

На рисунке 5 изображено: 1 – труботетонные элементы; 2 – крестоподобные вставки; 3 – стальные пластины; 4 – соединительные болты; 5 – листовые накладки.

В результате проделанной работы можно сделать следующие **выводы**:

В статье предложены новые типы разъемных стыков труботетонных элементов: с центрирующей пластиной, со спрятанными болтами, со стальной муфтой, с продольными ребрами и со крестоподобными вставками на листовых накладках, каждый из которых имеет ряд преимуществ перед стандартным разъемным фланцевым стыком на болтах. Определение наиболее оптимального из них зависит от условий строительства и назначения возводимого сооружения. В то же время необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования их напряжено-деформированного состояния.

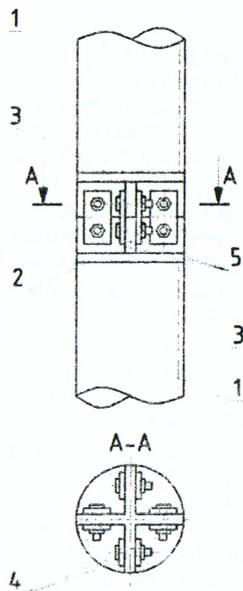


Рисунок 5

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Труботетон [Текст]: монографія / Л.І. Стороженко, Д.А. Єрмоленко, О.І. Лапенко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2010. – 306 с.
2. Клименко, Ф.Є. Металеві конструкції / Ф.Є. Клименко, В.М. Барабаш, Л.І. Стороженко; за ред. Ф.Є. Клименка: підручник. — 2-ге вид., випр. і доп. – Львів: Світ, 2002. – 312 с.
3. Стороженко, Л.И. Труботетонные конструкции. – К.: Будівельник, 1978. – 82 с.
4. Семко, О.В. Надійність сталезалізобетонних конструкцій: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. – Полтава, 2006. – 35 с.
5. Семко, О.В. Особливості конструювання і розрахунку вузлів сталезалізобетонних колон з швелерів / О.В. Семко, А.В. Гасенко // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – К.: НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 183–186.
6. Eurocode 4. Common Unified Rules for Composite Steel and concrete Structures European Committee for Standardization (CEN) ENV. 1994 – 1-1: 1992.

УДК 624.012

Тур А.В.

ПРОВЕРКА ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ С ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ОСОБЫХ РАСЧЕТНЫХ СИТУАЦИЯХ

В последнее десятилетие внимание специалистов направлено на разработку проектных стратегий и практических методов защиты зданий и сооружений в особых расчетных ситуациях. Особая расчетная ситуация является следствием реализации идентифицированного или неидентифицированного аномального события, которое может привести к развитию так называемого **прогрессирующего обрушения**.

Главным признаком *прогрессирующего обрушения* принято считать его непропорционально большие масштабы по отношению к локальному повреждению (разрушению) конструктивного элемента, инициировавшего цепную реак-

цию разрушений других конструктивных элементов, непосредственно не подвергавшихся воздействию.

Обзор работ отечественных и зарубежных исследователей выполненный автором [1], показал, что стратегии управления рисками наступления прогрессирующего обрушения можно разделить по следующим направлениям:

1) ограничение и контроль угроз возникновения особой расчетной ситуации (*контроль событий*);

2) обеспечение локального сопротивления отдельных (ключевых) конструктивных элементов (*локальная прочность*);

3) оценка реакции конструктивной системы на локальное разрушение (*оценка живучести*).

Живучесть (*robustness*) является исключительно свойством конструктивной системы в том смысле, что она не зависит от природы, причины и вероятности локального разрушения. Таким образом, говоря о живучести в рассматриваемой особой расчетной ситуации, следует говорить о свойстве модифицированной конструктивной системы (ТКП ЕН 1991-1-7 [2], ТКП 45-3.02-108-2008 [3]). В этом случае следует считать, что проверка конструктивной системы в особой расчетной ситуации относится к оцениванию *живучести* модифицированной конструктивной системы, в которой произвели внезапное удаление ключевого конструктивного элемента. Данная стратегия может быть *единственно возможной* при проверках конструктивных систем в случае неидентифицированных особых воздействий.

Главной проблемой в проверке живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях является назначение **обоснованных критериев**, по которым непосредственно и следует производить эту проверку. Следует отметить, что ТКП ЕН 1990 [4], декларируя необходимость оценки живучести в качестве обязательного требования, не устанавливает четких критериев такой оценки. Исходя из возрастающей прикладной необходимости проверки живучести для зданий высокого класса по последствиям обрушения, в собственных исследованиях [1] были определены такие критерии.

Расчетные методы и процедуры, применяемые при проверках живучести конструктивных систем. В рамках общепринятых расчетных стратегий защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения основное внимание сосредоточено на предотвращении развития непропорционального обрушения здания или сооружения, получившего локальное повреждение.

