

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАРНИРОВ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ЗДАНИЙ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ОГНЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Л.А. АВETИСЯН, канд. тех. наук, доцент
ФГБОУ ВО "Национальный Исследовательский Московский Государственный
Строительный Университет" (НИУ МГСУ);
г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, avetisyanlevon@inbox.ru

В статье приводятся исследования прочности 25-этажного железобетонного каркаса при прогрессирующем обрушении в условиях огневых воздействий. Принимая углы раскрытия шарниров пластичности, как нормирующие для условия прочности железобетонных элементов, была разработана методика ЭВМ, встроенная в PRMathematica 10, для динамического расчета сжатых железобетонных элементов при огневых воздействиях на основе проведенных экспериментальных исследований.

Произведен нелинейный динамический анализ 25-этажного железобетонного каркаса с учетом изменения динамических характеристик железобетонных элементов при пожаре и дана оценка стойкости каркаса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонная колонна, шарниры пластичности, динамическая прочность, прогрессирующее обрушение, огневые воздействия

Сценарии возникновения динамического нагружения в высотных зданиях бывают различными [1,2,3]. В данной статье анализируется наиболее опасный сценарий: мгновенное удаление одного несущего элемента в условиях огневых воздействий. Оставшиеся колонны работают при динамически нарастающей нагрузке [4].

В настоящее время расчет конструкций на динамические нагрузки производится по методу предельных состояний - по несущей способности (предельные состояния первой группы).

При расчете по первой группе рассматриваются три случая достижения предельного состояния: 1а, 1б, 1в (см. рис.1а) [5]. Поскольку аналитически построенные диаграммы деформации, которые имеют криволинейное очертание, выразить одной общей функцией сложно, в дальнейшем будем использовать упрощенную диаграмму "М-1/г" в виде ломаной линии, состоящей из трех прямых (см. рис. 1 б)).

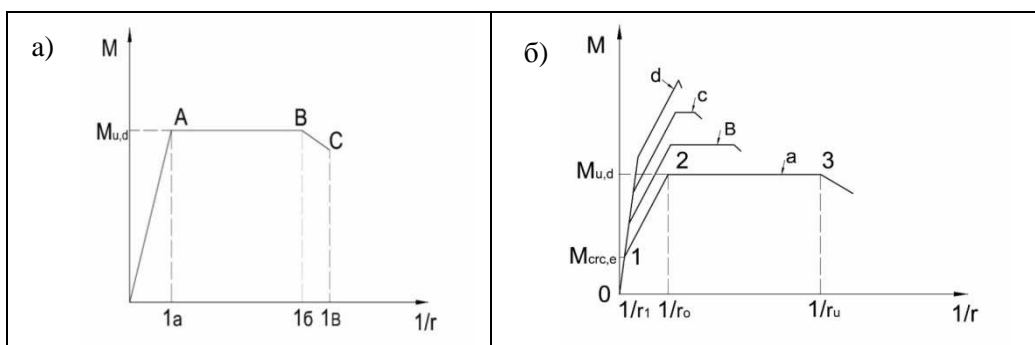


Рис. 1. а) Диаграмма момент-кривизна и предельные состояния, возникающие в элементе, б) Диаграммы деформаций внецентренно сжатых элементов, при различных эксцентриситетах: диаграмма "а" – эксцентриситет e_{01} ; "в" – эксцентриситет e_{02} ; "с" – e_{03} ; "д" – e_{04} ; $e_{04} < e_{03} < e_{02} < e_{01}$

Исследования показывают, что нормировать предельное состояние 1б (см. рис. 1) внецентренно сжатых элементов более удобно по пластическим углам раскрытия в шарнирах пластичности, возникающих за время работы конструкции только в пластической стадии.

Условие прочности конструкции (при образовании в ней n шарниров пластичности) принимает вид:

$$\psi_i \leq \psi_{i,u} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (1)$$

Здесь ψ_i и $\psi_{i,u}$ - пластические углы раскрытия в i -ом шарнире пластичности, полученном из динамического расчета в пластической стадии.

Для расчета величин углов раскрытия пластичности при разных температурах пожара при динамическом нагружении была разработана методика ЭВМ, встроенная в PRMathematica 10, на основе проведенных экспериментальных исследований [6,7].

