

К вопросу о работе несущих конструкций многоэтажного здания из монолитного железобетона с учетом прогрессирующего обрушения

Болаболов А.Л.

(Научный руководитель – Зверев В.Ф.)

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 12 июня 2008 г. № 197 утвержден и введен в действие ТКП 45-3.02-108-2008 «Высотные здания. Строительные нормы проектирования» [1]. Согласно Приложению Е п.1.1, высотные здания должны быть защищены от прогрессирующего обрушения в случае локального разрушения несущих конструкций в результате возникновения чрезвычайных ситуаций при действии аномальных (особых) воздействий. Действие данного документа распространяется на вновь строящиеся высотные жилые и общественные здания, к которым относятся, здания жилого назначения высотой от 75 до 100 м включительно, общественного и многофункционального назначения высотой от 50 до 200 м включительно. Однако опыт показывает, что выключение из работы элементов конструкций вследствие повреждений в результате возникновения аварийной ситуации нередко может привести к так называемой "цепной реакции", независимо от этажности и высотности. Данный факт ставит вопрос о возможной необходимости проведения расчетов на прогрессирующее обрушения и для зданий, не оговоренных в вышеуказанном нормативном документе.

Рассмотрим односекционное здание повышенной этажности с внутренними несущими стенами из монолитного бетона и монолитным перекрытием, имеющее размеры в плане в осях 1-6/А-Е – 23,4×28,2 м. Высота здания без учета технического этажа составляет 74,5 м. Фрагмент плана первого этажа приведен на рисунке 1,а. Для расчета используется программный комплекс Scad Office 11.5, позволяющий работать с пространственными расчетными моделями, что является необходимым условием для выполнения расчетов, связанных с возможным прогрессирующим обрушением. Конструктивная схема 23-ти этажного жилого дома с несущими монолитными

ми стенами определяет его расчётную схему, которая принимается в виде системы пластин, с предварительно нанесенной на них сеткой конечных элементов, жёстко соединённых между собой в узлах. Производится разбивка здания проектными осями: цифровыми 1 – 6, буквенными А – Е, по высоте в диапазоне от $-2,650$ до $+74,500$. Это делается с целью удобства дальнейшего фрагментирования расчетной модели, что позволит упростить графический анализ и сделать его более наглядным. Расчетная модель здания представлена на рисунке 1,б.