В соответствии с принятой расчетной стратегией, потенциальное разрушение конструктивной системы следует предотвращать или ограничивать его масштабы, применяя:

1) *непрямой (косвенный) метод* (например, т.н. *метод связевых усилий*), в соответствии с которым выполняют проектирование системы вертикальных и горизонтальных связей, обладающих значительной пластической деформативностью и обеспечивающих интегральную целостность (связность) поврежденной конструктивной системы с удаленным элементом. Правила проектирования горизонтальных и вертикальных связей, обеспечивающих интегральную целостность здания, приведены, например, в [5];

2) *прямой расчетный метод* (или т.н. *метод альтернативных траекторий*, АТ - метод), в рамках которого выполняют прямой расчет модифицированной конструктивной системы с удаленным элементом и, используя полученные результаты расчета, выполняют проверки *установленных критериев живучести* конструктивной системы в особых расчетных ситуациях.

Критерии, применяемые при проверках, зависят, как правило, от расчетных процедур, используемых в рамках АТ - метода. В общем случае, практически все нормы при выполнении расчетных проверок конструктивных систем в особых расчетных ситуациях допускают применение следующих расчетных процедур:

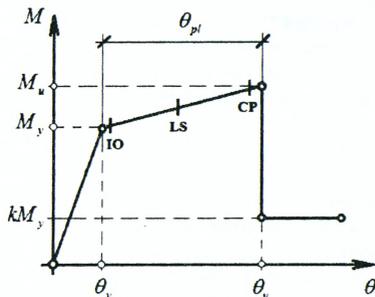
- 1) линейно-упругий статический расчет (*LS*);
- 2) нелинейный статический расчет (*NLS*);
- 3) нелинейный динамический расчет (*NLD*).

Несмотря на то, что нелинейные динамические расчеты на первый взгляд наиболее полно отображают сопротивление конструктивной системы при внезапном приложении нагрузок, они являются достаточно трудоемкими, требуют применения специальных конечно-элементных комплексов, в которых реализованы нелинейные динамические процедуры. Кроме того, анализ показал, что практическая реализация нелинейных динамических расчетов, в частности для железобетонных конструкций, сопряжена с рядом неопределенностей (назначение коэффициентов демпфирования, описание истории нагружения). В связи с этим при проверках конструктивных систем в особых расчетных ситуациях широко применяют квазистатические расчеты. При квазистатических расчетах модифицированных конструктивных систем необходимы обоснованные подходы как к назначению *повышающих динамических коэффициентов* для нагрузок, так и к определению критериев, принимаемых при оценках живучести.

Следует отметить, что для адекватного выполнения как динамических, так и квазистатических нелинейных расчетов необходимо, чтобы была учтена пластическая работа элементов, которая обеспечивается в общем случае врезкой пластических шарниров следующих типов:

- 1) изгибные шарниры; 2) крутильные шарниры; 3) шарниры среза.

Как было показано в работах *Vlassis* [6], для большинства конструктивных систем зданий, в частности, для которых выполнены требования, например *FEMA 356* [7], можно ограничиться врезкой лишь изгибных пластических шарниров.



Изгибные шарниры описывают при помощи зависимостей, общий вид которых показан на рис. 1, связывающих усилия и деформации (момент-угол поворота) для критических элементов.

Рисунок 1 – Диаграмма “*M – θ*” для изгибного шарнира

В соответствии с положениями, изложенными в *FEMA 356* [7], на диаграмме (см. рис. 1) выделено несколько характерных состояний конструктивной системы:

IO (Immediate Occupancy) – состояние, в котором конструктивная система сохраняет несущую способность и является устойчивой. Здание остается безопасным для использования после максимального восстановления и ремонта. Следует отметить, что для данного состояния выполняются, как правило, проверки предельных состояний несущей способности при традиционном проектировании;

LS (Life Safety) – состояние, в котором конструктивные элементы обладают некоторым остаточным сопротивлением и жесткостью. Здание может быть подвергнуто восстановлению и ремонту при соответствующем экономическом обосновании;

CP (Collapse Prevention) – состояние, в котором главные горизонтальные элементы конструктивной системы обладают малой остаточной несущей способностью и жесткостью, но вертикальные (колонны и несущие стены) функционируют. Конструктивная система обладает незначительной устойчивостью. Конструктивная система находится на стадии, предшествующей разрушению.

Параметры диаграммы “ $M - \theta$ ” определяются, как правило, по следующей схеме:

1) рассчитывают параметрические точки диаграммы “ $M - 1/\varphi$ ” (момент-кривизна) для характерных сечений элементов пространственной рамы с учетом их геометрических характеристик, характеристик свойств материалов с учетом внезапного приложения нагрузки, количества армирования принятого в строительном проекте;

2) рассчитывают параметрические точки диаграммы “ $M - \theta$ ” (момент-угол поворота) для установленных (заданных) длин пластических шарниров. Задаются свойства и контрольные точки для пластических шарниров соответствующих сечений заменяющих рам.

