

МРНТИ 67.11А.А. Джумабаев¹, Б.А. Сериков²^{1,2}*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Нур-Султан, Казахстан**(E-mail: 2bek.96.96@mail.ru)***Анализ исследования обеспечения устойчивости высотных зданий к прогрессирующему обрушению**

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблема оценки устойчивости высотных зданий к прогрессирующему обрушению. Также в статье исследуются различные архитектурно-конструктивные решения, которые обеспечивают устойчивость высотных зданий и сооружений при действии значительных поперечных нагрузок, возникающих от сильных сторонних воздействий. Даются рекомендации выбора конструктивных решений для достижения наибольшей устойчивости и жесткости высотных зданий.

Ключевые слова: высотное здание, устойчивость, несущие системы, моделирование, прогрессирующее обрушение, конструктивная система, аутригер, ядро жесткости, прочность, надежность.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2220-685X-2019-55-4-39-48>

При проектировании высотных зданий и сооружений на стадии «проектная документация» разрабатываются в соответствии с государственными нормами, правилами и стандартами архитектурно-конструктивные и объемно-планировочные решения. Они решают главные задачи проектирования объекта: подбор оптимальных несущих конструкций, определение проектных решений, которые придадут устойчивость всему зданию или сооружению [1, 2].

Проблема оценки несущих конструкций здания при аварийных воздействиях чрезвычайно актуальна в связи с участвовавшими случаями взрывов бытового газа, наезда транспортных средств на конструкции зданий и сооружений, техногенных катастроф, террористических актов. В настоящее время при расчете каркаса здания на прогрессирующее обрушение применяется методика удаления наиболее нагруженной колонны первого этажа. Однако, существующие методики по расчету зданий на прогрессирующее обрушение вызывают множество споров.

Таким образом, на этапе разработки конструктивных и объемно-планировочных решений закладывается система обеспечения необходимой прочности, жесткости, устойчивости, а также оптимизация несущих конструкций зданий. Из этого следует, что этот раздел является важнейшим этапом проектирования зданий и сооружений. Проектирование высотных зданий является одной из сложнейших задач и прежде всего за счет преобладания вертикальной координаты над горизонтальными размерами и площадью основания. Значительная высота небоскреба воспринимает такую ветровую нагрузку, которая может превышать общий вес сооружения.

Для высотных зданий устойчивость во многом зависит от формы объема. Здание-пластина является наиболее неэффективной формой по устойчивости так как имеет большую парусность и узкую опорную площадь. Повысить устойчивость здания можно, применяя наиболее эффективные формы:

- придание зданию пирамидальности, конусности, сужение объема кверху;
- применение обтекаемой цилиндрической формы зданий или близкой к ней;
- увеличение формы плана здания стилобатных систем, верхней части ступенчатого цокольного этажа, который объединяет несколько зданий [3].

В высотных уникальных зданиях от действия ветровых нагрузок у основания возникают большие изгибающие моменты. Их восприятия можно обеспечить надежной анкерровкой в грунт основания. При этом, здание будет работать как жесткая консоль с большими горизонтальными нагрузками.

Уменьшить боковую ветровую нагрузку можно с помощью изменения поперечного сечения здания. Сужение и расширение горизонтального сечения создают каналы, по которым формируются условия обтекания здания, уменьшающие ветровое воздействие. Такую роль могут выполнять сквозные проемы, организованные в разных по высоте частях здания.

С тех пор как небоскребы стали многофункциональными зданиями их типология значительно расширилась. Их формы могут быть самыми разнообразными: линзы или капли, производные от круга, переходные формы треугольников, с округлыми

гранями, квадратные и ромбовидные в плане, форму пирамиды и многие другие.

Конфигурация сооружения, соотношения его размеров являются базовыми при проектировании высотных зданий и определении рациональных конструктивно-планировочных решений. Одна из важнейших задач проектирования высотных зданий – защита от прогрессирующего разрушения. Свод правил «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования» предусматривают защиту здания при локальных разрушениях несущих конструкций от аварийных воздействий при пожарах, взрывах, ударных воздействиях и др. Допускаются мелкие локальные разрушения отдельных несущих вертикальных элементов одного этажа, не приводящие к разрушению конструкций, которые воспринимают нагрузку [4, 5].

