

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ДЛЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ И ВЕТРОВЫМИ НАГРУЗКАМИ

**Габибов Фахраддин Гасан**- д.ф.т.н., с.н.с. АзНИИСА, farchad@yandex.ru

**Шокбаров Ералы Мейрамбекович**- кандидат технических наук, исполнительный директор АО Казахский научно-исследовательский институт сейсмостойкого строительства и архитектуры

**Габибова Лейли Фахраддин**- инженер компании SOCAR

**Аннотация.** В статье рассматриваются различные конструкции зданий, выполненные в плане в виде треугольника Рело. Обосновывается эффективность конструкций этих зданий по отношению к повышенным сейсмическим и ветровым нагрузкам.

**Ключевые слова:** здание, форма, нагрузка, сейсмика, ветровой поток, конструкция, треугольник, сечение

## SELECTION OF THE OPTIMAL FORM OF HIGH-RISE BUILDINGS FOR URBAN AREAS WITH ELEVATED SEISMIC AND WIND LOADS

**Habibov Fakhraddin Gasan**- PhD in techincs, AzNIISA, farchad@yandex.ru

**Shorakbarov Eraly Meirambekovich**- candidate of technical sciences, Director of the Kazakh Research Institute of Earthquake Engineering and Architecture JSC

**Habibova Leyli Fakhraddin**- engineer of SOCAR Company

**Abstract.** The article discusses the various structures of buildings, made in te plan in the form of a triangle of Relo. The efficiency of the structures of these buidilgs in relation to increased seismic and wind loadsis substantiated.

**Keywords:** building, shape, load, seismic, wind flow, structure, triangle, cross section

Анализ исследований землетрясений позволяет выявить зависимость между повреждаемостью зданий и их конфигураций в плане. Чем сложнее план, тем больше вероятность нарушения целостности объема здания, разрыва конструкций и связей между ними прежде всего в местах изменений направлений стен [1]. Повреждения, в первую очередь, сосредотачиваются во внутренних и внешних углах. Причины возникновения подобных эффектов много. Здесь и влияние закручивания зданий, вызываемого как несовпадением центров масс и жесткостей, так и возникновением крутильных колебательных процессов в самом грунте основания [2].

Практика проектирования многоэтажных зданий показывает, что весьма эффективными по сейсмостойкости являются здания с круглым в плане сечением. Анализ сейсмостойкости конструкции здания парламента в г. Веллингтоне (Новая Зеландия) показал следующее. Площадка строительства расположена вблизи разлома и достаточно часто подвергается сейсмическим воздействиям различной интенсивности, поэтому было решено запроектировать здание круглым в плане с ядром жесткости. К преимуществам этой схемы относят: 1) значительную прочность, позволяющую хорошо противодействовать сильным землетрясениям; 2) исключение дополнительных антисейсмических мероприятий по периметру, обычно предусматриваемых в зданиях другой конфигурации; 3) большую жесткость внутреннего ядра, что делает менее ощутимыми для обитателей здания сейсмические толчки умеренной силы.

Бурный рост городов из-за необходимости сохранения пахотных земель, сельскохозяйственных угодий, парков и лесов требует увеличения этажности стоящихся зданий. Уже сейчас в сейсмоопасных районах многих стран стоятся здания высотой более

50-60 этажей. Предлагается увеличить этажность зданий до 60-100 этажей, а в отдельных случаях до 200 этажей и более.