В общем случае углы поворота при заданном уровне нагружения получают интегрированием по длине элемента функции распределения кривизн, как это было показано в собственной работе [1].

Кроме того, к важнейшим вопросам следует отнести нормирование характеристик материалов в условиях внезапного приложения нагрузки. При выполнении расчетов конструктивных систем на прогрессирующее обрушение большинство нормативных документов, например [5], рекомендует принимать к расчетным сопротивлениям бетона и арматуры, используемым в расчетных моделях, повышающие коэффициенты, учитывающие динамическое поведение материала. В собственных исследованиях [8] были определены значения этих коэффициентов в зависимости от прогнозируемой скорости развития относительных деформаций при внезапном выключении несущего элемента с использованием зависимостей, представленных в работе [9].

Модели, применяемые при расчете модифицированных конструктивных систем. В связи с трудностями, вызванными описанием линейных пластических шарниров, необходимо зачастую прибегать к идеализации конструктивной системы рамно-связевого каркаса с монолитным диском перекрытия с использованием специальных расчетных методов:

1) пространственная модель, в которой плоский диск перекрытия моделируется системой часто расположенных перекрестных балок, параметры жесткостных характеристик которых задают по специальным правилам (*grid method*). Данная модель применима, главным образом, к регулярным системам и достаточно подробно рассмотрена, например, в работе [10];

2) модифицированная пространственная модель, состоящая из эквивалентных (заменяющих) рам, расположенных в ортогональных направлениях. В данном методе конструктивные параметры заменяющих рам, в отличие от традиционных подходов, определяются в следующем порядке:

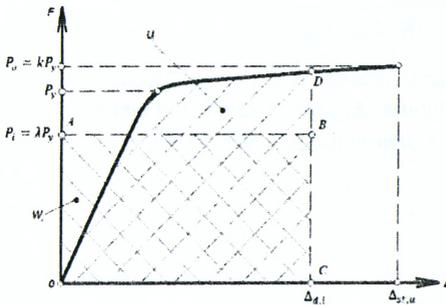
а) производится расчет диска перекрытия по конечно-элементной модели (МКЭ) на действие особых вертикальных нагрузок, равномерно-распределенных по перекрытию;

б) по установленным картам/эпюрам распределения поперечных сил определяют положения (границы) эквивалентных заменяющих рам, исходя из следующего требования: границы рамы располагаются по линиям нулевых перерезывающих сил.

Следует отметить, что в последнее время появились конечно-элементные комплексы, декларирующие возможность выполнения нелинейных расчетов для плоских плит перекрытий.

Применение положений энергетического подхода при построении нелинейных квазистатических диаграмм и установление проверочных критериев. В результате анализа существующих подходов к определению нелинейной динамической реакции конструктивной системы было установлено, что наибольшего внимания заслуживают расчетные методы проверок живучести конструктивных систем, основанные на положениях энергетического подхода. Предложенный и разработанный в собственных исследованиях [1] метод оценки живучести конструкций в особых расчетных ситуациях базируется на следующем допущении: *внезапное удаление колонны (вертикальной опоры) из конструктивной системы в соответствии с расчетным сценарием эквивалентно эффекту от внезапного приложения к модифицированной системе гравитационной нагрузки, воспринимаемой этим вертикальным элементом.* Данное допущение позволяет получать практически точные решения для систем с одной степенью динамической свободы, при значительных вертикальных перемещениях узла, в котором производится вынужденное удаление элемента.

Максимальное нелинейное динамическое перемещение конструктивного элемента системы для данного уровня нагружения может быть рассчитано из ее энергетического баланса, то есть равенства работы W_e , совершаемой внешними гравитационными силами на динамическом перемещении $\Delta_{d,i}$ и потенциальной энергии деформации (работы внутренних сил) U_e , вычисленной при этом же перемещении. Такой подход для стальных и сталебетонных конструктивных систем применялся в работах Vlassis [6].



Для основной формы колебаний изгибаемого элемента равенство работы внешних сил на максимальном вертикальном перемещении $\Delta_{d,i}$ и потенциальной энергии деформирования системы достигается тогда, когда равны площади $S_{OABC} = S_{ODC}$ (рисунок 2).

Рисунок 2 – К определению динамического перемещения $\Delta_{d,i}$ с использованием энергетического подхода

Зависимость, связывающая величину квазистатического усилия P_i и соответствующее ему максимальное динамическое перемещение на первом полупериоде колебаний, в общем случае, согласно [1, 6] имеет вид:

$$P_i = \lambda P_v = \frac{1}{\Delta_{d,i}} \int_0^{\Delta_{d,i}} F_d d\Delta_{st}, \quad (1)$$

где $\Delta_{d,i}$ – максимальное динамическое перемещение, определяемое при внезапно приложенной нагрузке уровня P_i ;

$\int_0^{\Delta_{d,i}} F_d d\Delta_{st}$ – потенциальная энергия деформации элемента конструкции при перемещении, равном максимальному динамическому перемещению $\Delta_{d,i}$.