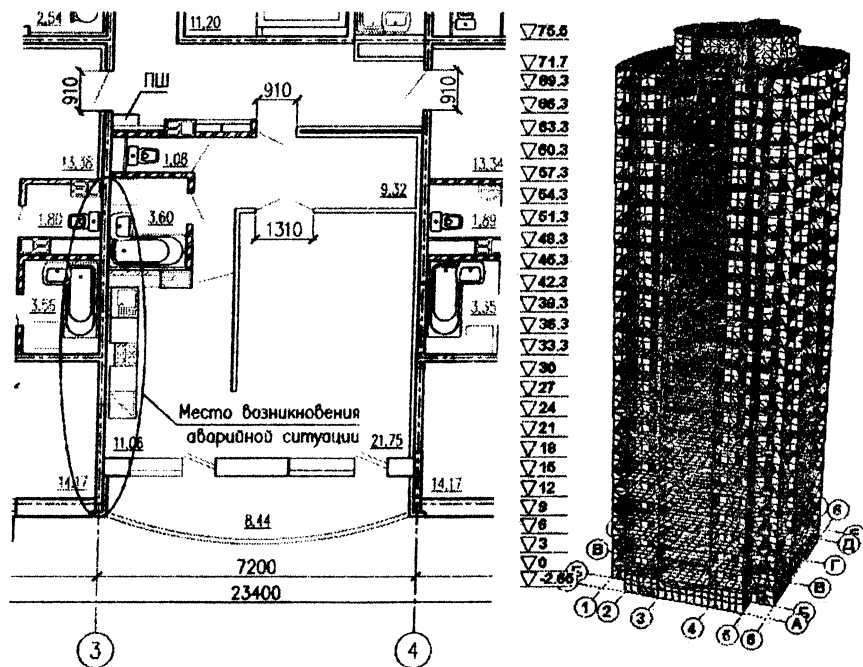


Рисунок 1. а – фрагмент плана 1-го этажа; б – расчетная 3D модель

Вычислительный комплекс реализован как интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций на основе метода конечных элементов и позволяет определить напряженно-деформированное состояние конструкций от статических и динамических воздействий, а также выполнить ряд функций проектирования элементов конструкций. Опираясь на опыт проектирования,

Элементам задается тип жесткости в зависимости от характера их работы и деформирования. Нагрузки, действующие на здание, приложим их к расчетной схеме в соответствующих направлениях. Согласно приложению А источника [2] линейный расчет по 1-ой группе предельных состояний производится на следующие сочетания нагрузок:

— первое основное сочетание

$$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{i=1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i};$$

— второе основное сочетание

По 2-ой группе предельных состояний:

$$\sum_j \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{i=1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

$G_{k,j}$ – нормативные значения постоянных нагрузок;

$Q_{k,i}$ – нормативное значение доминирующей переменной нагрузки;

$Q_{k,i}$ – нормативные значения сопутствующих переменных нагрузок;

$\gamma_{G,j}$ – частный коэффициент безопасности для постоянных нагрузок;

$\gamma_{Q,i}$ – то же, для переменных нагрузок;

$\psi_{0,i}, \psi_{2,i}$ – коэффициенты сочетаний переменных нагрузок;

ξ – коэффициент уменьшения для неблагоприятно действующей постоянной нагрузки, принимаемый равным 0,85.

Результаты данного расчета будут использованы для сравнительного анализа полученной картины НДС системы.

При проверке сопротивления конструктивной системы здания прогрессирующему обрушению применяют следующие расчетные методы:

— метод связевых усилий;

— метод альтернативных траекторий (АТ-метод).

На практике чаще прибегают к АТ методу, сущность которого заключается в вынужденном удалении несущих конструктивных элементов из расчетной схемы по определенным правилам. Он применяется в следующих расчетных ситуациях:

— когда вертикальный конструктивный элемент не обеспечивает 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;

— когда выполняется расчет конструктивных систем, имеющих высокий уровень защиты (к ним относятся высотные здания).

С целью получения зоны обрушения, предположим, что аварийная ситуация имеет место в кухонном блоке первого этажа. Получим частичное разрушение несущей стены по оси 3 и верхнего междуэтажного перекрытия. Так как, область возможного обрушения ограничивается п.3.1.2.7 Приложения Е нормативного документа [1], то проверяется условие:

$$A_{обр} = 5,21 \cdot 3,52 = 18,33 \text{ м}^2 \leq 0,3 \cdot A_{перекр} = 0,3 \cdot 659,88 = 197,96 \text{ м}^2 \leq 140 \text{ м}^2$$

Условие выполнено. Разрушение перекрытия, расположенного ниже удаляемого элемента, не допускается. На рисунке 2 покажем искомый фрагмент расчетной модели до и после обрушения.

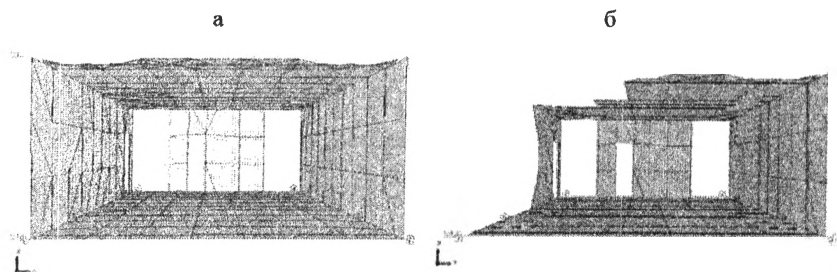


Рисунок 2. Искомый фрагмент расчетной схемы: а – до обрушения; б – после

При линейном статическом расчете конструкций всех типов по АТ-методу пользуются нормативными значениями нагрузок в следующем расчетном сочетании для пролетов конструкций, расположенных выше удаленного конструктивного элемента:

$$(0,9 \text{ или } 1,2) \cdot G_d + (0,5 \cdot Q_k + 0,2 \cdot S_k) + 0,2 \cdot W_k$$