Стремление эффективнее использовать минимальную свободную площадь Токио привело к разработке проекта административного сейсмостойкого здания Шиньёку-Сумитома. Высота от уровня планированной отметки достигает 212 м (52 этажа). Подземная часть заглублена на 20,5 м и состоит из четырех этажей с монолитной железобетонной фундаментной плитой. В плане здание выполнено в виде равностороннего треугольника со срезанными углами. Ядро здания в сечении приблизительно такое же. Несущие конструкции выполнены в виде системы трех стальных пространственных рам треугольных в плане очертания, образующих коробчатую конструкцию. Первые два подземных этажа запроектированы в железобетоне с жесткой арматурой. Остальные подземные этажи, как и фундамент, решены в обычном железобетоне. Основанием под фундамент служит слой гравия. Основные расчеты этого здания проведены на воздействие одной горизонтальной составляющей. Параллельно здание рассчитывалось сразу на два компонента эль-центро. Существенной разницы в результатах не получено в связи с близкими и достаточно высокими значениями жесткостей по взаимно перпендикулярным осям в упругой стадии работы здания и по вертикальной оси (крутильная жесткость) в упругопластической стадии. Центральная внутренняя часть здания исследовалась на модели в 1/20 натуральной величины. Горизонтальная жесткость сдвоенных вертикальных диафрагм рассчитывалось по методу конечных элементов. Полученные данные хорошо коррелируются с экспериментальными.

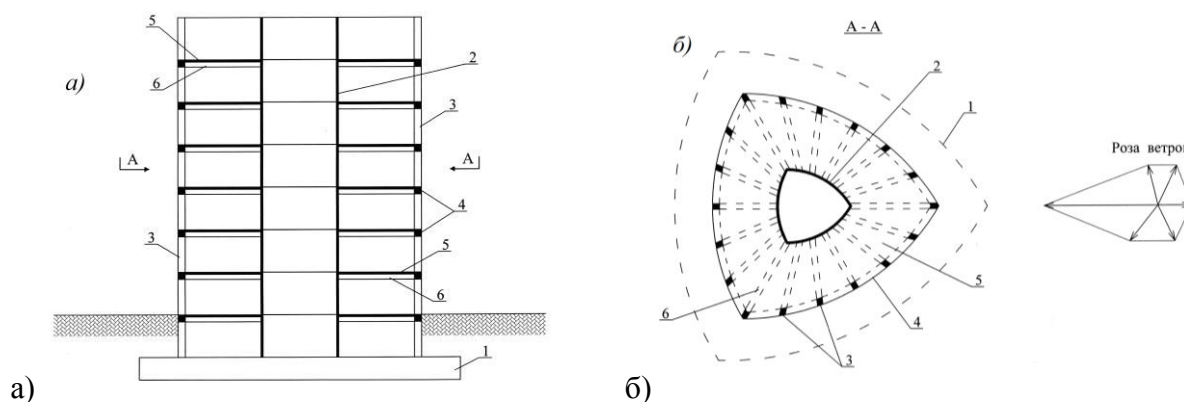
Развитие геометрии сейсмостойкости и ветростойкости многоэтажных зданий продолжается. Здесь имеет перспективу применение оболочистых поверхностей, в частности циклоидных элементов. Использование треугольника Рело в конструкции высотного сейсмостойкого здания было предложено Ф.Г. Габировым и др. в работе [3]. Оболочестое покрытие в плане в виде треугольника Рело использовалось в здании зоопарка в г. Лейпциг (Германия).

Новое здание делового центра Кельна на правом берегу Рейна- «Кельнский треугольник» (Германия)- представляет собой узкую, одетую в сплошное стекло 103-метровую башню. Авторами проекта выступили Gatermann + Schossig. Южный фасад здания, принимающий удар господствующих ветров и получающий максимальное количество солнечного света,- двойной. В его состав входит триплекс с конструкционной пленкой DuPont SentryGlas Plus. По словам Й. Файлера, представителя компании Flachglas – Wernberg, взявший на себя производство триплекса, южный фасад башни площадью 2500 м<sup>2</sup> очень прочен и способен отлично держать форму при повреждениях, хотя и создает впечатление прозрачности и воздушности. Применение триплекса с указанной выше пленкой, запатентованного компанией «Flachglas» под маркой SiglaPlus, позволило найти удачное техническое решение: сочетание крайне высокой прочности при ветровых нагрузках и малой выходной толщине триплекса (на 20% тоньше по сравнению с обычным). Как видно в этой сложной конструкции многоэтажного здания только внешнее остекление в плане выполнено в виде треугольника Рело.

