

КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

И.Е. Ицков⁽¹⁾

⁽¹⁾АО «КазНИИСА», г. Алматы, Республика Казахстан, kazniissa@mail.ru

Аннотация: В статье изложены современные подходы к проектированию высотных зданий в сейсмических районах Республики Казахстан. Отмечено, что стратегия проектирования сейсмостойких высотных зданий должна в полной мере учитывать их специфические особенности и тяжелые социально-экономические последствия возможных отказов при сильных землетрясениях.

DESIGN CONCEPT OF HIGH-RISE BUILDINGS IN SEISMIC AREAS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Igor E. Itskov⁽¹⁾

⁽¹⁾JSC “KazNIISA”, Almaty city, Republic of Kazakhstan, kazniissa@mail.ru

Abstract: Modern approaches to designing of high-rise buildings in seismic areas of the Republic of Kazakhstan are presented in article. There is noted that strategy for designing of seismic stable high-rise buildings should wholly take into account their specific features and hard social-economic consequences of possible failures at large earthquakes.

КАЗАХСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫК РАЙОНДОРУНДА БИЙИК ИМАРАТТАРДЫ ДОЛБООРЛООНУН КОНЦЕПЦИЯСЫ

И.Е. Ицков⁽¹⁾

⁽¹⁾«КазНИИСА» АҚ, Алматы ш., Қазақстан Республикасы, kazniissa@mail.ru

Аннотация: Мақалада Қазақстан Республикасының сейсмикалық аймақтарында көп қабаттуу имараттарды долбоорлоого заманбап ықмалар берілген. Сейсмотуруиштуу бийик имараттарды долбоорлоо стратегиясы алардын өзгөчөлүктөрүн жана катуу жер титирөөлөрдө мүмкүн болгон баш тартуулардын оор социалдык-экономикалык кесепеттерин толук түрдө эске алуусу керек экендиги белгиленген.

О масштабах строительства многоэтажных и высотных зданий в сейсмических районах Казахстана можно судить по следующим данным. В городе Алматы, расположенном в районе сейсмичностью 9 баллов, за последние 15 лет было возведено примерно 200 зданий высотой более 12 этажей. Около 40% из указанного количества

зданий имеет высоту 20 этажей и более, а самое высокое здание «Esentai Tower» 38 этажей (168 м).

Опыт проектирования и строительства этих объектов показал, что архитектурные и конструктивные решения высотных зданий, вполне согласующиеся с современными организационными и технологическими возможностями строительных организаций, зачастую, проблематично «подогнать» под некоторые нормативные требования, разработанные десятилетия назад и базирующиеся на принципе минимизации материальных затрат или на устаревших подходах к расчету конструкций.

В [1 и 2] отмечается, что современные нормы всех стран, регламентирующие правила проектирования зданий в сейсмических районах, сформировались на основании результатов исследований и анализа поведения при реальных землетрясениях главным образом зданий малой и средней этажности. Расчетные и конструктивные мероприятия, обеспечивающие требуемую сопротивляемость сейсмическим воздействиям высотных зданий, представлены в нормах в недостаточном объеме или вообще не представлены.

Вместе с тем, высотные здания отличаются от зданий малой и средней этажности не только размерами и затратами на строительство. С увеличением высоты зданий:

- увеличиваются социально-экономические последствия их повреждений;
- повышается опасность хрупкого разрушения их конструкций;
- снижается их способность к диссипации энергии и уменьшаются резервы несущей способности конструкций по отношению к расчетным сейсмическим нагрузкам;
- повышается вклад высших форм колебаний зданий в эффекты сейсмических воздействий.

Не вдаваясь в подробности, отметим, что все высотные здания, возведенные в сейсмических районах РК, проектировались по специальным техническим условиям (СТУ), составленным в развитие действующих норм. В соответствии с этими СТУ интенсивность сейсмических воздействий на площадках строительства определялась по детерминистским картам ОСР, а сейсмостойкость зданий обеспечивалась преимущественно повышением несущей способности их конструкций, сочетающимся с некоторым повышением способности конструктивных систем к пластическому деформированию.

Для повышения несущей способности конструкций высотных зданий, расчетные сейсмические нагрузки, принимаемые при их проектировании, определялись с учетом мультипликативного коэффициента, комплексно учитывающего социально-экономическую значимость зданий, их реалистичную способность к диссипации энергии, а также возможные негативные последствия применения в расчетах некоторых бездоказательных допущений. При проектировании железобетонных зданий высотой 20 этажей и более значение мультипликативного коэффициента всегда принималось равным 1,8.

