

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ КЛЕЕФАНЕРНЫХ ПЛИТ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Приведены результаты численных исследований крупноразмерных клефанерных плит с помощью программного комплекса «SCAD». Изучено напряженно-деформированное состояние разработанных конструкций и их элементов в зависимости от особенностей конструктивных решений плит, определены значения редуцированных коэффициентов для обшивок и вспомогательных ребер, которые могут быть использованы в инженерном методе расчета.

На протяжении ряда лет на кафедре «Строительные конструкции» Оренбургского государственного университета ведутся опытно-конструкторские разработки крупноразмерных плит для покрытий зданий различного назначения [1, 2]. Разработанные клефанерные плиты представляют собой пространственные конструкции, состоящие из двух основных массивных ребер и обшивки, подкрепленной вспомогательными ребрами. Точность расчета таких конструкций в значительной мере зависит от правильности учета работы обшивки, которая представляет собой ребристую анизотропную пластину.

Расчету ребристых пластин аналитическими методами посвящен ряд работ С.Г. Лехницкого, С.П. Тимошенко, С. Войновского-Кригера, Д.В. Вайнберга, И.З. Ройтфарба и других. Однако ими рассматривались плиты, имеющие только основные ребра. Решение же задачи о степени включения анизотропной обшивки в общую работу плиты при наличии не только основных, но и вспомогательных ребер, как в нормативной, так и в технической литературе нами не найдено.

В последнее время для расчета различных строительных конструкций, в частности ребристых плит, широко применяются численные методы, что объясняется отсутствием в них ряда недостатков, присущих аналитическим решениям. Методы численного решения позволяют учитывать различные контурные условия и произвольное расположение ребер. Достигается это заменой исходных дифференциальных уравнений в частных производных соответствующей системой алгебраических.

Метод конечных элементов привлекает инженеров-строителей своей универсальностью, хорошо обоснованным математическим аппаратом, который позволяет решать как линейные, так и нелинейные задачи механики. Он основан на замене исследуемого объекта совокупностью конечного числа дискретных элементов, связанных между собой в узлах. Непосредственный переход к расчетной схеме дает возможность естественно формулировать граничные условия, произвольно располагать узлы сетки элементов, сгущая ее в местах ожидаемого большого градиента внутренних усилий, применять метод для исследования областей, состоящих из фрагментов, имеющих различные физико-механические свойства [3, 4].

Наиболее удачно, по нашему мнению, метод конечных элементов реализован в программном комплексе

«SCAD», версия 7.27 (малая трудоемкость подготовки исходных данных, хорошо развитая сервисная часть, большое число типов конечных элементов, универсальность), что и обусловило его использование для расчета разработанных плит. Расчеты выполнены на базе Красноярской государственной архитектурно-строительной академии при консультациях д.т.н., профессора Инжутова И.С.

В связи с тем, что экспериментальные исследования проводились на плитах меньшего размера, чем натурные конструкции, для сравнения расчетных и экспериментальных данных численные исследования выполнены для плит размером 0,45x3,6 м и 0,90x3,6 м, запроектированных как геометрически подобные натурным конструкциям с размерами 1,5x12 м и 3,0x12 м. Расчету подлежали плиты:

- с поперечными вспомогательными ребрами;
- с продольной ориентацией вспомогательных ребер и вертикальными диафрагмами;
- с продольными вспомогательными ребрами и наклонными диафрагмами.

Благодаря наличию в плитах двух осей симметрии (по оси X и оси Y) рассчитывали 1/4 часть плит. Расчетная схема плиты с поперечными вспомогательными ребрами показана на рис. 1.

Фанерную обшивку моделировали на расчетных схемах прямоугольными плоскими конечными элементами, учитывающими конструктивную анизотропию, с упругими характеристиками, полученными на основе статических испытаний стандартных образцов, вырезанных из опытных конструкций. Последние оказались равными:  $E_x=10000$  МПа,  $E_y=5400$  МПа,  $\mu_{xy}=0,07$ ,  $\mu_{yx}=0,06$ ,  $G=800$  МПа. Основные продольные деревянные ребра моделировали прямоугольными и четырехугольными плоскими, конечными элементами с упругими характеристиками:  $E_x=10200$  МПа,  $\mu_{xy}=0,5$ . Такие же упругие характеристики приняты для вспомогательных ребер, которые моделировались стержневыми конечными элементами.

Задачей численных исследований являлось, прежде всего, определение характера распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивках разработанных плит в зависимости от:

- ширины конструкции;
- ориентации вспомогательных ребер (вдоль или поперек пролета плиты);

– ориентации диафрагм (вертикально или наклонно по отношению к продольной оси плиты).