В работе [4] приведены аэродинамические исследования макета высотного здания выполненного в плане в виде треугольника со скругленными сторонами. Результаты опытов показали, что наиболее оптимальные результаты получаются тогда, когда воздушный поток направлен на один из углов макета здания. Надо отметить, что в данной работе исследовался макет здания небоскреба «1 Dubai», который действительно в поперечном сечении выполнен в виде треугольника с дугообразными (или скругленными) сторонами, но это сечение не является треугольником Рело, т.е. ширина используемой фигуры в различных направлениях не одинакова.

Разработаны различные конструкции многоэтажных зданий с повышенной сейсмо- и ветростойчивостью, которые в плане выполнены в виде треугольника Рело. Указанные

здания также отличаются тем, что они в плане одним из углов установлены напротив основного вектора розы ветров. На рис. 1 изображено многоэтажное здание повышенной устойчивости [5].



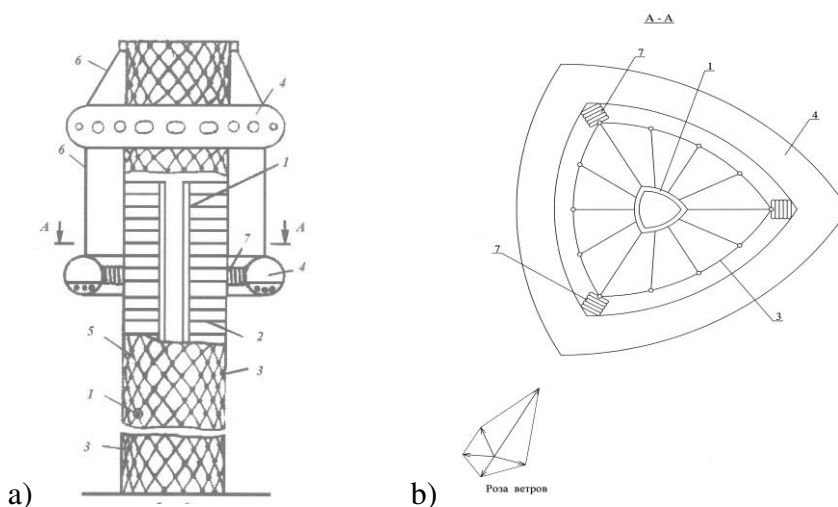
**Рис. 1.** Многоэтажное здание с ядром жесткости: а- вертикальный разрез здания; б- поперечный разрез А-А здания.

Многоэтажное здание состоит из фундамента 1, ядра жесткости 2, внешнего рамного контура из колонн 3 и ригелей 4, а также из объединенных в диски с центральным отверстием перекрытия, состоящие из сегментов перекрытий 5, объединенных и опирающихся на радиальные балки 6 и внешний рамный контур. Фундамент 1, ядро жесткости 2, внешний рамный контур из колонн 3 и ригелей 4, выполнены в плане в виде треугольника Рело. Диски перекрытия состоят из сегментов 5, которые в боковых контактах объединяются радиальными балками 6, которые одним концом связаны с ядром жесткости 2, а вторым концом с внешним рамным контуром в точках пересечения с колоннами 3. Таким образом, в целом перекрытия в плане получаются в форме треугольника Рело с центральным отверстием в плане в форме треугольника Рело (меньшего и геометрически подобного). Центральное ядро жесткости 2 образует пространство, используемое для различных целей, здесь могут размещаться лифтовые шахты и лестничные клетки.