Повышение способности конструктивных систем высотных зданий к пластическому деформированию обеспечивалось специальными конструктивными мероприятиями, назначаемыми вне зависимости от результатов расчетов и дополняющими конструктивные мероприятия, предусмотренные в нормах.

С позиций современных зарубежных концепций, методика обеспечения сейсмостойкости зданий, принятая в нормах РК, имеет ряд существенных недостатков.

Первый недостаток связан с определением интенсивности сейсмических воздействий по детерминистским, а не по вероятностным картам общего сейсмического зонирования (ОСЗ). Второй – с соблюдением при проектировании конструктивных систем принципа равнопрочности конструкций. Третий – с отсутствием расчетных проверок, подтверждающих наличие баланса между способностями конструктивных систем к пластическому деформированию и принятыми для них уровнями сейсмических нагрузок.

В 2010-2014 годах, в рамках выполнения работ по реформированию системы технического регулирования строительной отрасли РК и обеспечению постепенного перехода к проектированию конструкций зданий и сооружений по методикам, гармонизированным с Еврокодами, ныне действующие нормы РК были пересмотрены. При этом в комплект новых норм, гармонизированных с европейским стандартом EN 1998-1:2004 [3], вошло нормативно-техническое пособие «Проектирование сейсмостойких зданий. Часть: Высотные здания». Под высотными в НТП понимаются здания высотой от 66 до 200 м.

Гармонизация новых норм РК с EN 1998-1:2004 не основывалась на механическом копировании положений европейского стандарта. Проведенный анализ показал, что хотя стандарт EN 1998-1:2004, несомненно, является прогрессивным документом, обобщающим достижения теории и практики сейсмостойкого строительства, накопленные в мире к началу XXI века, ряд его положений носит спорный характер.

Из многих проблем, имевших место при гармонизации новых норм РК с EN 1998-1:2004, ниже обсуждаются лишь три проблемы, возникшие из-за несоответствия некоторых положений EN 1998-1:2004 урокам сильных землетрясений последних лет.

Первая проблема была связана с нормированием правил определения интенсивности сейсмических воздействий на площадках строительства по вероятностным картам общего сейсмического зонирования (ОСЗ).

Согласно EN 1998-1:2004, при проектировании зданий и сооружений (далее – зданий) следует учитывать: а) редкие сейсмические воздействия, которым здания могут подвергнуться один раз за проектный период эксплуатации, и б) сейсмические воздействия, которые могут повториться несколько раз за проектный период эксплуатации зданий.

Редкие сейсмические воздействия должны учитываться при проверке требования по ограничению значительных повреждений конструктивных систем зданий, а сейсмические воздействия, которые могут повториться несколько раз за проектный период эксплуатации зданий – при проверке требования по ограничению ущерба.

Под редким сейсмическим воздействием в EN 1998-1, как и в большинстве современных зарубежных норм, понимается референтное сейсмическое воздействие, связанное с референтной вероятностью превышения $P_{NCR}=10\%$ за 50 лет или с референтным периодом повторяемости $T_{NCR}=475$ лет. Однако, по мнению сейсмологов США, Канады, Великобритании и некоторых других стран, 475-летний период является недостаточным для учета эффектов очень редких, но очень сильных землетрясений.

В ранее действовавших нормах США (UBC-97) референтный период повторяемости редких сейсмических событий также составлял 475 лет, но после серии разрушительных землетрясений, произошедших на территории этой страны и в других странах, от него отказались. С 2003 года интенсивность возможных сейсмических событий в США стала определяться по картам, составленным для периода 2475 лет ($P_{NCR}=2\%$ за 50 лет), а с 2010 года – по картам, составленным для периода 4975 лет ($P_{NCR}=1\%$ за 50 лет).

Следует отметить, что показатели интенсивности сейсмических воздействий на площадках строительства, определенные с помощью этих карт, принимаются при проектировании зданий с понижающим коэффициентом 2/3.

Для сейсмических событий, которые могут повториться несколько раз за проектный период эксплуатации зданий, в нормах разных стран также приняты разные средние периоды повторяемости: в EN 1998-1 – 95 лет, в нормах Италии – 50 лет, в нормах США – 43 года, в нормах Румынии – 30 лет, в нормах Новой Зеландии – 25 лет.