Размеры поперечных сечений элементов плит предварительно определяли путем их приближенного статического расчета по прочности и деформативности с учетом нормативной снеговой нагрузки 1,5 кН/м<sup>2</sup> в соответствии с требованиями [5].

Характер распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивке плиты размером 0,45x3,6 м с поперечными вспомогательными ребрами в наиболее напряженном отсеке представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, сжимающие напряжения имеют максимальные значения у основных ребер и уменьшаются к середине ширины конструкции. Такой характер распределения напряжений сжатия в обшивке сохраняется по всей длине конструкции. Отметим также, что идентичными были и эпюры, построенные для сечений у вспомогательных поперечных ребер и в середине отсеков. Это позволило сделать вывод, что поперечные ребра не оказывают влияния на характер распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивке.

Как известно, коэффициент неравномерности распределения нормальных напряжений  $\sigma_x$  по ширине определяется следующим образом:

$$K = \frac{\sigma_x^{cp}}{\sigma_x^{max}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x^{cp}$  – среднее нормальное напряжение по ширине обшивки в рассматриваемом сечении;

$\sigma_x^{max}$  – максимальное значение нормальных напряжений, возникающих в обшивках в месте их присоединения к основным ребрам.

Средние нормальные напряжения определяются так:

$$\sigma_x^{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b \sigma_x \cdot dy \approx \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n \sigma_x^i \Delta y^i, \quad (2)$$

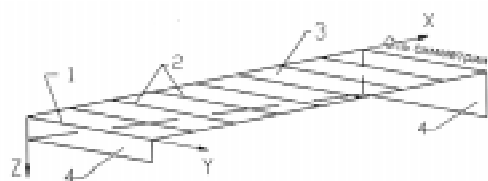
где  $\sigma_x^i$  – значения нормальных напряжений в каждой точке по ширине сечения;




$\Delta y^i$  – ширина участка обшивки между соседними точками измерений;

$b$  – ширина обшивки.

Редукционный коэффициент  $K_0$ , определенный по формуле (1), для плиты 0,45x3,6 м с поперечными вспомогательными ребрами оказался равным 0,54. Значительно большую неравномерность распределения по ширине обшивки имели нормальные сжимающие напряжения в плите шириной 0,90 м. Редукционный коэффициент в этом случае составил  $K_0 = 0,29$ .

При продольной ориентации вспомогательных ребер напряжения сжатия уменьшались к середине ширины конструкции, но имели всплески в местах расположения продольных ребер (рис. 3). Как видно из рис. 3, продольные вспомогательные ребра участвуют в общей работе плиты, увеличивая тем самым ее прочность и жесткость. Редукционные коэффициенты, посчитанные по формуле (1), при ширине конструкции 0,45 м были равны: для обшивки –  $K_0 = 0,56$ , для вспомогательных



-  Конечные элементы, моделирующие фанерную обшивку;
-  Конечные элементы, моделирующие основные ребра и диафрагмы;
-  Конечные элементы, моделирующие вспомогательные ребра;

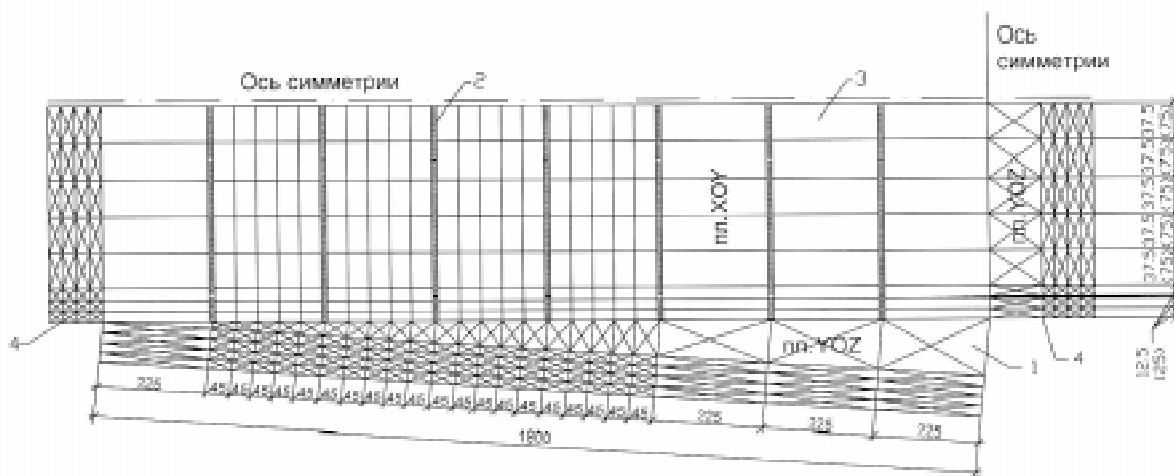


Рисунок 1. Расчетная схема клефанерной плиты с поперечными вспомогательными ребрами (размеры приведены для плиты 0,45x3,6 м; в круглых скобах – для плиты 0,9x3,6 м): 1 – основные ребра; 2 – вспомогательные ребра; 3 – обшивка; 4 – диафрагмы.