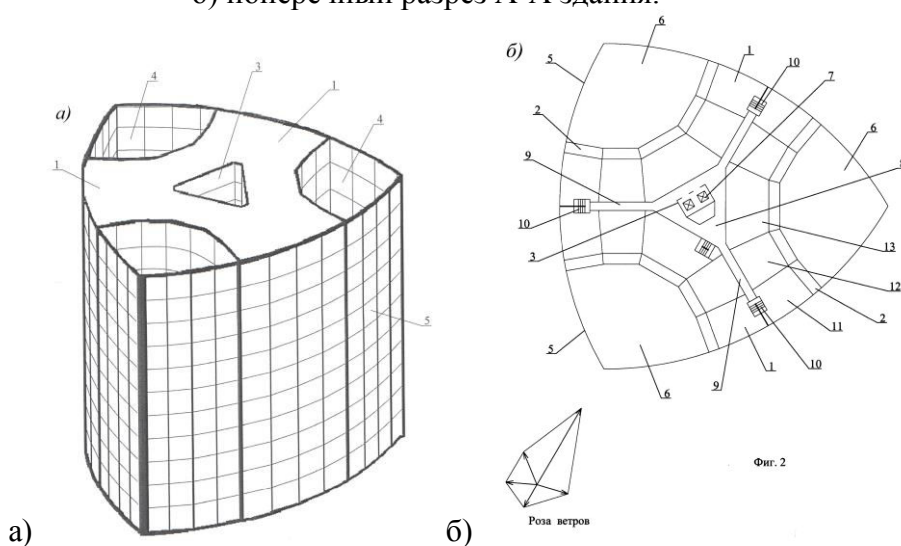
На рис. 2 изображено сейсмостойкое многоэтажное здание [6]. Сейсмостойкое многоэтажное здание состоит из центрального ядра 1 жесткости, этажных конструкций 2 с наружным ограждением 3 и гасителей 4 колебаний. Ядро 1 жесткости и наружное ограждение 3 выполнены в виде релообразной цилиндрической формы и расположены коаксиально. Каркас наружного ограждения 3 образован из металлических труб 5 круглого сечения, установленных наклонно и соединенных в узлах пустотелыми фасонками. Гасители 4 колебаний выполнены в виде пустотелых релообразных колец, подвешенных на тросах в верхней части каркаса наружного ограждения 3 и соединенных с ограждением 3 посредством гофрированных трубчатых элементов 7, выполняющих роль переходов и демпферов. При колебаниях здания во время землетрясения инерционные силы подвешенных релообразных колец 4 действуют в направлении противоположном сейсмическому воздействию, благодаря чему уменьшаются сейсмические нагрузки на здание. Смещения гасителей 4 по отношению к наружному ограждению 3 здания вызывают в гофрированных трубчатых элементах 7 вязкоупругие деформации, что приводит к поглощению внешних динамических воздействий и быстрому затуханию колебаний.

На рис. 3 изображено многоэтажное здание повышенной устойчивости [7]. Указанное здание включает корпуса 1 с ломанными в плане очертаниями фасадов, выполненные с остекленными участками стен 2, установленные радиально и соединенные между собой торцами с образованием центрального ядра 3. Здание снабжено наружными

светопрозрачным покрытием 4 и непрерывным по периметру здания стеновым ограждением 5, выполненным в плане в виде треугольника Рело.



**Рис. 2.** Сейсмостойкое многоэтажное здание; а) продольный разрез здания; б) поперечный разрез А-А здания.



**Рис. 3.** Многоэтажное здание: а- общий вид; б- поперечное сечение.

Светопрозрачное покрытие 4 и стеновое ограждение 5 прикреплены к корпусам 1 с образованием между ними внутренних замкнутых двориков. Помещения корпусов 1 могут быть использованы для жилья, комнат отелей и офисов. Расположение корпусов 1 обеспечивает максимальный визуальный обзор как окружающего замкнутого двора 6, так и внешнего пространства через светопрозрачное стеновое ограждение 5, выполненное, например, из стеклоблоков, укрепленных на металлическом каркасе. При использовании корпусов 1 в качестве жилых помещений, чтобы возможность визуального наблюдения каждого жилого помещения со стороны жилых помещений смежных корпусов 1, обращенных к одному дворику 6, была сведена к минимуму, часть каждого жилого помещения, обращенная к дворику 6, выполняется непрозрачной для соответствующей части всех других жилых помещений, в связи с чем количество корпусов 1 должно быть равным трем (это требование полностью реализуется предложенной конструкцией). Корпуса 1 могут иметь балконы, расположенные по их продольным фасадам, что обеспечивает обзор дворики 6 и внешнего пространства. Центральное ядро 3 здания, имеющее наружное