Одним из способов повышения устойчивости зданий к прогрессирующему обрушению является обеспечение взаимосвязи элементов каркаса здания. Известен патент на связевой каркас здания [6], который содержит балки (ригели) в одном направлении, распорки – в другом, и связи. Распорки выполняют решетчатыми с параллельными поясами и крепят к колоннам по поясам шарнирно. Между распорками устанавливают решетчатые стойки с параллельными поясами с зазором от колонн и крепят к ним в нескольких узлах по высоте этажей и к распоркам по поясам шарнирно, а связевые раскосы между распорками и стойками крепят к распоркам в любом узле, кроме соседнего с колонной. Недостатками данной конструкции является малая горизонтальная жесткость, трудоемкость в изготовлении, транспортировке и монтаже, высокий расход металла.

Обеспечение взаимосвязи элементов каркаса здания возможно путем устройства аутригерных этажей. Известна конструкция аутригера с прямоугольными вырезами по периметру этажа [7], однако, существенные зоны концентрации напряжений приводят к появлению вертикальных трещин при эксплуатации сооружения.

В работе Алмазова В.О. [8] рассматриваются меры по противодействию прогрессирующему разрушению. В частности, выполнен анализ напряженно-деформированного состояния каркаса многоэтажного здания при удалении угловой, крайней и промежуточной колонны. Исследования многоэтажного рамного

каркаса показали, что при этажности более 10-11 этажей существенно меняется величина нагрузки, приходящаяся на ригель над удаляемой колонной. При этом наблюдалось, что все ригели работают приблизительно одинаково. При исследовании высотного здания после удаления средней колонны в конечно-элементной модели, момент в ригеле над удаленной колонной увеличивается в 3,75 раза по сравнению с моментом в ригеле одноэтажной рамы. При этом, момент в ригеле над колонной, смежной с удаленной, увеличивается в 2,9 раза. В качестве решения проблемы прогрессирующего обрушения строительных объектов используются связевые этажи, работающие по «мостовой схеме». При выполнении каждого 5-го этажа как связевого, после удаления средней колонны модели момент в ригеле над удаленной колонной увеличивается в 1,34 раза по сравнению с ригелем одноэтажной рамы. Момент в ригеле над смежной с удаляемой колонной увеличивается в 1,65 раза. Устройство аутригерных этажей является эффективным методом обеспечения сопротивления прогрессирующему обрушению.

Алмазов В.О., Плотников А.И. и Расторгуев Б.С. [9] предлагают три варианта требований и, соответственно, три варианта решения проблемы прогрессирующего разрушения:

- после аварийного воздействия здание или сооружение получает повреждения только в пределах зоны его действия;
- после аварийного воздействия здание (сооружение) становится непригодным для дальнейшей эксплуатации, но сохраняет несущую способность;
- после аварийного воздействия здание (сооружение) становится непригодным для дальнейшей эксплуатации и сохраняет свою форму в такой степени, что находящиеся в нем люди могут безопасно эвакуироваться. Для предотвращения распространения локального разрушения и превращения его в глобальное, авторы, как один из методов, предлагают «расчетно-конструктивные «ответы» на возможные повреждения».

Особый интерес представляют исследования по повышению устойчивости несущих конструкций зданий и сооружений от действия взрывных нагрузок. Выполнены многочисленные натурные эксперименты на образцах и крупноразмерных фрагментах каркаса. В работе Crawford J.E., Malvar L.J. [10] предлагается расчетный аппарат для определения прочности железобе-

тонных колонн на срез и изгиб при восприятии взрывных нагрузок. Компьютерные расчеты подтверждены результатами сравнений испытаний на натурном фрагменте четырехэтажного здания с обычным и усиленным внешним армированием.