ребер –  $K_{вр} = 0,44$ . Для плиты шириной 0,90 м эти коэффициенты соответственно составили  $K_0 = 0,33$ ,  $K_{вр} = 0,28$ .

Большой интерес представляет изучение распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивке плиты 0,90x3,6 м с продольными вспомогательными ребрами и наклонными диафрагмами, шарнирно соединенными с основными ребрами.

В месте примыкания к обшивке опорной диафрагмы (рис. 4, а) сжимающие напряжения во вспомогательных ребрах были близки к максимальным напряжениям в обшивке у основных ребер. Этот факт свидетельствует о том, что наклонная опорная диафрагма работает аналогично сжатым подкосам в фермах, передавая сжимающие усилия на вспомогательные ребра. В зоне между

продольными ребрами напряжения в обшивке уменьшались к центру зоны, т. е. характер их распределения был аналогичен характеру распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивках часторебристых плит. Редукционные коэффициенты в этом случае составили для обшивки –  $K_0 = 0,68$ , для вспомогательных ребер –  $K_{вр} = 0,94$ . По мере удаления от опорной диафрагмы ее влияние уменьшалось.

Установлено, что наклонная диафрагма, расположенная в четверти пролета, повлияла на характер распределения нормальных сжимающих напряжений в обшивке и вспомогательных ребрах в меньшей мере, чем опорная диафрагма (рис. 4, б). Редукционные коэффициенты для обшивки и вспомогательных ребер, определенные для сечений, находящихся в средней зоне между диафрагмами, оказались равными:  $K_0 = 0,52$ ,  $K_{вр} = 0,64$ , что приблизительно равно соответствующим редуци-

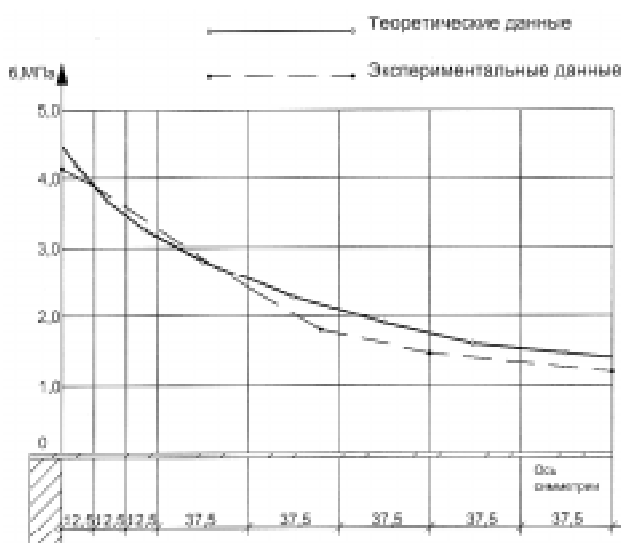


Рисунок 2. Распределение нормальных сжимающих напряжений в обшивке плиты 0,45x3,6 м с поперечными вспомогательными ребрами.

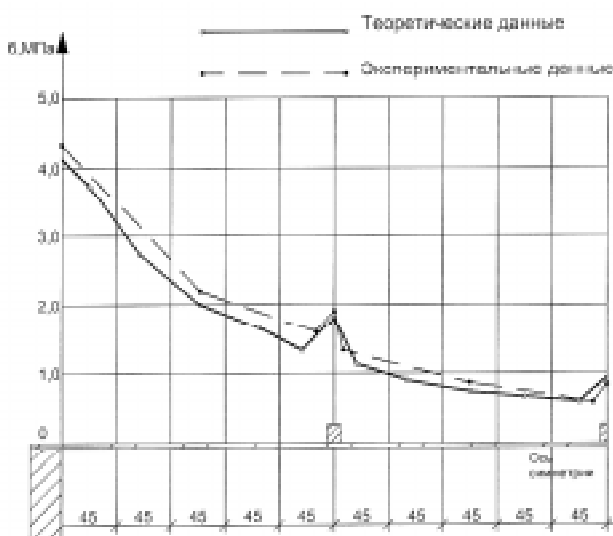


Рисунок 3. Распределение нормальных сжимающих напряжений в обшивках плит с продольной ориентацией вспомогательных ребер и вертикальными диафрагмами (0,9x3,6 м).

