

# НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИХ РАСЧЕТА. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И УСИЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.012

## К РАСЧЕТУ КАРКАСНЫХ СИСТЕМ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ

Пецольд Т. М., Тур А. В.

**Введение.** Прежде чем приступить к рассмотрению методов расчета конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, представим некоторые из широко используемых терминов, относящихся к феномену прогрессирующего обрушения, и приведем их определения. Более подробно определения термина “прогрессирующее обрушение” рассмотрены в статье [1], где показано, что главным признаком рассматриваемого феномена является непропорциональное обрушение.

Согласно [1], прогрессирующее или непропорциональное обрушение, обусловленное цепной реакцией разрушений элементов конструктивной системы, распространяющихся вертикально и (или) горизонтально – это катастрофическое полное или частичное обрушение здания, развивающееся после наступления некоторого исходного события (как правило, аномального воздействия), приводящего к внезапному локальному разрушению отдельного конструктивного элемента (ключевого элемента), которое не может быть воспринято или предотвращено за счет начальной неразрезности и деформативности (пластической податливости) конструктивной системы.

Локальные разрушения (повреждения) могут быть инициированы целым рядом аномальных причин (событий). Такими событиями могут являться как человеческие ошибки, допущенные в процессе проектирования и возведения здания, так и события, которые могут иметь место (произойти с малой вероятностью) после его возведения в процессе эксплуатации и не рассматриваются в традиционных расчетных ситуациях при составлении соответствующих комбинаций воздействий непосредственно на стадии проектирования.

Особое (анормальное) воздействие – воздействие, являющееся результатом наступления аномального события, имеющего очень низкую годовую вероятность появления (как правило, от  $5 \cdot 10^{-8}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$ ) и характеризующееся очень коротким периодом действия по сравнению с проектными воздействиями для нормальных условий эксплуатации и значительной величиной (интенсивностью).

Особое воздействие идентифицированное – особое воздействие, которое может быть установлено и описано как качественно, так и количественно (например, пожар, взрыв природного газа, ударное воздействие от столкновения транспортного средства с конструктивными элементами здания);

**Особое воздействие неидентифицированное** – особое воздействие, которое не может быть описано на стадии проектирования количественно, а зачастую и качественно (например, являющиеся результатом человеческих ошибок или саботажа на стадии проектирования, возведения, эксплуатации, взрывов агрессивных агентов, разрушения технологического оборудования и трубопроводов, террористических и криминальных атак).

Исходя из анализа ряда работ, можно утверждать, что примерно 15...20% аварий зданий развивались в соответствии со схемой прогрессирующего обрушения. Следует отметить, что в процессе традиционного проектирования, базирующегося на полуввероятностных методах расчета, применение системы частных коэффициентов безопасности позволяет создать некоторые нормируемые резервы (запасы) прочности и деформативности конструктивной системы, что изначально позволяет зданию в определенной мере противостоять аномальным воздействиям и развитию прогрессирующего обрушения.

**1. Методы расчета на прогрессирующее обрушение.** При проверке сопротивления конструктивной системы здания прогрессирующему обрушению, опираясь на положения стратегии управления рисками, рекомендуется [2] применять две группы расчетных методов:

(1) Методы, направленные на обеспечение сопротивления отдельного конструктивного элемента локальному разрушению при аномальном (особом) воздействии, приложенному непосредственно к нему;

(2) Методы, связанные с разработкой альтернативных (резервных) путей передачи усилий от нагрузки после реализации локального разрушения отдельного конструктивного элемента.

При этом в рамках второй группы можно выделить две подгруппы:

(2.1) Методы, направленные на обеспечение неразрезности, общей целостности и пластической деформативности конструктивной системы здания при особом воздействии за счет постановки расчетного минимума соединительных связей (метод связевых усилий, СУ-метод);

(2.2) Методы, основанные на идентификации и ограничении допускаемой площади или объема здания, подвергающегося прогрессирующему обрушению при локальном разрушении отдельного конструктивного элемента. По этому методу выполняют проектирование конструктивной системы, способной воспринять нагрузки, действующие в пределах объема здания, подвергнувшегося обрушению (методы альтернативных траекторий, АТ-метод).

Обобщенный алгоритм проверки сопротивления конструктивной системы здания прогрессирующему обрушению представлен на рис. 1.