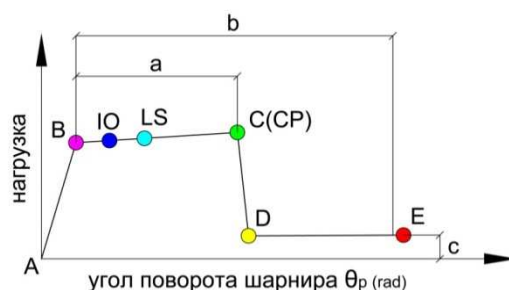


Рис.2. График зависимости угла поворота (раскрытия) пластического шарнира от нагрузки

Определенный интерес представляет задача определения температуры, при которой коэффициент динамичности по материалу будет равен статическому коэффициенту редукции при пожаре $K_{dt} = \gamma_t$. Этот момент является исходной точкой развития опасной зоны работы колонны при динамическом нагружении.

На рис. 2 показан угол поворота пластического шарнира от величины нагрузки согласно FEMA 356.

Развитие угла пластического шарнира делится на стадии:

1) $A \triangleright B$ - упругая стадия; 2) $B \triangleright C$ - пластическая стадия; нагрузка, приводящая к образованию пластического шарнира может не привести к разрушению в зависимости от:

- 2а) IO – прямое нагружение;
- 2б) LS –безопасная стадия;
- 2в) CP –предупреждениеразрушения;
- 3) $C \triangleright D$ – остаточный резерв;
- 4) $D \triangleright E$ – полное разрушение.

Разработанная методика позволяет использовать программный комплекс Sap 2000 при расчете многоэтажного каркаса (см. рис.3) и проводить нелинейный динамический расчет сжатых железобетонных элементов с помощью метода Ньютона-Рафсона при разных температурах нагрева, получить величину углов раскрытия шарниров пластичности в разных стадиях деформирования элемента.

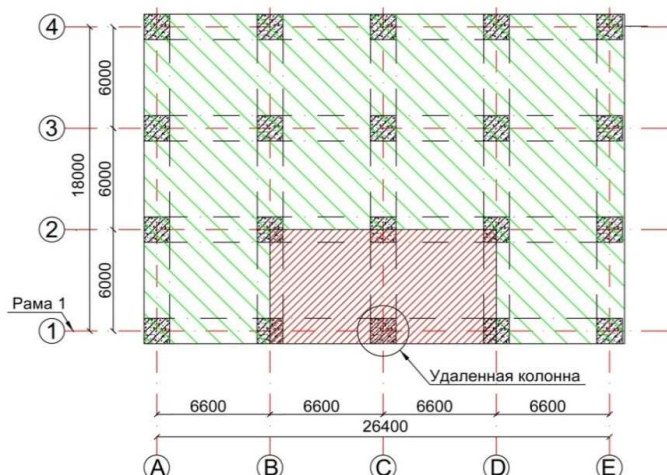


Рис.3. План первого этажа 25-ти этажного каркасного железобетонного здания

Моделирование мгновенного удаления колонны в каркасе здания (см. рис. 4) производится с помощью исключения сил и моментов, действующих над удаляемым элементом, в практике аналогичные силы/моменты прикладываются в противоположном направлении.

Скорость удаления колонны в программе Sap 2000 задается функцией времени. Время удаления колонны принимается меньше 1/10 величины моды периода вертикального колебания здания, которая определяется после проведения нелинейного статического расчета здания, после удаления одного из вертикальных несущих элементов каркаса здания.

Для реальных взрывов время разрушения конструктивного элемента очень короткое (несколько миллисекунд), для удаления колонны принимается близким к нулю (5 мс.), что означает квазимгновенное удаление.

Результаты показали, что наиболее неблагоприятные динамические эффекты возникают, когда колонна разрушается в течение времени близким к нулю (меньше 5 мс.). Динамический отклик каркаса исследуется в определенном промежутке времени при $t=3,0$ сек. Согласно стандарту FEMA 356 все конструктивные элементы достигают нового статического равновесия после трех секунд.

Производя модальный анализ, определяем номер моды и соответствующую величину периода вертикального колебания каркаса (см. рис. 4).