Для оставшихся конструкций применяется основное сочетание нагрузок по Приложению А [2]. Удаленный конструктивный эле-

мент далее не рассматривается как нагрузка, приложенная к сохранившейся части перекрытия. При линейных и нелинейных статических расчетах нагрузка от разрушенного элемента учитывается динамическим коэффициентом $k_d = 2$. Производится расчет в программном комплексе, для всей схемы с учетом возможного прогрессирующего обрушения.

По результатам расчета проведем графический анализ. Напряжения и деформации представляются в виде изополей и изолиний, так как это позволяет более подробно увидеть картину напряженно-деформированного состояния системы. Отдельно следует обратить внимание на деформации несущих стен по оси Z на всех этажах здания при возникновении аварийной ситуации. Значения перемещений по направлению оси Z приведем в таблице 1.

Таблица 1

Деформации несущих стен по высоте

Этажи	Диапазон деформаций без учета прогрессирующего обрушения, мм	Диапазон деформаций с учетом прогрессирующего обрушения, мм
Нижние (1 – 7)	(-45,10) – (-49,54)	(-48,18) – (-53,01)
Средние (8 – 15)	(-49,54) – (-53,09)	(-53,01) – (-56,87)
Верхние (16 – 23)	(-53,09) – (-57,54)	(-56,87) – (-61,69)

Далее рассмотрены в отдельности: междуэтажное перекрытие – рисунок 3 и несущая стена – рисунок 4.

В результате графического анализа установлено:

— по границе разрушения вышеуказанных конструкций, образуются условия способствующие возникновению концентрации напряжений;

— напряжения от действия изгибающих моментов в элементах перекрытия, находящихся вблизи места обрушения, возрастают в среднем в 1,4 раза;

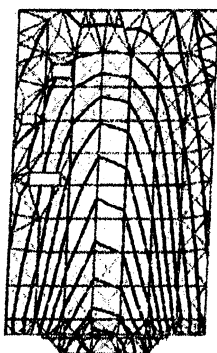
— деформаций для элементов перекрытия, находящихся вблизи места обрушения, возрастают на 12%;

— сжимающие напряжения от действия изгибающего момента в элементах несущей стены, находящихся вблизи места обрушения, практически не меняются, в то время как значения растягивающих напряжений снижаются в 3 раза;

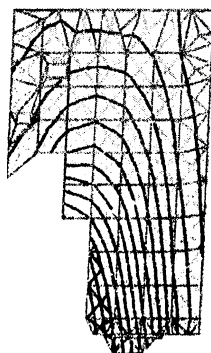
— деформации для элементов несущей стены, находящихся вблизи места обрушения, возрастают на 10%;

— следует отметить, что обрушение оказывает влияние не только на конструкции, находящиеся в пределах этажа, но и в целом на работу большинства несущих элементов. Это видно из графического анализа распределения деформаций по высоте для несущей стены по оси 3. Так для нижних этажей расхождения между деформациями составляют 10%, для средних 8,5%, для верхних 7%, соответственно до и после обрушения.