Причина отсутствия единого подхода к нормированию интенсивностей расчетных сейсмических воздействий на здания очевидна. Нормирование уровней риска превышения всех видов внешних воздействий на здания не имеет строгого теоретического обоснования и, обычно, осуществляется на основании вырабатываемых «соглашений».

При выработке такого «соглашения» учитываются: апробированные на практике положения норм, вероятностные оценки сейсмической опасности рассматриваемой территории, стремление общества и государства к минимизации ущерба от землетрясений, реальные возможности общества и государства и другие показатели.

С учетом перечисленных выше факторов в новые нормы РК были включены:

- две вероятностные карты ОСЗ территории РК в пиковых ускорениях, составленные для референтных периодов повторяемости 475 лет (ОСЗ-1₍₄₇₅₎) и 2475 лет (ОСЗ-1₍₂₄₇₅₎);
- положение, согласно которому интенсивность редкого сейсмического воздействия на площадке строительства характеризуется значением горизонтального пикового ускорения a_g , в качестве которого следует принимать большее из двух значений:

$$a_{gR(475)} \cdot S_1 \quad \text{или} \quad 2/3 \cdot a_{gR(2475)} \cdot S_2, \quad \text{где:}$$

$a_{gR(475)}$ – значение пикового ускорения скального грунта, определенное по карте ОСЗ-1₍₄₇₅₎;

$a_{gR(2475)}$ – значение пикового ускорения скального грунта, определенное по карте ОСЗ-1₍₂₄₇₅₎;

S_1 и S_2 – коэффициенты, учитывающие влияние фактических грунтовых условий площадки строительства на интенсивность сейсмических воздействий при пиковых ускорениях горизонтальных колебаний скального грунта $a_{gR(475)}$ и $a_{gR(2475)}$ соответственно;

- положение, предусматривающее, что интенсивность сейсмических воздействий, которые могут повториться несколько раз за проектный период эксплуатации здания, характеризуется значением пикового ускорения, равным $0,2 \cdot a_g$.

Вторая проблема была связана с нормированием требований к способности высотных зданий к пластическому деформированию.

В EN 1998-1:2004, в отличие от действующих норм РК, установлено, что здания, возводимые в сейсмических зонах могут быть запроектированы с разной способностью к пластическому деформированию: низкой, средней и высокой.

Проектирование конструктивных систем с низкой способностью к пластическому деформированию рекомендуется в EN 1998-1:2004 только для случаев низкой сейсмичности площадок строительства ($a_g < 0,1g$) и может осуществляться в соответствии с нормами, применяемыми для обычных условий строительства.

Проектирование конструктивных систем со средней и высокой способностью к пластическому деформированию должно осуществляться в соответствии с концепцией об их «пластическом поведении» при сейсмических воздействиях, реализуемой на практике с помощью метода капаситивного проектирования.

Метод капаситивного проектирования («capacity design method») – это метод проектирования, декларирующий отказ от принципа равнопрочности конструкций и предусматривающий планирование зон повреждений конструктивной системы.

Capacity design method был разработан в 1960-х годах специалистами Новой Зеландии (В. Park, Т. Paulay). В 1976 году он был включен в нормы этой страны, а позднее ряд его положений был учтен в нормах США, Канады, Японии и в Еврокодах.

При капаситивном проектировании в конструктивной системе выбирают и соответствующим образом конструируют элементы, предназначенные для диссипации энергии при больших деформациях, в то время как другие конструктивные элементы должны обладать прочностью, достаточной для того, чтобы элементы, диссипирующие энергию, могли оставаться в работоспособном состоянии.

Предполагается, что элементы диссипирующие энергию («слабые звенья») будут вести себя при землетрясениях как пластичные «предохранители» и защищать конструктивную систему от образования в ней неустойчивых механизмов, нежелательных хрупких отказов и чрезмерных повреждений.

В нормах, ориентированных на применение метода капаситивного проектирования, значения расчетных сейсмических нагрузок на здания определяются с помощью «спектров расчетных реакций», ординаты которых уменьшены относительно ординат «спектров упругих реакций» с помощью коэффициентов редукции. Степень

уменьшения ординат «спектров упругих реакций» зависит от способности конструктивных систем зданий к пластическому деформированию.