При установленной зависимости, описывающей нелинейную статическую реакцию конструктивного элемента (или системы в целом), может быть достаточно просто перестроена зависимость, связывающая максимальные динамические перемещения с соответствующими уровнями внезапно приложенной гравитационной нагрузки “ $P_i - \Delta_{d,i}$ ”.

Анализ, выполненный в работе [1], показал, что при описании полной нелинейной диаграммы “ $F - \Delta$ ” конструктивной системы с достаточной для практики точностью может быть использована двухлинейная (билинейная) аппроксимация с наклонной ветвью на участке $[\Delta_v; \Delta_u]$.

В этом случае для построения квазистатической диаграммы достаточно установить два уровня внезапно приложенной нагрузки: P_{sd} – соответствующий динамическому перемещению $\Delta_{d,v} \equiv \Delta_{st,v}$, при котором достигаются относительные деформации текучести в растянутой арматуре (образование пластического шарнира) и P_{ud} – соответствующий предельному значению перемещения $\Delta_{d,u} \equiv \Delta_{st,u}$.

При установленной зависимости, описывающей нелинейную статическую реакцию элемента конструктивной системы, могут быть решены *задачи двух типов*:

(1) при известном (заданном) значении особой нагрузки P_i из энергетического баланса системы ($W_i = U_i$) определяют максимальное динамическое перемещение $\Delta_{d,i}$ на первом полупериоде колебаний и сравнивают полученное значение с предельным значением $\Delta_{d,u}$.

$$\Delta_{d,i} = \frac{1}{P_i} \int_0^{\Delta_{d,i}} F_d d\Delta_{st} \leq \Delta_{d,u}; \quad (2)$$

(2) при установленном из нелинейной статической диаграммы “ $F - \Delta$ ” предельном значении вертикального перемещения $\Delta_{d,u} \equiv \Delta_{st,u}$ (угла поворота $\theta_{d,u}$) из энергетического баланса системы определяют предельное значение гравитационной внезапно приложенной нагрузки P_u :

$$P_u = \frac{1}{\Delta_{d,u}} \int_0^{\Delta_{d,u}} F_d d\Delta_{st} \quad (3)$$

и проверяют критерий: $P_i \leq P_u$.

С использованием квазистатических нелинейных диаграмм можно получить значения динамических повышающих коэффициентов (*DIF*) для различных уровней нагружения λ . Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований детально изложены в работе [1].

Опираясь на результаты собственных исследований [1] и положения энергетического подхода, критерий живучести может быть сформулирован следующим образом: *модифицированная (с учетом локального повреждения (разрушения)) конструктивная система обладает требуемой живучестью в особой расчетной ситуации, если работа, совершаемая усилием, численно равным реакции в удаляемом вертикальном элементе, на предельном перемещении, имеющем место на первом полупериоде колебаний, не превышает потенциальной энергии модифицированной системы, определенной при том же вертикальном перемещении.*

Пример численного анализа конструктивной системы

Описание конструктивной системы. В качестве анализируемой конструкции за основу принят проект многофункционального торгово-развлекательного комплекса, включающего 20-этажное здание гостиницы и 6-7-этажное здание торгового центра. Здание гостиницы имеет прямоугольную форму с размерами в плане 32x48,9 м. Сетка колонн с ячейкой 8,1x8,4 м. Высота первого этажа – 5,45 м; второго - пятого этажей – 4,75 м; шестого – 5,25 м; остальных – 3,3 м. Здание гостиницы отделено от конструкций торгового центра деформационно-осадочным швом. В качестве несущей системы здания применен монолитный железобетонный каркас, состоящий из монолитных железобетонных колонн, плит перекрытий и диафрагм жесткости. В качестве диафрагм жесткости использованы монолитные железобетонные стены лестничных клеток и лифтовых холлов. Каркас является рамно-связевым. Пространственная жесткость и устойчивость каркаса обеспечена за счет совместной работы колонн, дисков плит перекрытия и диафрагм жесткости.

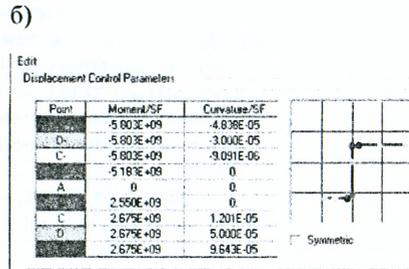
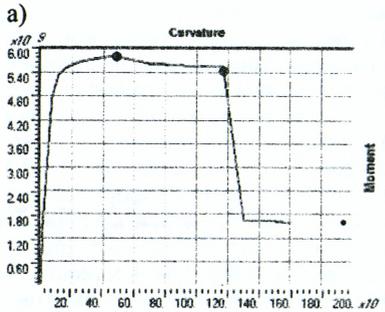
Перекрытие над 1-5 этажами характеризуется большими выносами консолей (до 5,5 м). Проектом предусмотрено увеличение толщины плиты ($h=600$ мм) в зоне консольных участков и устройство плит со строительным подъемом. Схемы армирования были приняты в соответствии с проектом.

