замечено, что с увеличением числа слоев значения критических нагрузок потери устойчивости и потери прочности для обоих вариантов ориентации волокон в слоях древесины асимптотически стремятся к некоторому среднему значению. На основе анализа результатов можно сделать вывод, что оптимальным является нечетное число слоев в ДПК-панели, при этом волокна нечетных слоев конструкции должны быть ориентированы поперек образующей цилиндра.

Поскольку ребра жесткости и вырезы оказывают значительное влияние на прочность и устойчивость цилиндрических оболочек, важен как анализ устойчивости, так и прочности таких конструкций. Анализ прочности проводился как для гладких цилиндрических оболочек, так и для оболочек ступенчато-переменной толщины. Полученные результаты подтверждают, что ввод вырезов уменьшает значения критических нагрузок потери прочности для оболочек ступенчато-переменной толщины в сравнении с гладкими оболочками, при этом сначала потеря прочности происходит в нечетных слоях, волокна которых ориентированы поперек образующей цилиндра.

Проведенный в работе анализ полей прочности и компонент напряжений, по которым был нарушен критерий максимальных напряжений, показал, что нечетные слои, волокна которых ориентированы поперек образующей цилиндра, в соответствии с критерием максимальных напряжений теряют прочность по сжатию вдоль волокон. Для четных же слоев, ориентированных вдоль образующей, нарушение критерия происходит по растяжению вдоль волокон. При этом для конструкций, ослабленных вырезами, концентрация напряжений в нечетных слоях происходит вокруг вырезов, для четных – ближе к краям оболочки.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрической оболочки из ДПК» предложена методика проведения эксперимента, представлен образец цилиндрической оболочки из ДПК, результаты и анализ результатов экспериментального исследования модели: поведение

конструкции под воздействием равномерно-распределенной по участку площади нагрузки, определение значений критических нагрузок потери прочности и устойчивости, а также характер разрушения материала. Даны рекомендации по расчету и проектированию цилиндрических оболочек из ДПК.

Для понимания работы цилиндрических оболочек из перекрестно-клееной древесины под воздействием вертикально ориентированной нагрузки были проведены испытания сегментных цилиндрических оболочек из ДПК. С этой целью были созданы два образца, которые рассматривались как элемент большей сегментной оболочки. Испытания проводились в универсальной гидравлической испытательной машине BISS 2500 kN.

Испытания состояли из двух экспериментов – поискового и контрольного. В ходе поискового эксперимента оболочка, собранная из 4 трехслойных плит, соединенных между собой саморезами 8x240 мм.

Поисковый эксперимент проводился в 4 этапа: первые три проводились для оценки работы конструкции под небольшой нагрузкой (до 10 кН), последний – до потери конструкцией несущей способности. На образец действовала равномерно-распределенная нагрузка, возрастающая со скоростью 1 кН/мин. График «нагрузка – прогиб в центре» для последнего этапа испытания представлен на рисунке 6. При нагрузке 23 кН было зафиксировано разрушение образца – расклеивание соединения верхнего и среднего слоев, а также разрушение среднего слоя (рисунок 7). При нагрузке 30 кН образец потерял устойчивость.

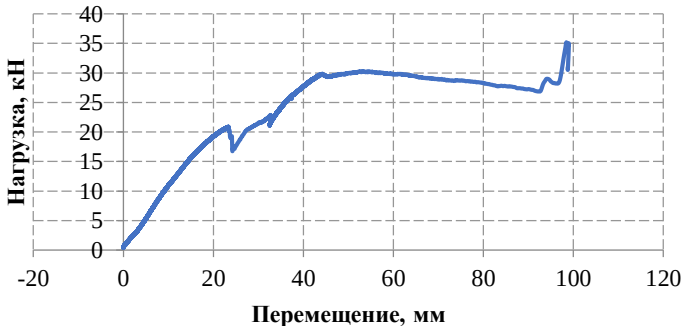


Рисунок 6. График «Нагрузка – прогиб в центре» для четвертого этапа испытания по ходу поискового эксперимента



Рисунок 7. Разрушение образца с ориентацией нечетных слоев вдоль образующей

Для проведения контрольного эксперимента аналогичным образом была собрана сегментная оболочка из 5 трехслойных плит. Для соединения плит использовались саморезы 8х140 с неполной резьбой.