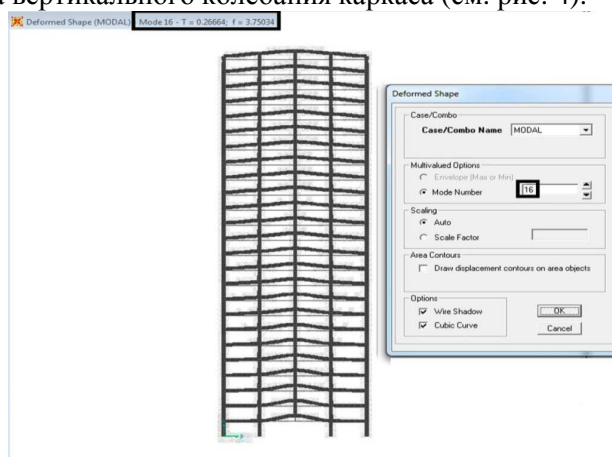


Рис. 4. Величина моды вертикального колебания железобетонного каркаса после удаления колонны С-1

1/10 часть моды вертикального колебания определяет скорость назначения обратной динамической нагрузки в верхнем узле удаленной колонны.

Произведенный нелинейный статический анализ позволяет выявить, что разрушение при удаленной колонне не происходит (стойкость обеспечена), т.е. можно приступить к нелинейному динамическому расчету железобетонного каркаса: $T = 0,16c \Rightarrow t_{dyn} = 0,016c$.

С использованием разработанной методики ЭВМ посчитаем разрушающие нагрузки железобетонных колонн каркаса 25-этажного здания при разных температурах пожара (см. табл.1).

Таблица 1. Величины динамических разрушающих нагрузок железобетонных колонн при разных температурах пожара

Температура ($^{\circ}C$)	Разрушающая (кН)
$T = 20$	$N_{dyn,T=20^{\circ}C} = 11184,2$
$T = 500$	$N_{dyn,T=500^{\circ}C} = 4496,148$
$T = 900$	$N_{dyn,T=900^{\circ}C} = 2567,9$

По нелинейному статическому расчету нагрузка,приходящаяся на колонну первого этажа по координате 1-С, равна 7003 кН.После определения моды вертикального колебания здания (из которого определяем скорость приложения динамической нагрузки) задаем данную нагрузку снизу-вверх(см. рис 5)и выполняем нелинейный динамический анализ здания в нормальных условиях $T = 20^{\circ}C$ (рис.6)и при температурах $500^{\circ}C$, $900^{\circ}C$ (рис.7 и рис. 8), с помощью ПК Sap 2000 версии 12.Задание динамической нагрузки в программном комплексе Sap 2000 производится с помощью функции TimeHistory.

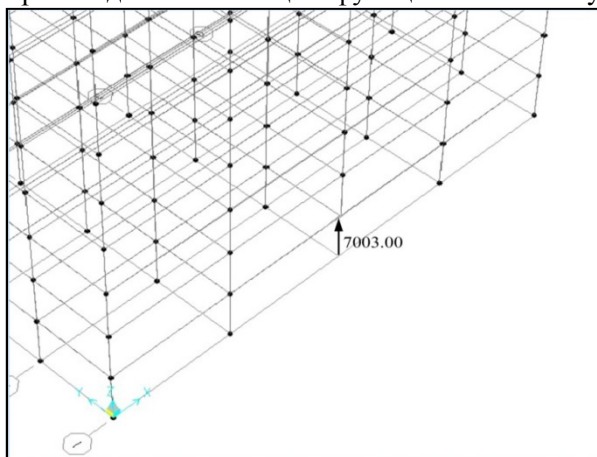


Рис.5. Назначение вертикальной нагрузки в верхнем узле удаленного элемента

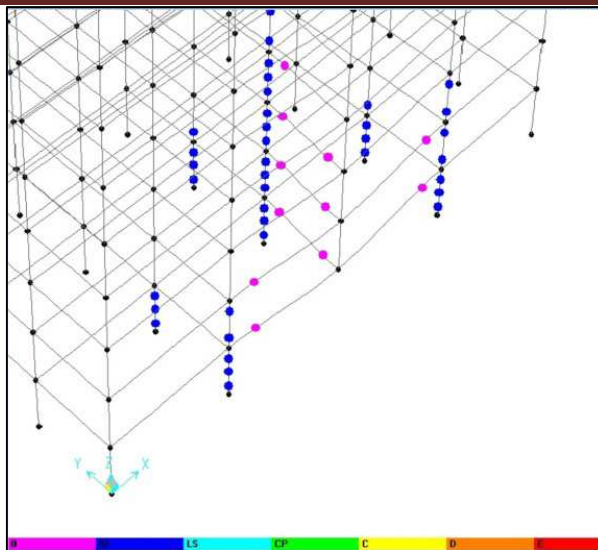


Рис. 6. Состояние пластических шарниров при температуре: $T=20^{\circ}\text{C}$

Максимальный угол раскрытия шарниров пластичности ($\psi_{\max T}$), определяющий состояние деформирования «ключевых» элементов, находится в состоянии LS -безопасная стадия (при $T=20^{\circ}\text{C}$ и $T=500^{\circ}\text{C}$).