светопрозрачное покрытие, образует дополнительное пространство, используемое для различных целей, например для размещения лифтовых шахт 7, а также для размещения оборудования различного назначения. Покрытие 4 может иметь форму свода, а в отдельных случаях здание может быть выполнено и без покрытия над ядром 3. По периметру ядра 3 может быть выполнен замкнутый в плане проход 8, обеспечивающий доступ из лифтов в любой из корпусов 1. Каждый из корпусов 1 содержит центральный, идущий в продольном направлении, проход 9, отходящий от прохода 8 к внешнему торцу корпусов 1, где размещаются лестничная клетка 10. Корпуса 1 содержат жилые блоки 11, 12 и 13, расположенные таким образом, что каждый из них обращен в один из трех замкнутых дворики 6. Боковые стороны каждого из двух смежных по окружности корпусов 1, выступающие в общем случае в радиальном направлении, образуют жилой блок 13. Эти боковые стороны формируют последовательность фасадов, размещающихся в вытянутом положении вокруг внутренней стороны каждого замкнутого двора 6 U-образного в горизонтальном сечении. Предложенное выполнение фасадов здания обеспечивает широкий обзор примыкающего двора 6 и внешнего пространства и создает лучшие условия для изолированности квартир в жилых блоках 11-13, выходящих на каждый замкнутый дворик 6, благодаря малой разнице угла между их фасадами.

Другой вариант конструкции многоэтажного здания с повышенной устойчивостью изображен на рис. 4 [8]. Данное здание включает корпуса 1, выполненные с остекленными участками стен 2, установленные радиально и соединенные между собой торцами 3 с образованием центрального ядра 4. Здание снабжено наружными светопрозрачными покрытием 5 и непрерывным по периметру здания стеновым ограждением 6, выполненным в плане в виде треугольника Рело. Светопрозрачное покрытие 5 и стеновое ограждение 6 прикреплены к корпусам 1 с образованием между ними внутренних замкнутых дворики 7. Помещения корпусов 1 могут быть использованы для жилья комнат отелей и офисов. Расположение корпусов 1 обеспечивает максимальный визуальный обзор как замкнутого двора 7, так и внешнего пространства через стеновое ограждение 6, выполненное, например, из стеклоблоков, укрепленных на каркасе. При использовании корпусов 1 в качестве жилых помещений, чтобы возможность визуального наблюдения каждого жилого помещения со стороны жилых помещений смежных корпусов 1, обращенных к одному дворику 7, была сведена к минимуму, часть каждого жилого помещения, обращенного к дворику 7, выполняется непрозрачной для соответствующей части всех других жилых помещений, в связи с чем количество корпусов 1 должно быть равно трем. Корпуса 1 могут иметь балконы, расположенные по их продольным фасадам, что обеспечивает обзор дворики и внешнего пространства.

Центральное ядро 4 здания, имеющее наружное светопрозрачное покрытие 5, образует дополнительное пространство, используемое для различных целей, например, для размещения лифтовых шахт 8, а также для размещения оборудования различного назначения. Покрытие 5 может иметь форму свода, а в отдельных случаях здание может быть выполнено и без покрытия 5 над ядром 4. По периметру ядра 4 может быть выполнен замкнутый в плане проход 9, обеспечивающий доступ из лифтов 8 в любой из корпусов 1. Каждый из корпусов 1 содержит центральный идущий в продольном направлении проход 10, отходящий от прохода 9 к внешнему торцу корпусов 1, где размещаются лестничные клетки 11. По сторонам прохода 10 размещаются комнаты 12, каждая из которых имеет стенку, образующую часть фасада здания.

Последняя разработанная конструкция многоэтажного здания с несущим центральным стволом изображена на рис. 5 [9]. Здание включает центральный несущий ствол 1, рамы 2 и пространственную конструкцию этажей 3, выполненных из радиально расположенных основных стен 4 и радиально расположенных промежуточных стен 5, снабженных в нижней части выступами, с опертыми на них плитами перекрытий 6. Стены 4 жестко соединены с поясами рам 2 и снабжены вертикальными прямоугольными стойками – вутами 7. Вся

конструкция здания посредством несущего ствола 1 опирается на фундамент 8. В здании пространственная конструкция этажей 3 опирается посредством торцевых кромок стен 4 на рамы 2, образуя с их поясами жесткую пространственную структуру, закрепленную на стволе 1. Каждый этаж является самонесущим, поэтому деформации незначительные.