Выбор расчетной схемы и метода расчета конструктивной системы. В соответствии с требованиями ТКП EN 1991-1-7 [2] для выбора стратегии защиты конструктивной системы от прогрессирующего (непропорционального) обрушения произвели первичную оценку здания, отнеся его к соответствующему классу по последствиям обрушения. Было установлено, что здание относится к 3 классу, и для такой системы оценка живучести выполняется на основе углубленного анализа с привлечением нелинейных квазистатических и динамических расчетных моделей при применении метода альтернативных путей передачи нагрузки (АТ-метод). В рамках этого метода производится удаление ключевых несущих элементов конструктивной системы.

Для выполнения нелинейных расчетов рамно-связевого каркаса с монолитным диском перекрытий был проанализирован ряд расчетных моделей. Учитывая то обстоятельство, что метод сеток (*grid method*) [10] применяется, главным образом, к регулярным системам, а рассматриваемая конструктивная система этому требованию не удовлетворяет (в частности для пониженной части гостиницы с выступающими консольными элементами этажей), к расчету была принята расчетная модель модифицированной пространственной эквивалентной рамы.

Для описания механических свойств материалов заменяющих рам (бетона, стали) были приняты трансформированные диаграммы деформирования, полученные с учетом динамического приложения нагрузки, согласно [8, 9]. Армирование сечений заменяющих рам принимали согласно схемам армирования, назначенным в базовом проекте в пределах участков, выделенных линиями нулевых перерезывающих сил.

Перед выполнением нелинейных статических и динамических расчетов в элементы конструктивной системы, по определенным правилам, были врезаны изгибные пластические шарниры. На рисунке 3 представлены зависимости “ $M - 1/\varphi$ ” (момент-кривизна) для сечений и “ $M - \theta$ ” (момент-угол поворота) для описания свойства конкретного пластического шарнира в соответствии с правилами, изложенными выше. Аналогично должна быть выполнена врезка пластических шарниров во всех конструктивных элементах, в зависимости от их свойств и схем армирования.



а) диаграмма “момент-кривизна”; б) описание свойств изгибного пластического шарнира
 Рисунок 3 – К определению характеристик пластических шарниров

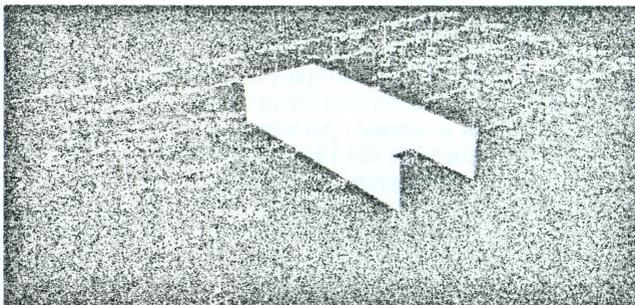


Рисунок 4 – Расчетная схема типowego этажа конструктивной системы с врезанными по правилам изгибными пластическими шарнирами

После задания свойств изгибных пластических шарниров и врезки в соответствующие элементы заменяющей рамы (см. рис. 4), выполняли нелинейные статические и динамические расчеты (NLS и NLD).

Нелинейный статический расчет (NLS).

Полную нелинейную реакцию модифицированной конструктивной системы с удаленными вертикальными элементами рассчитывали по следующей схеме:

1. Прикладывали сосредоточенную силу в узел с удаленным вертикальным несущим элементом (колонной).
2. Пошагово увеличивали сосредоточенную силу от нуля до максимального значения, соответствующего достижению максимальных вертикальных перемещений равных предельных $\delta_{max} = \delta_u$ (аналогично $\Delta_{max} = \Delta_u$, согласно рис. 2).