Контрольные испытания проводились в два этапа – первый этап проводился до выработки швов и соединений, второй – также до исчерпания несущей способности, скорость нагружения составляла 1 кН/мин. Скорость нагружения на втором этапе была принята 2 кН/мин, прогиб фиксировался по перемещению штока испытательной машины. График «нагрузка – прогиб в центре» на втором этапе контрольного испытания представлен на рисунке 9. При нагрузке 51.273 кН произошло разрушение конструкции, связанное, связанное с вырыванием саморезов из первого и второго левых сегментов оболочки и разрушением среднего сегмента в верхнем слое (рисунок 9). В дальнейшем нагрузка постепенно была снижена до 22 кН, после чего конструкция стабилизировалась.

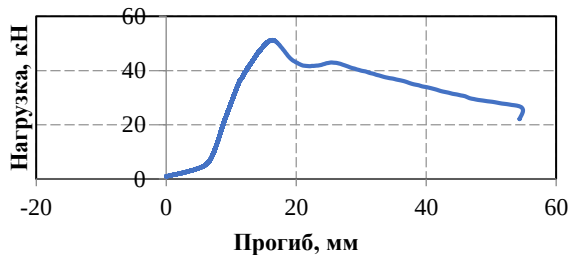


Рисунок 8. Диаграмма «нагрузка – прогиб» для второго этапа контрольного испытания

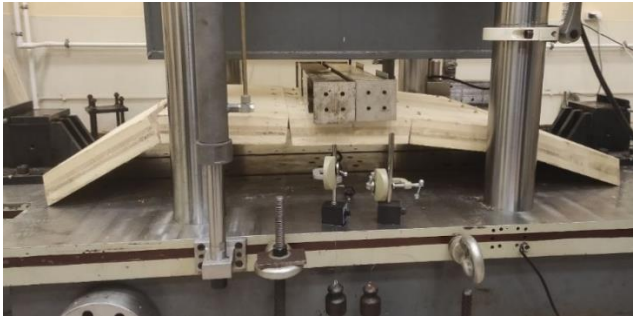


Рисунок 9. Разрушение образца с ориентацией нечетных слоев поперек образующей

Результаты эксперимента согласуются с выводами, полученными аналитически – слои, волокна которых ориентированы поперек образующей цилиндра, первыми теряют прочность в соответствии с критериями максимальных напряжений и Ашкенази Е. К. Предположительно это связано с тем, что данные слои в большей степени воспринимают нагрузку на поперечный изгиб, чем слои с волокнами, ориентированными вдоль образующей цилиндрической оболочки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Предложена и теоретически обоснована математическая модель НДС ортотропных многослойных цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины для статического воздействия. Учет вырезов и ребер по построенной модели осуществляется дискретно, что позволяет с высокой точностью определить влияние конструктивных особенностей на напряженно-деформированное состояние конструкции.

2. Верификация предложенной математической модели путем сравнения результатов расчета тестовых задач с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов в программном комплексе «Лира-САПР», показала, что полученные результаты расчетов достаточно близки (находятся в диапазоне от 3.38% до 14.9%). Данные результаты позволяют сделать вывод о применимости построенной математической модели для анализа НДС цилиндрических оболочек из ДПК.

3. Предложен метод исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек из ДПК ступенчато-переменной толщины с использованием разработанной математической модели и комплексной оценки по критериям прочности Ашкенази Е. К. и максимальных напряжений. Разработана программа для ЭВМ, реализующая предложенный метод и зарегистрированная Федеральной службой интеллектуальной собственности.

4. Установлено расчетным путем и подтверждено экспериментально, что разрушение слоев оболочки, волокна которых ориентированы поперек образующей цилиндра, наступает в результате сжатия вдоль волокон, а слои, ориентированные вдоль образующей, разрушаются в результате растяжения вдоль волокон. Показано, что превышение критериев прочности в слоях, ориентированных вдоль образующей, происходит при большей нагрузке, чем в слоях, ориентированных поперек образующей.

5. Установлено, что цилиндрические оболочки с ориентацией нечетных слоев поперек образующей теряют устойчивость и превышают предел критериев прочности при большей нагрузке, чем цилиндрические оболочки с ориентацией нечетных слоев вдоль образующей. При равной толщине слоев отношение критической нагрузки превышения критериев прочности в оболочках с ориентацией нечетных слоев вдоль образующей к критической нагрузке превышения критериев прочности в оболочках с ориентацией нечетных слоев поперек образующей изменяется нелинейно в зависимости от числа слоев, равно 0.6 для 3-слойных оболочек и увеличивается до 0.87 для 9-слойных оболочек.

