

Характеристические значения прочности ГВЛ определялись в соответствии с требованиями [5].

В результате проведенных исследований установлено:

- при изгибе образцов ГВЛ из плоскости листа на четырёхточечный изгиб материал образца работал линейно вплоть до его разрушения, прочностные характеристики вдоль листа  $f_{m,meam} = 3,56$  МПа,  $f_{m,k} = 3,041$  МПа, поперёк листа –  $f_{m,meam} = 4,17$  МПа,  $f_{m,k} = 4,038$  МПа;

- при растяжении образцов ГВЛ в плоскости листа материал образца работал линейно вплоть до его разрушения, прочностные характеристики вдоль листа  $f_{m,meam} = 3,56$  МПа,  $f_{t,k} = 1,31$  МПа, поперёк листа –  $f_{t,meam} = 1,71$  МПа и  $f_{t,k} = 1,47$  МПа;

- значения прочности ГВЛ зависит от ориентации прикладываемого усилия по отношению к продольной (главной) оси листа.

#### **Список цитированных источников**

1. Листы гипсоволокнистые. Технические условия : ГОСТ Р 51829-2001 – 26 с.
2. Режим доступа: <http://masterim.guru/strojmaterialy/gipsovoloknistyj-list-karakteristiki/>
3. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1995-1-1-2009 – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – 98 с.
4. Плиты гипсовые, армированные волокном определение, требования и методы испытания. Часть 2. Гипсоволокнистые плиты : СТБ EN – 15283-2-2009 – 89 с.
5. Конструкции деревянные. Расчёт значений характеристик 5 – персентилля и критериев приемлемости образца : СТБ EN – 14358 – 2009 – 16 с.

УДК 624.073

*Лазарук А. А.*

*Научный руководитель: к. т. н., доцент Молош В. В.*

### **РАСЧЕТ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПЛОСКИХ ПЛИТ НА ДЕЙСТВИЕ НАГРУЗКИ, ПРИЛОЖЕННОЙ В ЦЕНТРЕ**

**Введение.** Начиная с XX века, инженеры по всему миру проектируют монолитные железобетонные перекрытия с опорами на отдельно стоящие колонны. Одной из особенностей данных перекрытий является расчет узла сопряжения колонны и плоской монолитной плиты. В процессе сопротивления в плоской плите возникают значительные изгибающие моменты и поперечные силы, совместно формирующие сложное трехосное напряженное состояние в локальной области соединения плиты и колонны, при котором сопротивление изгибу полностью исчерпывается не всегда. При определенных условиях разрушение происходит от продавливания. При этом вокруг колонны формируется система наклонных трещин, по одной из которых, при разрушении, колонна с частью бетона конической формы (пирамида продавливания) хрупко отделяется от плиты.

Несмотря на большой опыт в возведении таких перекрытий, в практике проектирования, при расчете узла сопряжения колонны с плитой, используют эмпирические модели, основанные на экспериментах. На сегодняшний день фундаментальной модели, служащей для расчета продавливающих сил, по-прежнему не создано, и вопрос все еще остается неясным и исследуемым современными инженерами.

В данной работе, используя результаты экспериментальных исследований,

полученных в работе [1], выполнено сравнение экспериментальных и теоретических значений предельных продавливающих сил.

**Основная часть.** Теоретические значения продавливающих сил были получены двумя способами: по линейно упругому расчету железобетонной плиты, как тонкой осесимметричной пластины, свободно опертой по контуру и нагруженной локально в центре [2]; по общему деформационному методу расчета железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил [3].

В первом методе расчета продавливающей силы, для решения бигармонического дифференциального уравнения изгиба тонкой пластины, свободно опертой по контуру, был использован **метод конечных разностей**. При своей работе пластинка подчиняется гипотезе прямых нормалей, которая формулируется следующим образом: *нормаль к первоначально плоской срединной поверхности пластинки после деформации последней переходит в нормаль к искривленной поверхности* [2]. Тем самым постулируется отсутствие сдвигов по плоскостям, параллельным срединной поверхности.

Исходя из гипотезы прямых нормалей, при расчете пластинки вводятся следующие допущения:

1. Модуль сдвига пластинки в плоскостях, перпендикулярных плоскости пластинки, равен бесконечности. Объясняется это следующим образом. Гипотеза прямых нормалей постулирует отсутствие сдвигов по плоскостям, параллельным срединной поверхности. На самом деле эти сдвиги имеются, но они настолько малы, что влиянием их на остальные деформации и перемещения пренебрегают. Таким образом, появление касательных напряжений при отсутствии сдвигов оказывается возможным.

2. Для обеспечения неизменяемости расстояний между слоями пластинки считается, что модуль упругости материала в направлении из её плоскости равен бесконечности.