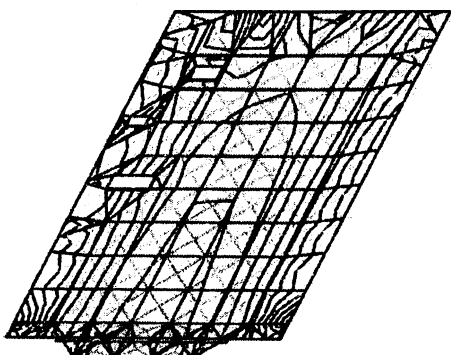
Перемещения Z (мм)



Перемещения Z (мм)



Напряжения от M_x (Т*м/м)



Напряжения от M_x (Т*м/м)

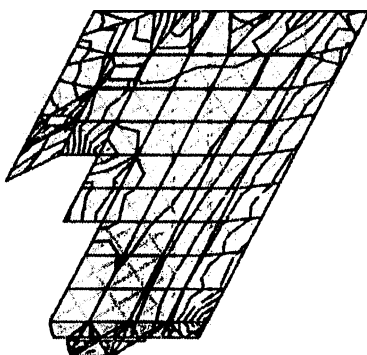


Рисунок 3. Деформации и напряжения в перекрытии до и после обрушения

Перемещения Z (мм)

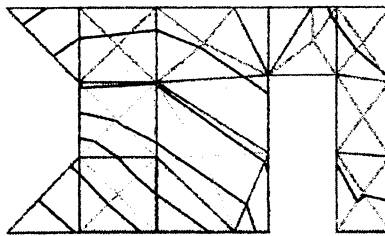
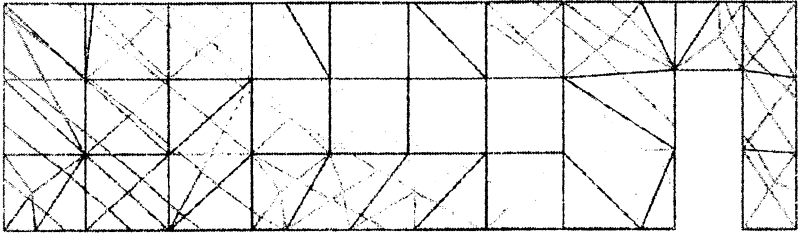


Рисунок 4. Деформации несущей стены до и после обрушения

В результате расчетов определены значения площадей арматуры для выбранных элементов (таблица 2), по следующим исходным данным:

- согласно п. 6.1.2.2 [2] принимаем бетон класса $C^{20}/_{25}$;
- арматура класса S500 периодического профиля.

Армирование несущих стен осуществляется конструктивно, так как прочность бетонного элемента обеспечивается без арматуры, как при расчете, не учитывающем прогрессирующего обрушения, так и при расчете его предполагающем. Данные о требуемой площади арматуры перекрытия из расчетов, учитывающих и не учитывающих возможность прогрессирующего обрушения, занесем в таблицу 2. Сравним полученные результаты.

Сравнение результатов

Расположение арматуры	Площадь арматуры без учета прогрессирующего обрушения, мм ²	Площадь арматуры с учетом прогрессирующего обрушения, мм ²
В пролете в поперечном направлении	156,49	172,14
В пролете в продольном направлении	254,61	297,89
На левой опоре в продольном направлении	222,11	254,43
На правой опоре в продольном направлении	222,11	292,16
На опоре в поперечном направлении	292,15	371,05

Данные разнятся в 1,1 – 1,3 раза, расхождение является значительным. Несмотря на это, на практике редко прибегают к значительному увеличению армирования, задача решается установкой дополнительных вертикальных связей, устройством аутригерных, дополнительных технических этажей.

Таким образом, очевидно, что расчет на прогрессирующее обрушение необходим не только для высотных зданий, и в перспективе после широкого обсуждения экспертным сообществом этот вопрос найдет свое отражение и в нормативных документах.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТКП 45-3.02-108-2008 (02250) Высотные здания. Строительные нормы проектирования / Минстройархитектуры РБ, Мн., 2008. – 85 с.
2. СНБ 5.03.01–02. Бетонные и железобетонные конструкции / Минстройархитектуры РБ, Мн., 2003. – 140 с.