**1.1 Метод связевых усилий (СУ-метод).** В рамках метода связевых усилий целостность здания (конструктивной системы), повышенная неразрезность, пластическая деформативность и резервирование альтернативных путей (траекторий) передачи нагрузок в случае наступления локального разрушения отдельных конструктивных элементов обеспечивается посредством проектирования системы горизонтальных и вертикальных связевых элементов [2, 3, 4].

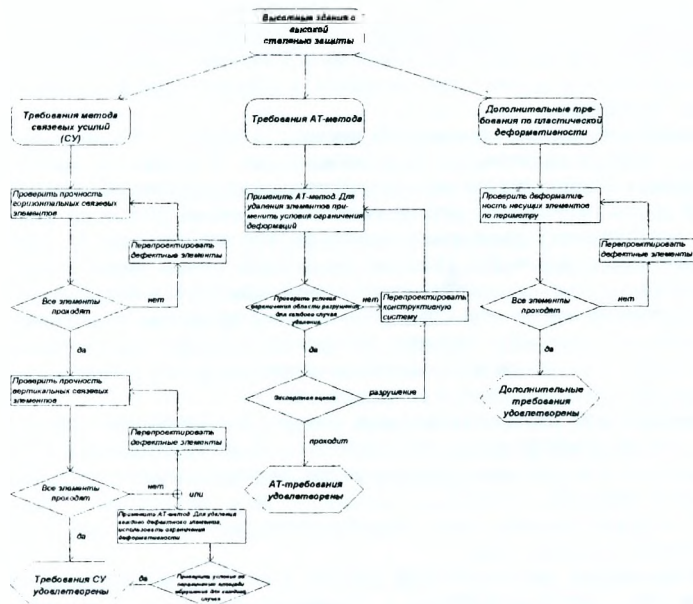


Рисунок 1 – Алгоритм проверки на устойчивость к прогрессирующему обрушению конструктивных систем с высокой степенью защиты, согласно [5]

В традиционных конструктивных системах в качестве горизонтальных и вертикальных связевых элементов выступают, как правило, конструктивные элементы и их стыки (соединения). Эти элементы рассчитаны на восприятие нагрузок и воздействий, установленных в нормах проектирования и действующих на конструктивную систему при традиционном проектировании в условиях постоянной проектной (расчетной) ситуации.

При проектировании железобетонных каркасов зданий следует рассматривать систему связевых элементов, которая включает:

- горизонтальные связи (периметрические, внутренние элементы, элементы, связывающие крайние и угловые колонны (стены) с другими элементами конструктивной системы);

- вертикальные связи, обеспечиваемые колоннами и несущими стенами.

Подробнее метод связевых усилий рассмотрен в работах [2, 5].

**1.2 Метод альтернативных путей передачи нагрузки (АТ-метод).** Этот метод следует применять в следующих расчетных ситуациях:

- 1) когда вертикальные конструктивные элементы не обеспечивают требуемую прочность для восприятия связевого усилия и конструктор может использовать АТ-метод для проверки, способна ли конструктивная система воспринять нагрузки, расположенные выше разрушенного (поврежденного) вертикального конструктивного элемента (конструктивные системы класса 2Б, согласно [3, 6]);

- 2) когда выполняется расчет конструктивных систем, имеющих высокий уровень защиты (к ним относятся конструктивные системы 3-го класса, согласно [3, 6]). В этом случае выполняется вынужденное удаление отдельных вертикальных несущих конструктивных элементов.

При расчете модифицированных конструктивных систем с вынужден удаленными конструктивными элементами (или вертикальными элементами имеющими дефицит прочности) в рамках АТ-метода рекомендуется использовать пространственные расчетные модели, к которым применимы следующие расчетные процедуры:

1) **Линейный квазистатический расчет**, в рамках которого применяется гипотеза о работе материалов в линейно-упругой стадии, а геометрическая формулировка базируется на малых деформациях (перемещениях). Основным отличием от традиционного метода является то, что допускается «врезка» дискретных пластических шарниров в сечениях, где изгибающие моменты достигают предельных значений. Полную расчетную квазистатическую нагрузку определенную с учетом динамических коэффициентов, найденную из особого сочетания прикладывают одновременно ко всем элементам модифицированной конструктивной системы с удаленным вертикальным несущим элементом. Правила назначения динамических коэффициентов или квазистатических диаграмм деформирования рассмотрены в работах [7, 8].