Таким образом, в технической теории расчета пластинок материал считается не изотропным, а обладающим в определенных направлениях бесконечно большой жесткостью. В этом отношении теория расчета пластинок идентична технической теории расчета балок, где наличие касательных напряжений в сечении сочетается с гипотезой плоских сечений, исключающей наличие сдвигов.

При рассмотрении равновесия бесконечно малого элемента пластинки  $dx dy$ , составить уравнения равновесия и преобразовать их, можно в итоге получить основное дифференциальное уравнение изгиба упругой пластинки:

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D}, \quad (1)$$

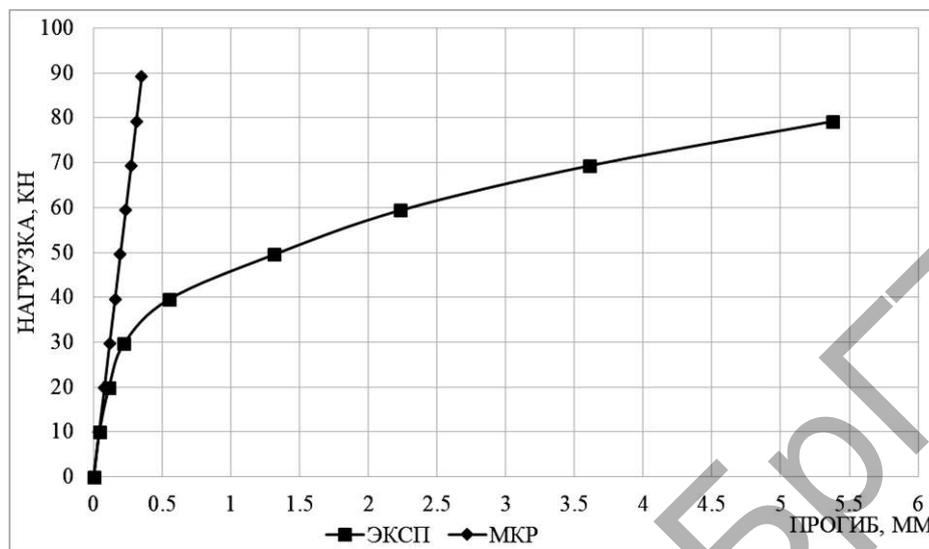
где  $w$  – прогиб пластинки;  $q$  – величина распределенной нагрузки на поверхности пластинки;  $D$  – цилиндрическая жесткость.

При расчете пластин одним из самых эффективных методов является метод конечных разностей. Сущность этого метода заключается в том, что дифференциальное уравнение изгиба пластинки (1) приближенно заменяется системой линейных алгебраических уравнений, в которых неизвестными являются прогибы  $w$  в отдельных точках поверхности пластинки. Эти точки располагают равномерно в узлах некоторой сетки, нанесенной на поверхность пластинки в виде двух пересекающихся семейств линий. Чем гуще эта сетка, тем точнее результаты расчета.

Используя метод конечных разностей, в данной работе была решена пластина, соответствующая по геометрическим и деформационным характеристикам опытным образцам. Для сравнения полученных результатов был со-

ставлен график зависимости нагрузки от прогиба пластины (рис.1).

Анализируя полученные данные, можно сделать заключение о том, что метод конечных разностей при расчете пластин в том виде, в котором он обычно используется, не подходит для расчета продавливающей силы.



**Рисунок 1 – Сравнение экспериментальных и рассчитанных нагрузок методом конечных разностей прогибов плиты**

Вторым методом для определения продавливающей силы был выбран **общий деформационный метод расчета железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил** [3].

Данный деформационный метод позволяет выполнить расчет поперечного сечения элемента на действие изгибающих моментов и продольных сил при любой форме поперечных сечений, любом расположении арматуры в пределах сечения и произвольной системе усилий, вызванных внешними воздействиями. В этой деформационной модели используются:

- уравнения равновесия моментов и продольных сил в сечении, нормальном к продольной оси элемента;
- уравнения, определяющие зависимость напряжений от относительных деформаций для бетона и арматуры;
- уравнения, определяющие распределение относительных деформаций в бетоне и арматуре в пределах сечения, исходя из гипотезы плоских сечений;
- условия деформирования бетона и арматуры на участках между трещинами.

На примере произвольного сечения (рис. 2) рассмотрим особенности расчета по данной модели.