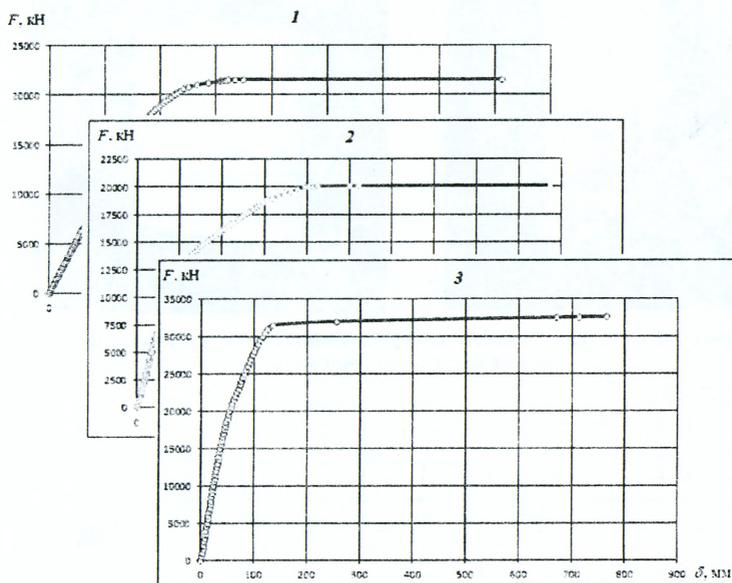
По результатам нелинейного статического расчета получали диаграмму “F- δ ” (либо “F- Δ ”, согласно рис. 2), описывающую нелинейную реакцию системы для удаляемого элемента.

Параметрические точки диаграммы “F- δ ”, полученные из нелинейного расчета представлены в табл. 1, а на рис. 5 показаны графики нелинейных реакций конструктивной системы для соответствующих случаев модифицированных систем с активированными пластическими шарнирами (достижение предельных значений углов поворотов, кривизн, перемещений) для случая внезапного выключения соответствующего ключевого элемента.

Таблица 1 – Параметрические точки диаграммы, полученные из нелинейного статического расчета (NLS) (см. рис. 5)

№ п./п.	Положение удаляемого элемента	Параметрические точки диаграммы "F-δ"			
		F_y , кН	F_u , кН	δ_y , мм	δ_u , мм
1	Угловая колонна	21200	21565	285	812
2	Крайняя колонна	12800/ 20000*	20110	105/395	972
3	Средняя колонна (под высотн. частью)	31000	32600	126	765

* два значения указаны для случая последовательного достижения значения δ_y в пластических шарнирах, обладающих разными свойствами



1 – при удалении угловой колонны; 2- при удалении средней крайней колонны; 3- при удалении центральной колонны

Рисунок 5 – Графики нелинейных реакций модифицированных конструктивных систем

На основе положений энергетического подхода, из графиков, описывающих нелинейные статические реакции (см. рис. 5) были перестроены квазистатические диаграммы, представляющие собой максимальную динамическую реакцию конструктивной системы при внезапном приложении гравитационной нагрузки. На рис. 7 представлен пример построения динамической диаграммы для случая удаления угловой колонны. Предельные значения квазистатических нагрузок для соответствующих схем удаления и значения динамических коэффициентов показаны в табл. 2.

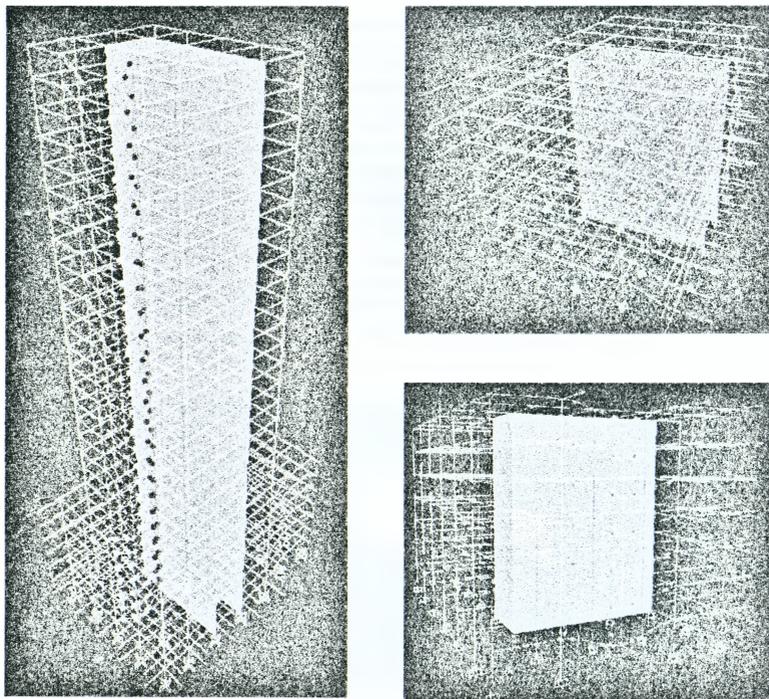
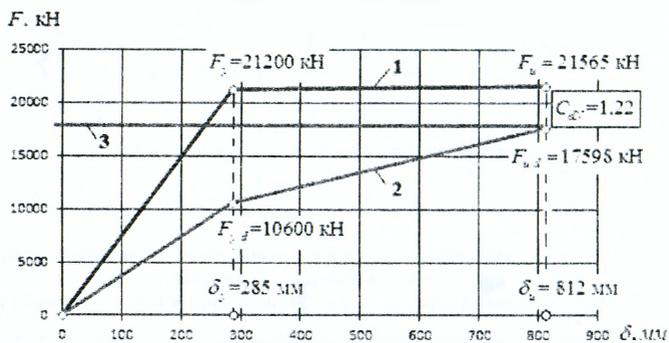