Значения коэффициентов редукиции (q), принятые в нормах некоторых стран для железобетонных конструктивных систем с низкой (L), средней (M) и высокой (H) способностью к пластическому деформированию, приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Значения коэффициентов редукиции q

Нормы	Типы железобетонных конструктивных систем								
	Рамные каркасы			Системы стен			Системы рам и стен		
	Классы пластичности								
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
EN 1998-1:2004	1,5	3,9	5,85	1,5	3,6	5,4	1,5	3,6	5,4
ASCE 7-10 (США, 2010)	3,0	5,0	8,0	2,0	4,0	5,0	2,0	4,5	7,0
NZS 1170.5 (Н. Зеланд., 2005)*	1,35	4,29	8,57	1,35	4,29	7,14	1,35	4,29	7,14
BCLJ (Япония, 2004)	2,22	2,5	3,33	2,0	2,5	2,86	1,82	2,22	2,5
* – для зданий с периодами колебаний по основному тону более 0,7 сек.									

Из табл. 1 наглядно видно, что чем большей способностью к пластическому деформированию обладают конструктивные системы, тем более низкие уровни расчетных сейсмических нагрузок для них предусматриваются, и тем меньшей прочностью будут обладать их конструкции. Обращает на себя внимание также тот факт, что значения q , принятые в нормах Японии для конструктивных систем классов M и H, имеют, по сравнению с другими нормами, не только сравнительно небольшие различия между собой, но и значительно меньшие величины.

Наиболее серьезную практическую проверку «capacity design method» прошел при сильном землетрясении, произошедшем 22.02.2011 г. вблизи города Christchurch (Новая Зеландия). Последствия этого сейсмического события показали, что здания с пластичными «предохранителями» и без них имели после землетрясения разный характер повреждений, но примерно одинаковые степени повреждений. Причем, восстановление эксплуатационной пригодности большинства зданий с пластичными «предохранителями», из-за их чрезмерно высоких повреждений, было признано нецелесообразным.

Обобщая итоги землетрясения Christchurch, президент Новозеландского общества сейсмостойкого строительства S. Pampanin отметил [4], что текущая философия проектирования пластичных конструктивных систем, основным элементом которой является «capacity design method», неизбежно приводит к повреждениям зданий при сейсмических воздействиях и «...неявно подразумевает, что *пластичность=повреждение*».

После землетрясения Christchurch сейсмические нагрузки на новые здания в Новой Зеландии были значительно увеличены. Кроме того было принято, что проекты зданий

с периодами колебаний более 1,5 сек должны являться предметами специального изучения.

Землетрясение Christchurch наглядно продемонстрировало, что способность зданий к пластическому деформированию, безусловно, является неотъемлемым свойством их сейсмостойкости, но к возможности существенно поступиться прочностью конструкций в пользу их большей пластичности следует относиться с осторожностью.

Это суждение не является субъективным. Так, например, хотя в Еврокодах отсутствуют ограничения на высоту проектируемых зданий, в руководстве к Еврокоду 8, составленном специалистами Великобритании и Франции [5], область применения EN 1998-1:2004 ограничена зданиями высотой не более 40 м. Причину этого председатель комитета Британского института стандартов по Еврокоду 8 E. Booth объяснил следующим [6]: «Во-первых, такие структуры, как высокие или гибкие здания, для которых важны величины их перемещений, а не только сил, не имеют никаких преимуществ от высоких уровней пластичности. Во-вторых, акцент на обеспечение эксплуатационных качеств зданий делает опцию их высокой пластичности менее привлекательной».

Учитывая данные о поведении многоэтажных зданий при землетрясениях и результаты их динамических испытаний, в НТП было принято, что при определении уровня расчетных сейсмических нагрузок на высотные здания, проектируемые с использованием метода капаситивного проектирования, значения коэффициента редукции следует принимать не более, соответствующих среднему классу пластичности.

Третья проблема была связана с учетом социально-экономической значимости высотных зданий при нормировании приходящихся на них сейсмических нагрузок.

В EN 1998-1:2004, как и в большинстве современных зарубежных норм, все здания, в зависимости от опасности их разрушения для жизни людей, от необходимости их функционирования сразу после землетрясения и от социально-экономической значимости последствий их разрушения, дифференцированы по ответственности на четыре класса. Каждому классу ответственности присвоено значение коэффициента ответственности γ , на которое следует умножать характеристики или эффекты сейсмического воздействия.

В соответствии с принятой классификацией:

- здания, функционирование которых необязательно сразу после землетрясения, и здания без помещений с длительным скоплением большого количества людей, вне зависимости от их высоты, относятся к классу II (обычные здания), для которого $\gamma=1,0$;
- здания, функционирование которых необходимо сразу после землетрясения, и здания с помещениями для длительного скопления большого количества людей (например, с залами для лекций), вне зависимости от их высоты, относятся к классу III, для которого γ равно: по EN 1998-1:2004 – 1,2; по нормам США – 1,25.