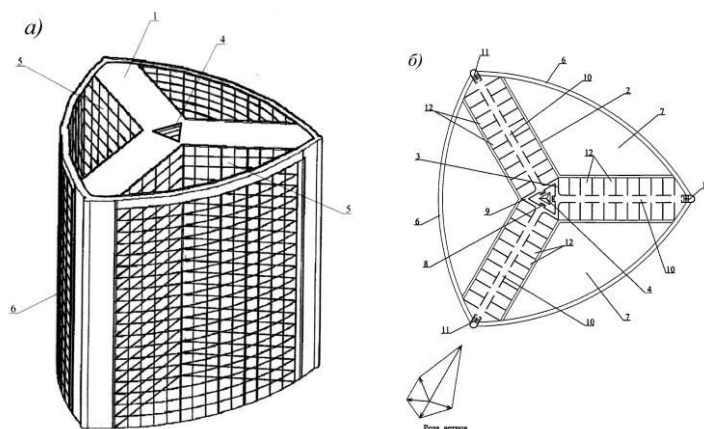


Рис. 4. Многоэтажное здание: а- общий вид; б- поперечное сечение.

Используемая в предложенных конструкциях геометрия треугольника Рело представляет собой фигуру постоянной ширины, образованную пересечением трех дуг радиуса  $a$ , центры которых находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной  $a$ . Из всех фигур заданной постоянной ширины треугольник Рело обладает наименьшей площадью. Площадь треугольника Рело равна  $(\pi - \sqrt{3}) a^2/2$ , следовательно, при равных площадях, треугольник Рело имеет большую ширину по сравнению с кругом. По сравнению со зданием в котором сам корпус здания или его несущие элементы имеют форму круга. Здания с корпусом или несущими элементами в форме треугольника Рело имеют большие периметры, а следовательно большую суммарную поверхность, что имеет существенное значение для более эффективного рассеивания поверхностных механических (статических и динамических) и температурных напряжений.

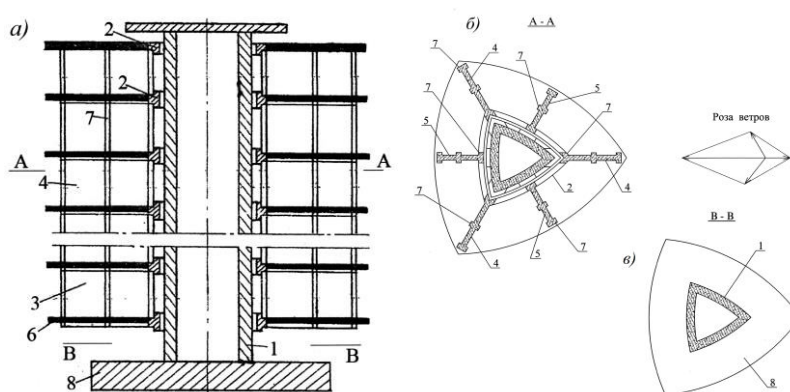


Рис. 5. Многоэтажное здание с несущим центральным стволом: а- продольный разрез; б- поперечный разрез А-А; в- поперечный разрез В-В

У треугольника Рело, по сравнению с кругом той же площади, диаметр практически во всех направлениях, проходящих через центр тяжести фигуры, больше на 5%, за исключением нескольких направлений, где они равны. Следовательно, жесткость конструкций зданий, выполненных в плане в форме треугольника Рело, увеличивается. Во всех предложенных

конструкциях зданий резко увеличивается их устойчивость по отношению к ветровым нагрузкам, т.к. они в плане устанавливаются одним из углов напротив направления основного вектора розы ветров, установленной для территории возведения здания.

**Выводы.** Углы при вершинах треугольника Рело равны  $120^0$ , это более чем на 30% меньше угла образованного касательными пересекающимися линиями, куда может вписаться круг. В этой ситуации обтекаемость здания ветровыми воздушными потоками будет лучше, чем для здания, выполненного в плане круглым. В природе эффективность сечения в виде треугольника Рело по части устойчивости вертикальных структур растений также просматривается [10]. Так поперечное сечение стебля папируса практически полностью совпадает с треугольником Рело.