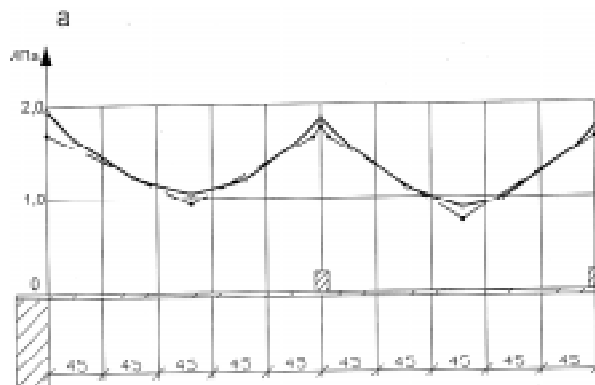


Рисунок 4. Распределение нормальных сжимающих напряжений в обшивке плиты 0,9x3,6 м с продольными вспомогательными и наклонными диафрагмами: а – у опорной диафрагмы; б – у диафрагмы, расположенной в четверти пролета.

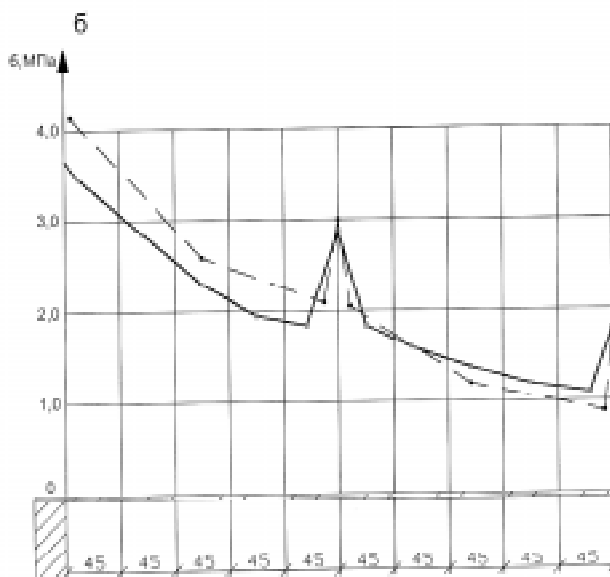


Рисунок 4. Распределение нормальных сжимающих напряжений в обшивке плиты 0,9x3,6 м с продольными вспомогательными и наклонными диафрагмами: а – у опорной диафрагмы; б – у диафрагмы, расположенной в четверти пролета.

онным коэффициентам, посчитанным для сечения у диафрагмы, находящейся в четверти пролета. Этот факт подтвердил гипотезу о том, что влияние наклонных диафрагм распространяется на всю площадь обшивки.

Кроме того, в результате проведенных численных исследований установлено, что:

– наименьшей общей деформативностью обладали плиты с продольными вспомогательными ребрами и наклонными диафрагмами. Относительный прогиб их основных ребер в середине пролета при расчетной нагрузке составил  $1/507$  (в плите с поперечными вспомогательными ребрами –  $1/480$ , с продольными вспомогательными ребрами и вертикальными диафрагмами –  $1/487$ ). Это свидетельствует о более полном включении элементов плиты с наклонными диафрагмами в общую работу конструкции;

– прогибы обшивок в середине отсеков, определенные относительно основных и вспомогательных ребер, практически не изменялись по длине конструкции;

– обшивки в отсеках плит работают как гибкие пластины, жестко защемленные по контуру;

– вспомогательные ребра работают на поперечный изгиб совместно с обшивкой как тавровые элементы; при этом приведенная ширина фанерных полок этих элементов равна приблизительно 40 толщинам обшивки.

Проведенные испытания моделей разработанных клеефанерных плит полностью подтвердили результаты численных исследований. Экспериментальные кривые нанесены на соответствующие графики (рис.2-4). Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышало 14%, что для условий испытаний крупноразмерных моделей можно считать удовлетворительным. Полученные в результате проведенных численных исследований данные использованы автором при разработке «Рекомендаций по конструированию, расчету и изготовлению большепролетных клеефанерных плит для покрытий зданий».

**Список использованной литературы:**

1. Дмитриев П.А., Стрижаков Ю.Д., Жаданов В.И., Кондаков А.Г. Индустриальные пространственные деревянные конструкции // и Древесина в строительных конструкциях. ЧССР, Братислава, 1984, с. 352-368.
2. Жаданов В.И. Разработка пространственных конструкций на основе крупноразмерных клеефанерных плит // Форум инноваций. – 2002, ч. 2, с. 233-234.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
4. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.
5. СНИП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования. – Введ. с 01.01.82. – М.: Стройиздат. – 64 с.