Оговоренные параметры для сечения (рис. 2) можно использовать следующим образом:

1) записать условия равновесия:

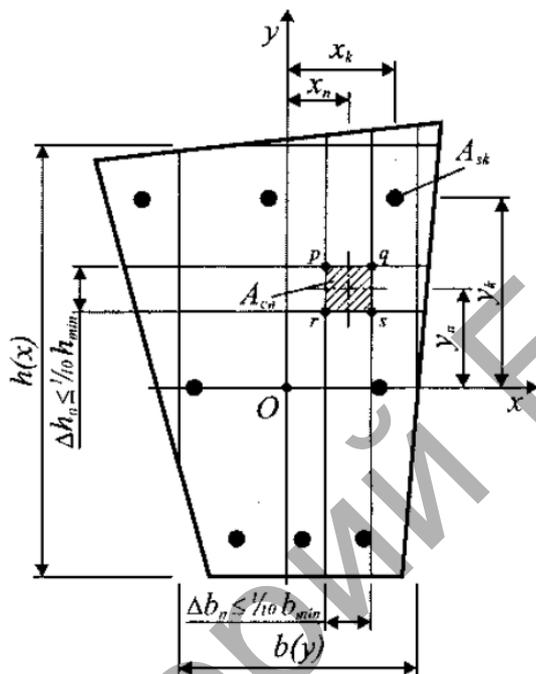
$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) dA_c + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} - N_{Sd} = 0; \\ \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) x dA_c + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} x_k - (M_{Sd,x} + N_{Sd,x} e_x); \\ \int_{A_c} \sigma_c(\varepsilon_c) y dA_c + \sum_k \sigma_{sk}(\varepsilon_s) A_{sk} y_k - (M_{Sd,y} + N_{Sd,y} e_y); \end{array} \right. \quad (2)$$

2) записать уравнения совместности относительных деформаций в виде гипотезы плоских сечений, определяющие их распределение по сечению:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cn} &= \varepsilon_z + \varphi_x \cdot x_n + \varphi_y \cdot y_n; \\ \varepsilon_{sk} &= \varepsilon_z + \varphi_x \cdot x_k + \varphi_y \cdot y_k;\end{aligned}\quad (3)$$

3) использовать для определения напряжений диаграммы деформирования бетона и арматуры [4]:

$$\sigma_c = f(\varepsilon_c), \quad \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \quad \sigma_s = f(\varepsilon_s). \quad (4)$$



**Рисунок 2 – К расчету ЖБК по общей деформационной модели**

При решении уравнений (2) используют либо правила точного интегрирования, либо прибегают к численному интегрированию (суммированию) напряжений, действующих по элементарным площадкам, выделенным в пределах расчетного сечения.

Наиболее распространенным считается метод численного интегрирования, в котором бетонное сечение мысленно разбивают на отдельные малые участки, как правило, прямоугольной формы. В упрощенных моделях принимают допущение о том, что напряжения в пределах каждого выделенного слоя постоянны и равны напряжениям на уровне центра тяжести каждого элементарного участка. Считается, что допущение о постоянстве напряжений в пределах элементарного участка не вносит существенных погрешностей, если его размеры не превышают 1/10 соответствующего размера сечения.

Для определения критической продавливающей силы из рассмотренной деформационной модели была получена величина изгибающего момента, соответствующего предельному состоянию рассматриваемого сечения. При расчете по деформационной модели рассматривалось контрольное сечение шириной, равной длине периметра поперечного сечения колонны  $b_0$ , и высотой, равной высоте плиты. Величина продавливающей силы была определена в следующей последовательности:

1) зная величину изгибающего момента  $M$  в контрольном сечении плиты, определить величину погонного момента  $m$ , действующего по длине  $b_0$ :

$$m = \frac{M}{b_0}; \quad (5)$$

2) вычислить величину погонной опорной реакции  $v$ , равной величине погонной поперечной силы по выражению:

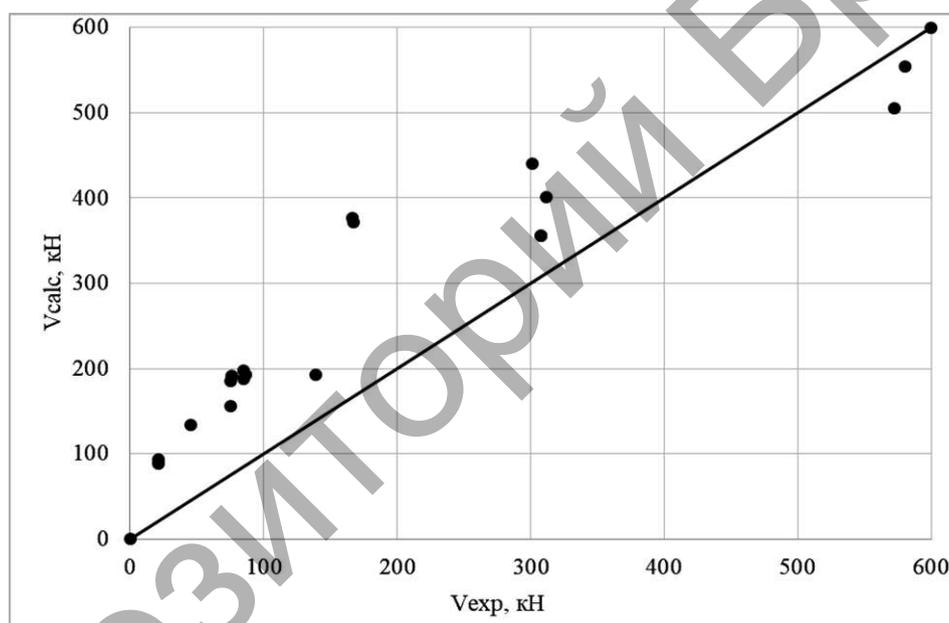
$$\frac{m}{r_s} = v, \quad (6)$$

где  $r_s$  – расстояние от опоры плиты до контрольного сечения в радиальном направлении;