Рисунок 6 – Расчетные схемы модифицированных конструктивных систем в предельном состоянии



1 – график нелинейной реакции; 2 – квазистатическая диаграмма;
3 – уровень предельно-допустимой квазистатической нагрузки

Рисунок 7 – Пример построения квазистатической диаграммы “ $F - \delta$ ” для случая удаления угловой колонны

Согласно правилам ТКП EN 1991-1-7 [2], на площади потенциального обрушения (см. таб. 2, графа (3)) действует особая квазистатическая нагрузка $E_d = C_{dN} [G_k + 0.5Q_k]$ (значения C_{dN} принимаем согласно табл. 2, в расчете прини-

мают характеристические значения постоянных и переменных нагрузок). На оставшейся площади перекрытия следует прикладывать вертикальную нагрузку без учета динамического коэффициента $E_d = G_k + 0,5Q_k$.

Таблица 2 – Значения параметрических точек квазистатической диаграммы и динамических коэффициентов

№ п.п.	Удаляемый элемент/ положение	Потенциальная площадь обрушения, заключенная между осями в направлении x/y.	Параметрические точки динамической (квазистатической) диаграммы "F – δ"				Динамический коэффициент, $C_{dN} = \frac{F_k}{F_{u,d}}$ F_u (таб.1)
			$F_{v,d}$, кН	$F_{u,d}$, кН**	$\delta_{v,d}$, мм	$\delta_{u,d}$, мм	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	Угловая колонна/ А1-1	конс.*- 2/ конс. - В1	10600	17598	285	812	1,22 (рис. 7)
2	Крайняя средняя колонна/ Е1-1	конс. - 2/ В1 - К1	6400/ 13741	17489	105/ 395	972	1,15
3	Центральная колонна/ Е1-2	1-3/ В1-К1	15500	29115	126	765	1,12

*- край консольного участка плиты перекрытия в направлении соответствующих осей (x, y)
**- $P_{u,d}$ соответствует уровню предельно-допустимой квазистатической нагрузки (критерий)

Таблица 3 – Проверка критерия живучести конструктивной системы по предельно-допустимому значению квазистатической нагрузки

№	Положение удаляемого элемента	Проверка критерия живучести $R < F_{u,d}$		
		Уровень предельно-допустимой нагрузки $F_{u,d}$, кН	Реакция в потенциально удаляемом элементе R , кН	Выполнение/ невыполнение критерия проверки живучести
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Угловая колонна	17598	12649	выполняется
2	Крайняя средняя колонна	17489	9422	выполняется
3	Центральная колонна	29115	12097	выполняется

В узлах рамы действует особая горизонтальная нагрузка $E_{LIT} = 0,002 \sum P$, где P – суммарное значение характеристических постоянных и переменных нагрузок, действующих на перекрытие данного этажа $G_k + 0,5Q_k$.

Сравнение уровня предельно-допустимой квазистатической нагрузки и соответствующей определенному случаю модификации конструктивной системы реакции в потенциально удаляемой колонне представлено в табл. 3.

Нелинейный динамический расчет (NLD)

При выполнении нелинейного динамического расчета важнейшей задачей является определение параметров истории нагружения. Историю нагружения принимали в виде двухлинейной диаграммы в удаляемом элементе (см. рис. 8). Коэффициент демпфирования был принят равным 5%, а время выключения вертикального элемента – $(1/10)T$ (T – собственный период колебаний, определенный из модального анализа). Динамическая нагрузка принималась равной реакции в потенциально удаляемом элементе от особого сочетания нагрузок $E_d = G_k + 0,5Q_k$.

Нелинейный динамический расчет выполняли по следующей схеме:

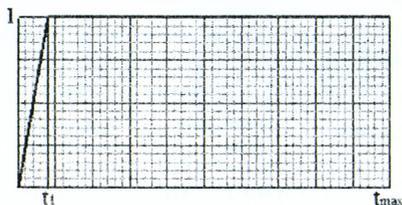
1. Для определения реакции в удаляемом элементе производили статический расчет немодифицированной системы на особое сочетание нагрузок $E_d = G_k + 0,5Q_k$.

2. В узле с удаляемым элементом прикладывали сосредоточенную силу в соответствии с историей, показанной на рис. 8. В качестве исходного состояния принимали недеформированную конструктивную систему. Это допустимо вследствие того, что прогибы в конструктивных элементах от особого сочетания характеристических значений нагрузок пренебрежимо малы по сравнению с максимальными прогибами при динамическом приложении нагрузки. В анализе рассматривается динамическое перемещение узла, к которому примыкает удаляемый элемент, для которого исходное недеформированное состояние конструктивной системы также можно считать допустимым.