2) **Нелинейный квазистатический расчет**, в котором учитывается как физическая, так и геометрическая нелинейность. К модифицированной конструктивной системе с удаленным вертикальным несущим элементом пошагово прикладывается нагрузка равными ступенями от нуля до полного расчетного значения. На каждой ступени (этапе) нагружения выполняется итерационный расчет конструктивной системы;

3) **Нелинейный динамический расчет**, при котором учитывается физическая и геометрическая нелинейность. Динамические расчеты проводят для конструктивной системы, в которой мгновенно удаляют вертикальный несущий элемент при полной расчетной нагрузке для соответствующего особого сочетания и анализируют результирующие параметры движения (ускорения).

В расчетных моделях рекомендуется учитывать конструктивные элементы, которые при нормальных условиях эксплуатации (постоянные расчетные ситуации) являются второстепенными, а при наличии локальных особых воздействий могут активно участвовать в перераспределении внутренних усилий в элементах модифицированной конструктивной системы.

Расчет конструктивных систем следует выполнять с использованием сертифицированных программных комплексов, в том числе основанных на методе конечного элемента (МКЭ). Рекомендуется применение программных комплексов, допускающих возможность учета в расчетах физической и геометрической нелинейности.

Полученные на основании статического расчета усилия в отдельных конструктивных элементах следует сравнивать с предельными усилиями, которые могут быть восприняты этими элементами.

Допускается применение плоских расчетных моделей при условии, что, принятая идеализация адекватно отражает пространственную работу конструктивной системы.

Правила вынужденного удаления конструктивных элементов и составления особых расчетных сочетаний подробно рассмотрены в наших работах [2, 4] и включены в нормы [5].

**2. Расчетные критерии при проверке сопротивления отдельных конструктивных элементов.** Расчетные критерии АТ-метода для отдельных элементов включают требования прочности и ограничения деформаций.

Расчет здания в случае локального разрушения несущих конструкций производится только по предельным состояниям первой группы. Развитие неупругих деформаций, перемещения конструкций и раскрытие в них трещин в рассматриваемой особой расчетной ситуации не ограничиваются.

Моменты  $M_{Ed}$ , осевые усилия  $N_{Ed}$ , поперечные силы  $V_{Ed}$  рассчитывают для отдельных элементов и узлов конструктивной системы в рамках АТ-метода и рассматривают как требуемые прочностные характеристики (далее – параметры).

Требуемые прочностные параметры для конструктивных элементов (вектор внутренних усилий от внешних воздействий) сравнивают с вектором расчетных предельных усилий, которые способны воспринимать конструктивные элементы. Кроме того, дополнительно выполняется проверка критериев деформативности. Перемещения, углы поворотов и продольные деформации, рассчитанные по модели АТ-метода, сравнивают с предельно допустимыми значениями. Если для любого конструктивного элемента расчетные критерии не выполняются (превышены), выполняется модификация расчетной модели и производится перерасчет.

Расчетные критерии при изгибе базируются на расчетной изгибной прочности конструктивного элемента, определяемой в соответствии с требованиями действующих ТНПА. При этом в расчетной модели используются расчетные характеристики материалов с повышающими коэффициентами безопасности, согласно [4].