6. Рекомендовано применять в нечетных слоях цилиндрической оболочки ориентацию волокон древесины поперек образующей цилиндра, а также использовать нечетное число слоев. Оценка несущей способности по первой группе предельных состояний проводить с комплексным применением критериев максимальных напряжений и Ашкенази Е. К.

Рекомендации к практическому применению.

Полученные результаты могут быть применены в инженерной практике при проектировании цилиндрических оболочек из ДПК, в том числе и ступенчато переменной толщины, в зданиях и сооружениях в качестве покрытий, конструкциях различного назначения, а также для усиления существующих конструкций.

Перспективами дальнейшего исследования могут являться:

1) разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек из ДПК, находящихся под воздействием динамических нагрузок;

2) исследование соединений элементов цилиндрических оболочек из ДПК.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним

1. Каменев И.В. Верификация математической модели деформированного состояния цилиндрических CLT-панелей / И.В. Каменев // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – №3(98). – С. 25-33. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-25-32 (0,56 п.л.).
2. Каменев И. В., Карпов В. В., Кондратьева Л. Н. Устойчивость цилиндрических CLT-панелей / И. В. Каменев, В. В. Карпов, Л. Н. Кондратьева // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 6(95). – С. 30-38. – DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-6-30-38 (0,56 п.л.).
3. Каменев И. В., Черных А. Г., Бакусов П. А., Малов Ю. В. Решение задачи устойчивости оболочечных конструкций с применением тригонометрического и полиномиальных базисов / И. В. Каменев, А. Г. Черных, П. А. Бакусов, Ю. В. Малов // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 5(94). – С. 54-60. – DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-5-54-60. (0,43 п.л.).
4. Каменев И. В., Черных А. Г., Попов В. М., Белов В.В. Устойчивость шарнирно-подвижно опертых перфорированных оболочек / И. В. Каменев, А. Г. Черных, В. М. Попов, В. В. Белов // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 5(88). – С. 40-48. – DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-5-40-48 (0,56 п.л.).
5. Каменев И. В., Семенов А.А. Устойчивость пологих ортотропных оболочек двоякой кривизны при шарнирно-подвижном закреплении контура / И. В. Каменев, А. А. Семенов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 2. – С. 32-43. – DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.04 (0,75 п.л.).
6. Каменев И. В., Семенов А. А. Обоснование использования метода конструктивной анизотропии при расчете пологих оболочек двоякой кривизны, ослабленных вырезами / И. В. Каменев, А. А. Семенов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 54-68. – DOI 10.15593/perm.mech/2016.2.05. (0,81 п.л.).

Статьи в издании, индексируемом международной системой цитирования Scopus

7. Kamenev I. V, Chernych A. G. Stability of orthotropic shells under dynamic loading / I. V. Kamenev, A. G. Chernych // Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction, ICCPAC 2020: 12, Saint Petersburg, 25–26 ноября 2020 года. – Saint Petersburg, 2021. – P. 187-192. (0,31 п.л.).

Статьи в других изданиях

8. Задумкин Л. В., Каменев И. В., Семенов А. А. Обоснование использования метода конструктивной анизотропии при расчете прочности перфорированных пологих оболочек / Л. В. Задумкин, И. В. Каменев, А. А. Семенов // Математическое

моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвузовский тематический сборник трудов / Под редакцией д-ра физико-математических наук, профессора Б. Г. Вагера. Том Выпуск 21. – Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. – С. 37-52. (0,5 п.л.)

9. Черных А. Г., Каменев И. В. Математическая модель исследования прочности цилиндрических панелей из клееной древесины / А. Г. Черных, И. В. Каменев // Инновации в деревянном строительстве: Материалы 11-й Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – С. 121-129. (0,52 п.л.).

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616152 Российская Федерация. PerfShell: calculations of perforated shells: № 2016613545: заявл. 14.04.2016: опубл. 07.06.2016 / И. В. Каменев, А. А. Семенов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – EDN BEBZVR.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613035 Российская Федерация. PerfStiffShell: Calculation of perforated and stiffened shells: № 2021611925: заявл. 16.02.2021: опубл. 01.03.2021 / Р. В. Иванов, В. В. Каменев, И. В. Каменев; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Специальный Технологический Центр». – EDN MWXBCY.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 29.03.2024. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 39.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А