3. Фиксировали максимальное динамическое перемещение на первом полу-периоде колебаний (интерфейс расчетного модуля показан на рис. 9) и сравнивали его с предельно допустимым перемещением узла, определенным из нелинейного статического расчета (NLS) (таблица 1,2).

4. Делали вывод о выполнении/невыполнении критерия живучести конструктивной системы по допустимым значениям перемещений при выключении несущего элемента.

На рис. 9 представлен пример графика колебаний для модифицированной конструктивной системы с установленным максимальным уровнем динамического перемещения (122 мм при максимально-допустимом значении перемещения 812 мм (таблица 1,2)).



$SF=R/R_1$ – масштабный коэффициент; значение $SF=1$ соответствует полному значению динамической нагрузки (реакции в удаляемом элементе от особого сочетания нагрузок),
 t_1 – время, за которое динамическая нагрузка полностью передается в узел,
 t_{max} – отрезок времени, на котором производится исследование колебательного процесса после передачи динамической нагрузки в узел

Рисунок 8 – История нагружения при выполнении нелинейного динамического расчета в SAP2000

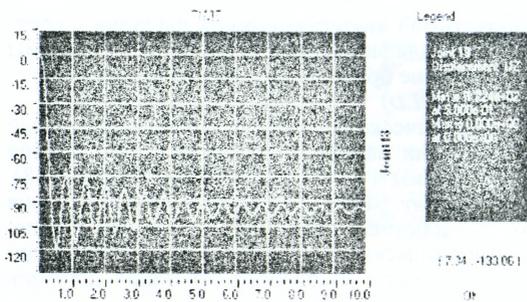


Рисунок 9 – Интерфейс расчетного модуля при нелинейном динамическом расчете. График колебательного процесса при удалении несущего элемента (угловой колонны) (время указано в секундах, перемещение узла – в миллиметрах)

Заключение. Разработанный метод, основанный на положениях энергетического подхода, позволяет производить адекватную оценку живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях без необходимости привлечения трудоемких и обладающих рядом неопределенностей моделей.

Как показали проверочные расчеты модифицированной конструктивной системы в особой расчетной ситуации с использованием нелинейного квазистатического и нелинейного динамического анализа, живучесть конструктивной системы в особой расчетной ситуации обеспечена в соответствии с требованиями ТКП EN 1991-1-7 [2] и ТКП 45-3.02-108-2008 [3].

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур, А. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01/ А.В. Тур. – Брест, 2012. – 228 с.
2. General Actions – Accidental Actions (ТКП EN 1991-1-7 – Общие воздействия. Часть 7. – Особые воздействия): EN 1991-1-7.
3. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108-2008. – Минск, 2008. – 178 с.
4. Eurocode 0. Basic of Structural Design: EN 1990:2001. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001.
5. UFC – 023 – 03 (Unified Facilities Criteria) – Design of Buildings to Resist to Progressive Collapse, Jan., 2005-215 p.
6. Vlassis, G. Progressive collapse assessment of tall buildings/ G. Vlassis. - London, 2009. - 416 p.
7. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency (FEMA) 356, November, 2000. – 561 p.
8. Тур, А. В. К построению трансформированных диаграмм деформирования бетона и арматуры с учетом скорости изменения относительных деформаций при нагружении/ А. В. Тур// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сборник трудов XVII Междунар. научно-методического семинара, Гродно, 17-19 сентября 2010 г.; редкол.: Т.М. Пецольд (отв. ред.), Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 184-189.
9. Ngo T., Mendis P. Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview// EJSE Special Issue: Loading on Structure – 2007 – P. 76-91.
10. Tian Y., Chen J., Said A. Nonlinear modeling of flat-plate structures using grid beam elements/ Computers and Concrete, Vol. 10, No. 5, 2012. - P. 491-507.
11. Тур, А.В. К расчету повышающих динамических коэффициентов, применяемых при нелинейных расчетах железобетонных элементов в условиях внезапного приложения нагрузки / А.В. Тур, В.В. Тур // Ресурсоэкономни матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. н. пр / Под ред. Бабица Е.М. – Рівне, 2012. – №24. - С. 282–290.

УДК 624.074.28

Тур В.И., Тур А.В.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЕТЧАТОГО КУПОЛА

Сетчатые купола – это перспективные конструкции, обладающие хорошими технико-экономическими показателями и высокой архитектурной выразительностью.

Узловые соединения сетчатых куполов оказывают значительное влияние на их характеристики. Именно от конструкции узловых соединений в значительной мере зависит трудоемкость возведения купола. Известно также, что масса узлов купола может достигать величины в 40% от массы его стержневых элементов.

Одним из путей повышения технико-экономических показателей куполов является применение в их конструкции тонкостенных холодногнутых профилей.