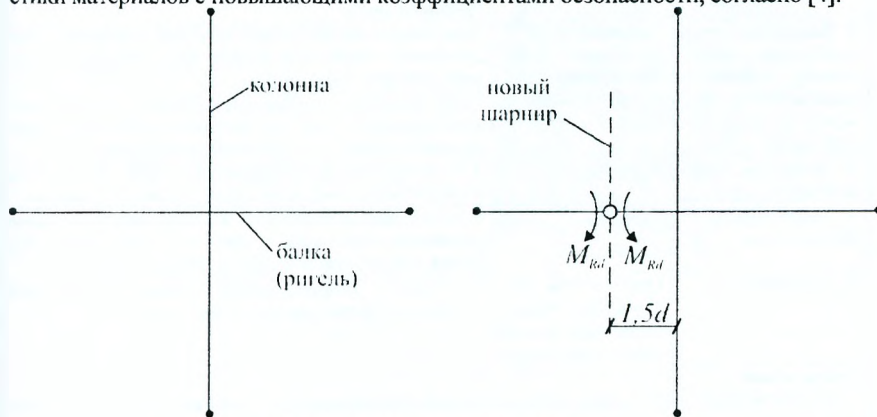


Рисунок 2 – Правила врезки дискретных шарниров

В случае, когда в анализируемом изгибаемом элементе момент от внешней нагрузки, определенной в рамках АТ-метода при расчете модифицированной модели, превышает предельный расчетный момент ( $M_{Ed} \leq M_{Rd}$ ), элемент или удаляется из расчетной схемы, или дополнительно модифицируется. Для линейных расчетных моделей конструктивный элемент может быть модифицирован путем «врезки» так называемого «эффективного» дискретного пластического шарнира. Место расположения дискретного пластического шарнира определяется положением сечения, в котором достигается предельный изгибающий момент. В узлах сопряжения вертикальных и горизонтальных элементов дискретный пластический шарнир врезают на расстоянии  $1,5d$  от грани колонны (где  $d$  – рабочая высота сечения). В этом сечении одновременно с «врезкой» пластического шарнира в соответствующем направлении прикладываются два предельных момента с каждой стороны дискретного шарнира (см. рис. 2).

Расчетные критерии для проверки конструктивных элементов в особых расчетных ситуациях приведены в нормах [5].

Таблица 1 – Критерии для проверки конструктивных элементов при выполнении расчетов на прогрессирующее обрушение

Тип конструктивного элемента	Расчетный критерий	Действия, которые следует выполнить, если расчетный критерий превышен
1 Изгибаемые элементы	По СНБ 5.03.01 $M_{Ed} < M_{Rd}$	А) Для элементов, которые могут сопротивляться после того, как в расчетном сечении достигнут предельный момент (статически неопределимая система): а) При линейно-упругом расчете в конструктивный элемент «врезают» эффективный шарнир в соответствующем сечении и прикладывают постоянные моменты с обеих сторон шарнира б) При выполнении нелинейных статических и динамических расчетов программное обеспечение должно автоматически учитывать нелинейную работу на изгиб по соответствующим диаграммам. Если элементы разрушаются при достижении предельного изгибающего момента, их удаляют из расчетной схемы (модели) и перераспределяют нагрузки от него
2 Элементы, подвергаемые совместному действию изгибающего момента и продольной силы	Используются уравнения взаимодействия для изгиба и осевой силы	Для элементов, прочность которых контролируется действием изгибающего усилия $M_{Sd}$ , следуют процедуре, представленной в поз. 1. Если происходит потеря устойчивости от продольной (осевой) силы $N_{Sd}$ , элемент удаляется из расчетной модели, а нагрузка перераспределяется
3 Элементы, подвергаемые срезу	$V_{Sd} \leq V_{Rd}$	А) Если условие не выполняется, то элемент удаляется из расчетной схемы, а нагрузка перераспределяется
4 Соединения, стыки, связи	$T_{Sd} \leq T_{Rd}$	Если условие не выполняется, соединения, стык, связь удаляются. Если связь удалена на обоих концах элемента, следует удалить конструктивный элемент
5 Деформации	Ограничение деформаций менее предельно допустимых значений	Б) Удалить поврежденный элемент из расчетной модели и перераспределить нагрузку
<b>Примечания</b>		
1 (А) Расчетные значения предельных усилий рассчитывают по нормам СНБ 5.03.01 с учетом повышающих коэффициентов к расчетным характеристикам материалов.		
2 (Б) Ограничение деформаций определяется в терминах перемещений и углов поворота отдельных конструктивных элементов, связей, рам. Предельные значения определяются из условия, что конструктивный элемент при их достижении не способен далее воспринимать нагрузку		

**3. Пример расчета каркаса сборно-монолитного здания.** В качестве примера расчета на прогрессирующее разрушение рассмотрим расчет сборно-монолитного каркаса, разработанного институтом Бел НИИС и примененный при разработке объекта 129.99-01 институтом «Брестпроект».

Каркас выполнен в сборно-монолитном варианте с монолитными несущими и связевыми ригелями и заполнением плитами пустотного настила по серии Б1.020.1-7. Колонны приняты по серии Б1.020. Монолитные ригели выполнены из бетона C25/30 по проекту, армированы арматурой S400. Здание девятиэтажное с техническим этажом. Нагрузка на перекрытия и покрытие приняты согласно СНиП 2.01.07-84\* и СНБ 5.03.01.