По нашему мнению, значения коэффициента ответственности 1,0...1,25 явно не соответствуют высокой социально-экономической значимости высотных зданий и недостаточны для исключения возможных негативных последствий:

- определения сейсмических нагрузок на высотные здания с помощью спектров реакций, построенных при $\xi=5\%$ и имеющих вероятность не превышения нормализованных значений 50% (вероятность превышения 50%);
- использования в расчетах высотных зданий допущения о возможности одинаковой редукции величин сейсмических нагрузок, определенных для основных и высших форм колебаний зданий линейно-спектральным методом;
- значительного увеличения, по сравнению со зданиями малой и средней этажности, количества циклов колебаний высотных зданий при землетрясениях.

На 8-м Всемирном конгрессе в Дубаи (2008 г.) сопредседатель «Совета по высотным зданиям и городским поселениям» М. Willford (США) отметил: «Большинство действующих в настоящее время строительных норм (включая Еврокод 8 и нормы США) не применимы для проектирования современных высотных зданий и их использование приводит к неэффективному и потенциально небезопасному строительству».

К настоящему времени в США составлен ряд документов (TBI 2010; SFDBI 2014; LATBSDC 2014), содержащих положения рекомендательного характера по расчету высотных зданий с учетом их высокой социально-экономической значимости. Однако в нормативные документы эти положения пока не включены.

В НТП, разработанном в АО «КазНИИСА», высотные здания отнесены к объектам, разрушения которых: способны вызвать тяжелые социально-экономические последствия; представляют существенную опасность для людей, находящихся в здании и в близости от него; могут вызвать завалы городских магистралей и улиц, нарушающие возможность проведения аварийно-спасательных работ после землетрясений.

В соответствии с положениями НТП:

- горизонтальные компоненты сейсмических воздействий, принимаемых во внимание при проверке требований к конструктивным системам высотных зданий, следует описывать спектрами реакций, построенными при $\xi=2,5\%$ и имеющими вероятность не превышения нормализованных значений 84% (вероятность превышения 16%);
- вертикальные компоненты сейсмического воздействия следует описывать спектрами реакций, построенными при $\xi=5\%$ и имеющими вероятность не превышения нормализованных значений 84%.

Принятая в НТП методика описания сейсмических воздействий:

- одновременно учитывает повышенную ответственность высотных зданий и их низкую способность к диссипации энергии сейсмических колебаний;

- позволяет, по сравнению с методикой, предусматривающей применение мультипликативного коэффициента, получить более реалистичные оценки величин расчетных сейсмических нагрузок на высотные здания с большими периодами колебаний по основному тону (более 1,5...2,0 секунд).

Заключение

Высотные здания являются композиционными доминантами современных городов и символами научно-технического прогресса, поэтому все требования к их проектным решениям невозможно формализовать в рамках нормативных документов. Учитывая этот факт, в НТП рекомендовано сохранить практику проектирования высотных зданий с использованием адресных технических условий, в которых положения НТП должны быть конкретизированы исходя из фактических условий строительства, конструктивно-планировочных особенностей зданий и вида используемых материалов.

В НТП представлена только одна из возможных концепций обеспечения сейсмической безопасности высотных зданий, но не исключена возможность применения альтернативных концепций, основанных на признанных научных положениях, апробированных технических решениях и результатах соответствующих испытаний.

Разработанное НТП апробируется в настоящее время при проектировании нескольких реальных объектов. Предполагается, что в зависимости от результатов апробации в НТП, при необходимости, могут быть внесены некоторые уточнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашимбаев М.У., Ицков И.Е. *Проблемы обеспечения надежности зданий повышенной этажности, возводимых в сейсмических районах. Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. №4, 2005.*
2. *Recommendations for the Seismic Design of High-rise Buildings. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. 2008.*
3. *EN 1998-1: 2004 Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.*
4. *S. Pampanin. Reality-Check and Renewed Challenges in Earthquake Engineering: Implementing Low-Damage Structural Systems – from Theory to Practice. 15WCEE in Lisbon, Portugal, September 2012.*
5. *Manual for the seismic design of steel and concrete buildings to Eurocode 8. 2010.*
6. *E. Booth, Z. Lubkowski. Creating a vision for the future of Eurocode 8. 15WCEE in Lisbon, Portugal, September 2012.*