Исследование влияния внешнего армирования на восприятие взрывной волны горизонтальными железобетонными плитами проведено в университете Миссури (США). Результаты проведенного эксперимента показали, что наклейка усиливающего композиционного материала на обе поверхности плиты значительно повышает устойчивость к восприятию взрывной нагрузки. Однако, композитные материалы, используемые для усиления строительных конструкций, требуют тепловой защиты, препятствующей потере функциональных свойств. Концепция тепловой защиты конструкций, усиленных углепластиком, должна учитывать особенности поведения в температурном поле как композитного материала, так и эпоксидной матрицы, применяемой для приклейки ткани к поверхности конструкции.

Анализ результатов численных экспериментов по определению несущей способности элементов каркаса здания при взрывном воздействии показал, что наиболее эффективными мероприятиями являются увеличение процента армирования колонн и применение стальной обоймы. Однако, при одинаковом расходе стали усиление колонны стальной обоймой дает больший эффект, чем при повышении коэффициента армирования. В случае усиления колонны листовым прокатом коэффициент снижения несущей способности составляет 6-14%; при повышении процента армирования при таком же расходе стали, коэффициент снижения несущей способности составляет 11-19%.

Устойчивость высотного здания от прогрессирующего обрушения рекомендуется обеспечить следующими средствами:

- рациональными конструктивно-планировочными решениями здания с учетом вероятности возникновения аварийной ситуации;
- обеспечением неразрезности конструкций;
- применением конструктивных решений и материалов, допускающих развитие в соединениях и элементах конструкций пластических деформаций.

Сегодня неуклонно растет количество проектов уникальных высотных зданий любых конфигураций и форм различной

аэродинамической модификации. Как правило, это не столько стремление к новациям архитекторов, проектировщиков и инженеров, сколько улучшение аэродинамических характеристик здания, а для небоскребов это ключевой момент [11,12].

Улучшить ветроустойчивость высотных зданий можно, изменяя его форму сечения по высоте и конфигурацию углов. Аэродинамические модификации могут применяться различного вида:

- здания усложненного поперечного сечения, например, в виде многоугольника или Y-типа;
- здания, имеющие несимметричное сечение, в виде сплошной или ступенчатой пирамиды;
- здания, у которых углы разной конфигурации;
- здания, имеющие сквозные проемы фасадов.

Конструктивные системы зданий состоят из вертикальных и горизонтальных несущих элементов, а также фундаментов. Они должны обеспечивать прочность, устойчивость и необходимый уровень эксплуатационных качеств высотных зданий. При проектировании высотных зданий для достижения наибольшей жесткости и устойчивости рекомендуется применять:

- симметричное расположение ядер жесткости и диафрагм;
- коробчатые конструктивные системы с несущими колоннами или стенами по всему контуру;
- регулярное расположение в плане здания несущих конструкций по высоте;
- жесткие диски перекрытий, которые являются горизонтальными диафрагмами жесткости;
- жесткие узлы соединения несущих конструкций в узлах;
- использовать аутригерные конструкции на уровнях технических этажей; количество таких уровней зависит от сейсмичности районов и определяется расчетом [13].

Применение системы аутригеров, а также ленточных поясов для высотных уникальных зданий в современном проектировании является основным решением для контроля боковых сдвигов здания. Такая система включает центральное ядро, соединенное с внешними колоннами жесткими связями системами, работающие на сдвиг, горизонтальные консольные фермы или балки. Аутригеры высотных зданий являются связующим звеном между ядром здания и наружными колоннами [7].

При использовании ленточных поясов передача опрокидывающего момента от ядра колоннам может проходить без прямого соединения пояса бандажа с ядром. При этом, связь колонн и ленточного пояса осуществляется диафрагмой перекрытия очень жесткой в своей плоскости. Использование аутригерных систем и поясов жесткости при проектировании высотных уникальных зданий дает возможность значительно повысить его устойчивость и жесткость, уменьшить толщину ядра и площадь армирования.