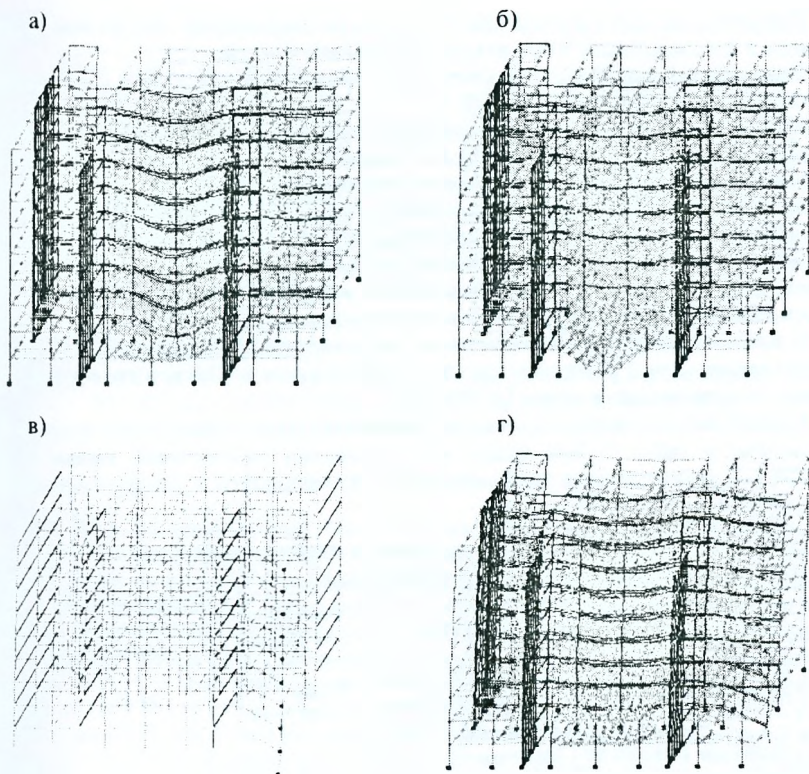


Рисунок 3 – Деформированная схема каркаса здания при удалении конструктивных элементов:

- а) внутренней колонны; б) наружной колонны по длинной стороне;  
в) угловой колонны; г) наружной колонны по короткой стороне.

Сбор нагрузок выполнен в соответствии с конструктивным решением перекрытий, представленным в проекте.

Пространственная стержневая модель состояла из колонн, главных и связевых ригелей. Пространственную жесткость здания учитывали в соответствии с требованиями серии 1.020. введением жестких вставок, моделирующих диафрагмы жесткости в продольном и поперечном направлениях. При расчете комбинированной модели диафрагмы жесткости описывали с использованием конечных элементов плосконапряженной системы (балки-стенки), а сборные плиты перекрытий – конечных элементов плиты. Сопряжения плитных элементов и элементов балки-стенки со стержневыми элементами принято жесткими.

Предельные усилия в расчетных сечениях определяли с использованием комплекса БЕТА – 2.1. В программном комплексе реализован общий деформационный метод, изложенный в СНБ 5.03.01 [9].

Проверку каркаса на устойчивость к прогрессирующему обрушению проводили в соответствии с алгоритмом, приведенном на рис. 1.

Удаление вертикальных элементов производим в соответствии с правилами, изложенными в Рекомендациях [3].

Расчет выполнен по методу конечных элементов (МКЭ) с использованием вычислительного комплекса ЛИРА 9.2. и в соответствии с рекомендациями, изложенными в серии Б1.020.1-7. Расчет был выполнен по линейно-упругой статической модели с врезкой дискретных шарниров пластичности.

На рис.3 приведены деформированные схемы здания при удалении ренней, наружной и угловой колонны для расчетной схемы, представляющей собой комбинацию стержневых элементов, моделирующих ригеля и колонны, плоских плит приведенной толщины, моделирующих плиты пустотного блока и плоских элементов балок-стенок, моделирующих диафрагмы жесткости. Сопряжение плит с ригелями принято шарнирными в соответствии с положениями, изложенными в серии Б1.020.1-7.

Сравнение полученных площадей обрушения с критериальными значениями приведено в табл. 2. Как видно из полученных результатов, каркас с Б1.020.1-7 удовлетворяет требованиям по устойчивости к прогрессирующему обрушению.