3) определить искомое значение критической продавливающей силы, собрав полученную погонную поперечную силу по длине критического периметра  $u$  [4, п. 6.4]:

$$v \cdot u = V. \quad (7)$$

Расчет был выполнен для серии из 18 опытных образцов-плит, по результатам которого был построен график, показывающий соотношение экспериментальных и расчетных значений продавливающих сил (рис. 3).



**Рисунок 3 – Соотношение экспериментальных и расчетанных по деформационной модели значений продавливающих сил**

**Заключение.** Существующие модели, которые используются в практике проектирования при определении продавливающих сил, относятся к эмпирическим, полученным описанием экспериментальных данных абстрактными математическими зависимостями, не имеющими физико-механического смысла. В большинстве существующих нормативных документов стран Западной Европы и США, а также в нормы Республики Беларусь внесены именно такие модели. Применение таких моделей зачастую ограничено областью экспериментальных данных, на основании которых они были построены, и поэтому они носят скорее частный, чем общий характер.

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Метод конечных разностей при расчете пластин в том виде, в котором он обычно используется, не подходит для расчета продавливающей силы, так как не точно описывает деформированное состояние плиты.

2. Полученные по деформационному методу значения продавливающих сил в среднем на 50 % больше экспериментальных, что обусловлено тем, что в расчете учитывалось влияние только изгибающих моментов, а следовательно, нормальных напряжений, действующих в плоскости поперечного сечения плиты; в настоящее время принята концепция о том, что одним из факторов, влияющих на разрушение плит от среза при продавливании, является достижение в бетоне предельной величины главных растягивающих напряжений, что ведет к образованию наклонной трещины, по которой происходит разрушение.

#### **Список цитированных источников**

1. Молош, В. В. Сопротивление срезу при продавливании самонапряженных плоских железобетонных элементов без поперечного армирования: дис. к-та тех. наук: 05.23.01 / В. В. Молош. – Брест, 2000. – 225 л.

2. Ржаницын, А. Р. Строительная механика: учебное пособие для строительных специальностей вузов. – 2-изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 439 с. – с илл.

3. Железобетонные конструкции. Основы теории расчета и конструирования: учебное пособие для студентов строительной специальности / Под редакцией профессора Т. М. Петцольда и профессора В. В. Тура. – Брест: БГТУ, 2003. – 380 с. – с илл.

4. Проектирование железобетонных конструкций : ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). Еврокод 2. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. – Ч. 1-1: Общие правила и правила для зданий.

УДК 620.1:674.8

**Лазарук А. А.**

*Научные руководители: к. т. н., доцент Шалобыта Н. Н.,*

*к. т. н., доцент Шалобыта Т. П.*

## **ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ И УГЛЕПЛАСТИКА**

**Введение.** В настоящее время перспективы развития деревообрабатывающей промышленности связывают с разработкой и широким применением древесных композиционных материалов (ДКМ). Они имеют комплекс свойств и особенностей, отличающихся от традиционного конструкционного материала деревообработки (массивной натуральной древесины) и в совокупности открывают широкие возможности для разработки новых материалов и технологических процессов [1]. Одним из направлений развития новых свойств в данных материалах является наклеивание высокопрочных углеродных ламелей на поверхность элементов, что может увеличить их жесткость и несущую способность. Такого рода усиление материалов может найти применение как при проектировании конструкций, так и создании новых конструктивных схем.

*Волокнисто-армированные полимеры (Fiber reinforced polymer - FRP)* представляют собой композит, состоящий из высокопрочных волокон и матрицы, предназначенный для связывания этих волокон при изготовлении структурных форм. Общие типы волокон включают арамид, углерод, стекло и высокопрочную сталь, а их матрицы – эпоксидные и сложные эфиры или неорганические матрицы для использования в огнестойких композитах. Системы FRP обладают значительными преимуществами по сравнению с классическими конструкционными материалами, такими как сталь, обладая малым весом, коррозионной стойкостью и т. д. К основным конструкционным преимуществам углеродных волокон относятся их исключительно высокие отношения сопротивления на растяжение к весу, а также высокие отношения модуля упругости к весу.