К основным правилам обеспечения устойчивости высотных уникальных зданий и сооружений следует также отнести возможно близкое расположения центра масс к его основанию.

Самое часто применяемое решение по фундаментам высотных зданий – это плитно-свайные, свайные и плитные.

Главное условие проектно-конструктивного решения – не допустить появления предельного состояния при необходимом коэффициенте надежности. При этом должны быть рассмотрены все возможные ситуации на стадии строительства и эксплуатации здания или сооружения.

Из конструктивных материалов в высотном строительстве широко применяются композиты, которые в процентном отношении приближаются к бетону. Использование стальных конструкций становится меньше.

На основании вышеизложенного можно сделать ряд рекомендаций по проектированию высотных зданий:

1. При проектировании высотных зданий на этапе конструирования и объемно-планировочные решения при применении оптимальных и рациональных решений можно максимально добиться обеспечения прочности, жесткости и устойчивости зданий и сооружений.

2. Очень важно учесть ветровую нагрузку, которая может превышать общий вес сооружения.

3. Объемно-пространственные решения должны ограничить положение результирующего вектора сил подошвой фундамента.

4. Использовать наиболее эффективные обтекаемой формы здания.

5. Использовать аэродинамическую модификацию, изменяя форму сечения здания по высоте и конфигурацию его углов.

6. Для достижения необходимой жесткости и устойчивости высотных зданий необходимо применять рациональные конструктивные системы, использовать аутригерные конструкции на технических этажах.

7. При выборе решения по фундаментам необходимо рассмотреть различные варианты их работы на стадии строительства и эксплуатации здания и сооружения.

Использованная литература

1. Маклакова Т.Г. Высотные здания. - Москва: АВС, 2008. - 160 с.
2. Пономарев В.А. Архитектурное конструирование. - Москва: Архитектура – С, 2008. - 737 с.
3. Bungale S., Taranath. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. - Florida (USA): CRC Press, 2016. - P. 44-48.
4. Johannes R.D., Steenbergen M. Super Elements in High-rise Buildings Under Stochastic Wind Load. - Netherlands: Eburon Uitgeverij, 2007. - 293 p.
5. Shumeiko V.I. The support systems of unique high-rise buildings // MATEC International science conference “Smart city”. - St. Petersburg: EDP Sciences, 2017. - 106 p.
6. Патент на полезную модель «Связевой каркас здания» RU № 2418916, E04B1/00, опубл. 20.05.2011.
7. Чернуха Н.А. Оптимальное положение и конструкция аутригерных систем в высотных зданиях // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2015. – №9 (36). – С. 19 – 27.
8. Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего разрушения строительных объектов. Строительство. Деловая слава России. [Электронный ресурс] - URL: d-sr.ru/texts/74-77.pdf. (дата обращения: 14.12.2016).
9. Алмазов В.О. Плотников А.И. Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. - №2. - 2011. - С. 115 – 121.
10. Crawford J.E., Malvar L.J., Morrill K.B., Ferritto J.M. Composite retrofits to increase the blast resistance of reinforced concrete buildings. In Symposium on interaction of the effects of munitions with structures. - San Diego: CA, 2001. - P. 3 – 5.
11. Шумейко В.И., Кудинов О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений. [Электронный ресурс] // Инженерный вестник. – 2013. - №4. - URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2164. (дата обращения: 14.12.2016).
12. Karamysheva A.A., Shumeiko V.I. Rational constructional and planning concepts of high-rise buildings' stabilization // Engineering studies. Volume 9, - №3. - 2017. - P. 696-702.
13. Zhang H. Building Materials in Civil Engineering. - Netherlands: Elsevier, 2011. - P. 1-29.