Таблица 2 – Обобщенные результаты расчета каркаса серии Б1.020.1-7 на устойчивость к прогрессирующему обрушению

№ п/п	Удаляемый конструктивный элемент	Критерий	Фактически По расчету	Коэффициент устойчивости модели	Результат
1	Внутренняя колонна на пересечении осей 5 и Н.	Не более $140\text{ м}^2$ или 30% от общей площади перекрытия	$S_{collapse} = 81\text{ м}^2$ 17,76%	30,06	Удовлетворительно
2	Наружная колонна на пересечении осей 6 и Н.	Не более $70\text{ м}^2$ или 15% от общей площади перекрытия	$S_{collapse} = 55,8\text{ м}^2$ 12,23%	31,7	Удовлетворительно
3	Угловая колонна на пересечении осей 6 и Т.	То же	Нет	23,8	Удовлетворительно
4	Наружная колонна на пересечении осей 5 и Т.	То же	$40,5\text{ м}^2$ 9%	23,48	Удовлетворительно

**Заключение.** Представленные методы расчета (АТ – методы) конструктивных систем в особых расчетных ситуациях позволяют произвести оценку устойчивости здания к прогрессирующему (непропорциональному) обрушению, опираясь на ограничение площадей обрушения, установленных в зависимости от уровня допустимого риска.

#### Список цитированных источников

1. Тур, В.В. О разработке проектных стратегий, направленных на защиту конструктивных систем от прогрессирующего обрушения // Вестник БрГУ – 2009. – № 1: Строительство и архитектура. – 2009. – № 1. – С. 117–124.
2. Тур, В.В., Тур, А.В., Марковский, Д.М. Стратегии защиты конструктивных систем прогрессирующего обрушения // Строительная наука и техника. – 2008. – № 1. – С. 17–21.
3. Рекомендации по защите каркасных зданий от прогрессирующего обрушения БрГУ БрГУ, 2008. – 112 с.
4. UFC-4-023-03- Design of Building to Resist Progressive Collapse, January, 2005. – 175 p.



5. ТКП 45-3.02-108-2008. Высотные здания. Строительные нормы проектирования. – Мн.: Типпроект, 2008. – 178 с.

6. EN 1991-1-7. General Actions – Accidental Actions.

7. Тур, А.В. К определению динамических коэффициентов для случая внезапного приложения нагрузки // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. сб. тр. 15 Междунар. научн.-метод. семинара: в 2 т. / Под общ. ред. Д.Н. Лозовского и А.А. Хотько. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т. 1 – С. 116–125.

8. Тур, А.В. Расчет железобетонных балок при внезапном приложении нагрузки с использованием квазистатического использования “нагрузка – динамическое перемещение” // Вестник БрГТУ. – 2009. – № 1: Строительство и архитектура. – С. 109–116.

9. СНБ 5.03.01. Бетонные и железобетонные конструкции. – Мн.: Типпроект, 2003. – 237 с.

УДК 624.012.45

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНКЕРОВКИ УГЛЕПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПРИ УСИЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лазовский Д.Н., Бадалова Е.Н.

**Введение.** На современном этапе развития строительной отрасли прогрессивным методом усиления железобетонных конструкций является приклеивание дополнительной арматуры из композиционных материалов. Несмотря на достаточно высокую стоимость таких материалов, применение арматуры из углеродных, арамидных или стекловолокон имеет ряд преимуществ, таких как высокая прочность на растяжение при достаточно высоком модуле упругости, небольшой собственный вес, простота транспортировки и монтажа, коррозионная стойкость и многие другие. Возможность использования композиционных материалов на основе углеродных волокон для усиления изгибаемых железобетонных конструкций подтверждено экспериментальными исследованиями, проводимыми в лабораторных условиях, а также опытом применения их для усиления реальных конструкций.

**Экспериментальные исследования.** В 2007–2008 г.г. в лаборатории кафедры “Строительные конструкции” Полоцкого государственного университета проведен ряд исследований усиленных железобетонных изгибаемых конструкций. Были испытаны четыре железобетонные многопустотные плиты, одна из которых как эталонная (без усиления), а три усилены в растянутой зоне приклеиванием дополнительной арматуры в виде углепластиковых пластин. Эксперименты подтвердили эффективность применения углепластиковой арматуры для усиления железобетонных изгибаемых конструкций: прочность плит после усиления возросла более чем в 1.4 раза [1]. Однако разрушение усиленных плит происходило при нагрузке, значение которой ниже теоретической нагрузки, соответствующей прочности усиленной конструкции. Во всех трех экспериментах наблюдали однотипный характер разрушения: отслоение углепластиковых пластин от поверхности бетона плит. Так как отслоение углепластиковых пластин является одной из основных причин потери работоспособности изгибаемых усиленных железобетонных элементов, что подтверждено как настоящими экспериментами, так и результатами других исследований [3], то очевидно, что очень важным является вопрос анкеровки пластин усиления. Таким образом, проведенные испытания железобетонных многопустотных плит,