На рис. 8 показано состояние пластических шарниров после нелинейного динамического анализа здания при $T=900^{\circ}\text{C}$, в данном случае разрушение в колоннах фиксируется при нагрузке $P = 5178\text{kH}$.

Аналитический и численный анализ колонн 25-этажного каркасного железобетонного здания показывает, что стойкость каркаса при прогрессирующем обрушении, когда температура пожара $T=900^{\circ}\text{C}$, не обеспечена, о чем свидетельствует наличие недопустимых деформаций в шарнирах несущих элементов здания - стадия E на рис. 8.

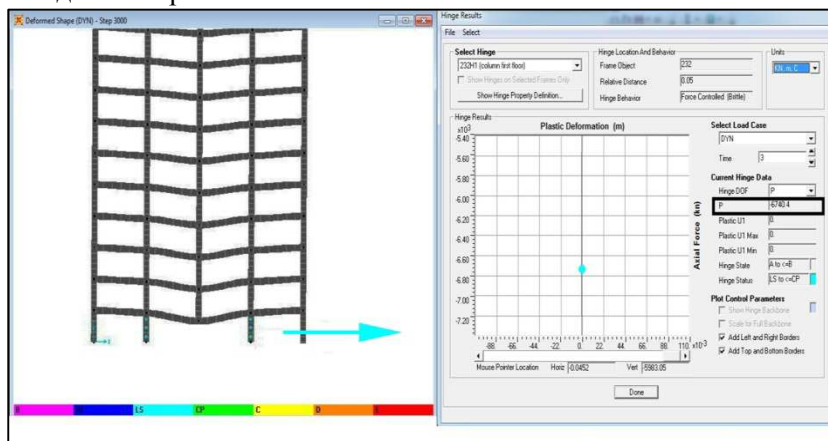


Рис. 7. Состояние пластических шарниров при температуре: $T=500^{\circ}\text{C}$

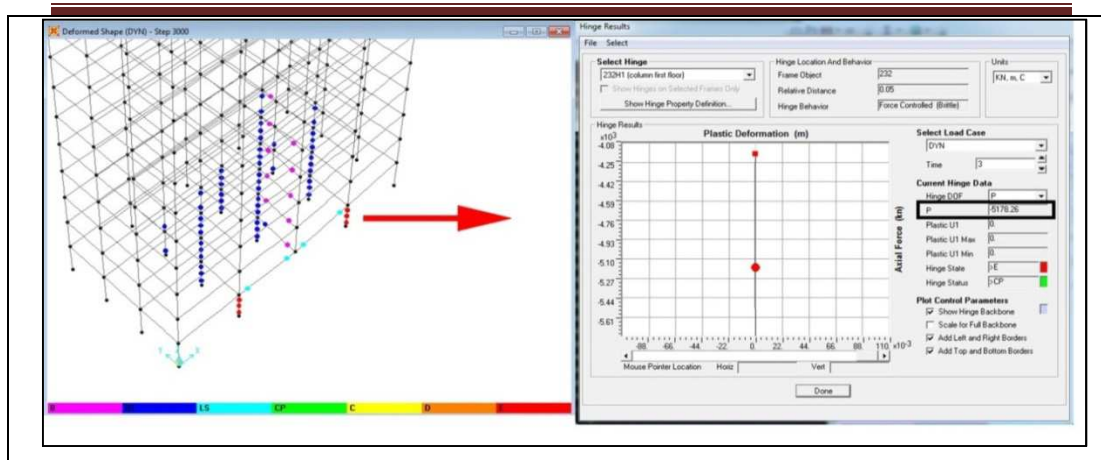


Рис. 8. Состояние пластических шарниров при температуре $T= 900^{\circ}C$

Таким образом, расчет здания при разных термосиловых воздействиях с использованием шарниров пластичности, при расчете которых используются изменения статических и динамических прочностных свойств составляющих материалов, позволяют более точно оценивать сопротивляемость зданий прогрессирующему разрушению.