### Список литературы

1. Шулер В. Конструкции высотных зданий. М.: Стройиздат, 1973, 248 с.
2. Ньюмарк Н., Розенблюэт Э. Основы сейсмостойкого строительства. М.: Стройиздат, 1980, 215 с.
3. Габибов Ф.Г., Оджагов Г.О., Халафов Н.М., Баят Х.Р. Геометрия сейсмостойкости многоэтажных зданий. Труды Международной конференции «Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства», Пермь, Издательство ПНИПУ, 2011, с.271-280
4. Jining X. Aerodynamic optimization of supertall buildings and its effectiveness assessment. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 130, 2014, p. 94-98.
5. Габибов Ф.Г., Амрахов А.Т., Габибова Л.Ф. и др. Многоэтажное здание повышенной устойчивости. Патент РФ на изобретение №2606895, 2017.
6. Габибов Ф.Г., Амрахов А.Т., Габибова Л.Ф. и др. Сейсмостойкое многоэтажное здание. Патент РФ на изобретение №2613386, 2017.
7. Габибов Ф.Г., Амрахов А.Т., Габибова Л.Ф. и др. Многоэтажное здание. Патент РФ на изобретение №2606898, 2017.
8. Габибов Ф.Г., Амрахов А.Т., Габибова Л.Ф. и др. Сейсмостойкое многоэтажное здание. Патент РФ на изобретение №2613691, 2017.
9. Габибов Ф.Г., Амрахов А.Т., Габибова Л.Ф. и др. Сейсмостойкое многоэтажное здание с несущим центральным стволом. Патент РФ на изобретение №2613696, 2017.
10. Кларк С., Энгельбах Р. Строительство и архитектура в древнем Египте. М.: ЗАО «Центрполиграф», 2009, 285 с.

### References

1. Shuler V. Konstrukcii vysotnyh zdaniy. M.: Strojizdat, 1973, 248 s.
2. N'jumark N., Rozenbljuet J. Osnovy sejsmostojkogo stroitel'stva. M.: Strojizdat, 1980, 215 s.
3. Gabibov F.G., Odzhagov G.O., Halafov N.M., Bajat H.R. Geometrija sejsmostojkosti mnogojetazhnyh zdaniy. Trudy Mezhdunarodnoj konferencii «Fundamenty glubokogo zalozhenija i problemy osvoenija podzemnogo prostranstva», Perm', Izdatel'stvo PNIPU, 2011, s.271-280
4. Jining X. Aerodynamic optimization of supertall buildings and its effectiveness assessment. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 130, 2014, p. 94-98.
5. Gabibov F.G., Amrahov A.T., Gabibova L.F. i dr. Mnogojetazhnoe zdanie povyshennoj ustojchivosti. Patent RF na izobretenie №2606895, 2017.
6. Gabibov F.G., Amrahov A.T., Gabibova L.F. i dr. Sejsmostojkoe mnogojetazhnoe zdanie. Patent RF na izobretenie №2613386, 2017.
7. Gabibov F.G., Amrahov A.T., Gabibova L.F. i dr. Mnogojetazhnoe zdanie. Patent RF na izobretenie №2606898, 2017.
8. Gabibov F.G., Amrahov A.T., Gabibova L.F. i dr. Sejsmostojkoe mnogojetazhnoe zdanie. Patent RF na izobretenie №2613691, 2017.

9. Gabibov F.G., Amrahov A.T., Gabibova L.F. i dr. Sejsmostojkoe mnogojetazhnoe zdanie s nesushhim central'nym stvolom. Patent RF na izobrenenie №2613696, 2017.
10. Klark S., Jengel'bah R. Stroitel'stvo i arhitektura v drevnem Egipte. M.: ZAO «Centropoligraf», 2009, 285 s.

Redaksiyaya daxil olma/Received 20.01.2019

Çapa qəbul olunma/Accepted for publication 20.02.2019