А.А. Джумабаев¹, Б.А. Сериков²

^{1,2}Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан,
Қазақстан

Биік ғимараттардың үдемелі құлауына орнықтылығын қамтамасыз ету зерттеулерін талдау

Аннотация: Бұл мақалада биік ғимараттардың үдемелі құлауына орнықтылығын бағалау мәселесі қарастырылған. Сондай-ақ мақалада сыртқы әсерлерден туындайтын едәуір шамадағы көлденең жүктемелердің әрекеті кезінде биік ғимараттар мен құрылыстардың орнықтылығын қамтамасыз ететін әр түрлі сәулетті-конструктивтік шешімдер зерттеледі. Биік ғимараттардың барынша орнықтылығы мен қаттылығына қол жеткізу үшін конструктивті шешімдерді таңдау ұсынымдары беріледі.

Кілт сөздер: биік ғимарат, орнықтылық, көтергіш жүйелер, моделдеу, прогрессивті қирау, конструктивтік жүйе, аутригер, қаттылық ядросы, беріктілік, сенімділік.

A.A. Jumabayev¹, B.F. Serikov²

^{1,2}L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

Issues of improving the quality of education on the basis of analysis of variance

Abstract: This article deals with the problem of assessing the stability of high-rise buildings to progressive collapse. The article also examines various architectural and structural solutions that ensure the stability of high-rise buildings and structures under the action of significant transverse loads arising from strong external influences. The recommendations of the choice of design solutions to achieve the greatest stability and rigidity of high-rise buildings are given.

Key words: high-rise building, stability, load-bearing systems, modeling, progressive collapse, structural system, outrigger, core stiffness, strength, reliability.

References

1. Maklakova T.G. Vysotnyezdaniya [Tall building] (Moskva, AVS, 2008). [in Russian]
2. Ponomarev V.A. Arhitekturnoekonstruirovaniye [Architectural design](Moskva, Arhitektura, 2008). [in Russian]
3. Bungale S. Taranath. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction (Florida (USA), CRC Press, 2016). [in English]
4. Johannes R.D., Steenbergen M. Super Elements in High-rise Buildings Under Stochastic Wind Load (Netherlands, Eburon Uitgeverij, 2007). [in English]

5. Shumeyko V.I. The support systems of unique high-rise buildings // MATEC International science conference “Smart city”(St. Petersburg, EDP Sciences, 2017). [in English]
6. Patent «Svyazevojkarkaszdaniya» [Patent for the utility model «Bond frame of the building»] (RU№ 2418916, E04B1/00). [in Russian]
7. Chernuha N.A. Optimalnoepolozhenieikonstrukciyaautrigernyh sistem v vysotnyh zdaniyah [Optimal position and design of outrigger systems in high-rise buildings] Construction of Unique Buildings and Structures, №9 (36), 19 – 27(2015) [in Russian].
8. Almazov V.O. Problemy progressivnoy razrusheniya stroitel'nykh ob'ektov [Problems of progressive destruction of construction objects] Stroitel'stvo. Delovaya slava Rossii [Construction. Business glory of Russia] Available at: dsr.ru/texts/74-77.pdf. [in Russian]. (accessed: 14.12.2016)
9. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problemy soprotivleniya zdaniy progressivnoy razrusheniyu [Problems of resistance of buildings to progressive destruction] Vestnik MGSU, 2011 [Bulletin of MGSU], №2, 115 – 121(2011). [in Russian]
10. Crawford J.E., Malvar L.J., Morrill K.B., Ferritto J.M. Composite retrofits to increase the blast resistance of reinforced concrete buildings. In Symposium on interaction of the effects of munitions with structures (San Diego, CA, 2001). [in English]
11. Shumeyko V.I., Kudinov O.A. Ob osobennostyah proektirovaniya unikalnykh, bolsheproletnykh i vysotnykh zdaniy i sooruzhenij [About features of design of unique, long-span and high-rise buildings and constructions] Inzhenernyy vestnik [Engineering journal] Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2164, №4 (2013). [in Russian]. (accessed 14.12.2016)
12. Karamysheva A.A., Shumeyko V.I. Rational constructional and planning concepts of high-rise buildings' stabilization // Engineering studies, -№3, 696-702 (2017). [in English]
13. Zhang H. Building Materials in Civil Engineering (Netherlands, Elsevier, 2011). [in English]