Исследование железобетонного каркаса в нормальных условиях и в условиях огневых воздействий показывает, что повышение температуры при пожаре приводит к снижению динамической прочности несущих элементов значительно больше, чем статической прочности: при $T= 900^{\circ}C$, динамическая прочность составляет 46% статической прочности.*

* Работа опубликована по рекомендации оргкомитета Молодежного международного научно-практического семинара молодых ученых и студентов «Современные исследования в области прикладных инженерных наук», 6-8 декабря 2016 г., грант РФФИ №16-38-10439 мол_2.

Л и т е р а т у р а

1. Курлапов, Д. В. Воздействие высоких температур пожара на строительные конструкции//Инженерно-строительный журнал, №4, 2009. – С.41–43.
2. Милованов, А.Ф. Огнестойкость и огнесохранность зданий и сооружений. Промышленное и гражданское строительство, №9, 2002. – С.39–40.
3. Mindeguia, J.C., Carré, H., Pimienta, P. & LaBorderie, C. "Nouvelletechnique demesuresdes deformation sradialesdubéton à hautestempératures", In RencontresUniversitaires de Génie Civil. LaGrandeMotte. June 1-2, 2006. Pp. 44– 49.
4. Тамразян А.Г. К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение. Бетон и железобетон, 2001, № 5. – С.8.
5. Тамразян А.Г. Особенности работы высотных зданий// Жилищное строительство. 2004, № 3. – С.19– 20.
6. Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures Procedia Engineering. № 153 (2016) Vol.721– 725
7. Тамразян А. Г. Динамический расчет сжатых железобетонных элементов с учетом огневых воздействий/А. Г. Тамразян, Л. А. Аветисян // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615847. Зарегистрировано в Государственном реестре РФ программ для ЭВМ 26 мая 2015 года.
8. Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A. Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations

of loads 5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" Volume 86, 2016.

References

1. *Kurlapov, D.V.* Vozdeystvie vysokikh temperatur pozhara na stroitel'nye konstruksii. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal, №4, 2009, s.41–43.
2. *Milovanov, A.F.* Ognestoykost' i ognesokhrannost' zdaniy i sooruzheniy. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo, №9, 2002, s. 39–40.
3. *Mindeguia, J.C., Carré, H., Pimienta, P. & LaBorderie, C.* "Nouvelle technique de mesure des déformations radiales du béton à hautes températures", In Rencontres Universitaires de Génie Civil. La Grande Motte. June 1-2, 2006, pp. 44-49.
4. *Tamrazyan A.G.* K otsenke riska chrezvychaynykh situatsiy po osnovnym priznakam ego proyavleniya na sooruzhenie. Beton i zhelezobeton, 2001, № 5, s. 8.
5. *Tamrazyan A.G.* Osobennosti raboty vysotnykh zdaniy // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2004, № 3, s. 19-20.
6. *Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A.* Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures, Procedia Engineering, № 153, 2016, Vol. 721–725
7. *Tamrazyan A.G.* Dinamicheskiy raschet szhatykh zhelezobetonnykh elementov s uchetom ognivykh vozdeystviy / A. G. Tamrazyan, L. A. Avetisyan // Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2015615847. Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reestre RF programm dlya EVM 26 maya 2015 goda.
8. *Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A.* Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads 5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" Volume 86, 2016.

USING PLASTIC HINGES IN THE CALCULATION OF THE BUILDINGS ON THE PROGRESSIVE COLLAPSE UNDER FIRE EXPOSURE

Levon Avetisyan

Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337

In this article, the study of the strength of a 25-storey reinforced concrete frame against progressive collapse under fire conditions is presented. Taking the angles of disclosure of plastic hinges as norming for the strength of reinforced concrete elements, a computer technique program has been developed, included in PR Wolfram Mathematica 10 for the dynamic calculation of compressed reinforced concrete elements under fire exposure on the basis of the conducted experimental studies. Dynamic calculation of the strength of eccentrically compressed reinforced concrete columns was carried out, working in normal conditions and under high temperatures. The diagram «moment-curvature» and the graph of change of the static and dynamic strength of the column depending on the temperature were developed. Nonlinear dynamic analysis of a 25-storey reinforced concrete frame was conducted, taking into account the changes of the dynamic characteristics of reinforced concrete elements under fire and, the estimation of resistance of the frame was given.

Key words: reinforced concrete column, plastic hinges, dynamic strength, progressive collapse, fire exposure.