

ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ. ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ПОДХОДЫ

В.С. Семенов

Дан анализ архитектурно-конструктивных принципов сейсмозащиты зданий и сооружений, базирующихся на современных концепциях и подходах обеспечения безопасности населения в зоне чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: архитектурно-конструктивные принципы сейсмозащиты; конструктивная сейсмобезопасность; концепции; сейсмостойкость.

Принципы обеспечения сейсмобезопасности по области их применения можно разделить на две большие группы. К первой мы относим градостроительные (сейсмозащита территорий), а ко второй – архитектурно-конструктивные (сейсмозащита зданий, сооружений). Не останавливаясь на первой группе, которая совершенно незаслуженно обойдена вниманием специалистов (это тема другой статьи), рассмотрим архитектурно-конструктивные принципы обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений в их историческом аспекте.

Основные архитектурно-конструктивные принципы проектирования сейсмостойких зда-

ний и сооружений достаточно подробно описаны как в инструктивно-нормативной литературе [1–4], так и в известных работах С.В. Полякова, Л.Ш. Килимника и А.В. Черкашина [5], Б.А. Кирикова [6, 7], В.М.Бондаренко, Б.М. Гусева и А.М. Курзанова [9], С.Б.Смирнова [10–11], А.М. Уздина [8] и др. Эти принципы базируются на результатах исследований нескольких поколений известных ученых в области теории сейсмостойкости (М. Био, Г. Хаузнера, Н. Ньюмарка, Э. Розенблюэта, И.Л. Корчинского, И.И. Голденבלата, К.С. Завриева, Н.А. Николаенко, С.В. Полякова, Я.М. Айзенберга и др.). По мнению проф. Н.П. Абовского, эти принципы

можно было бы назвать “рациональным конструктивным формообразованием сейсмостойких зданий” [12].

В наиболее общем виде “*фундаментальные принципы конструирования сейсмостойких зданий, лежащие в основе не только древних, но и современных антисейсмических конструктивных решений*” сформулированы Б.А. Кириковым [7]. Это:

1. **Принцип симметрии:** веса и жесткости в конструкции должны быть распределены равномерно и симметрично относительно плоскостей симметрии, проходящих через центр тяжести сооружения.

2. **Принцип гармонии:** необходимо выдерживать пропорциональность в размерах здания, при этом длина или высота его не должны быть чрезмерно большими.

3. **Принцип антитяжести:** необходимо делать сооружение как можно более легким, с центром тяжести, расположенным как можно ниже.

4. **Принцип эластичности:** материалы в конструкции желателно применять прочные, легкие, обладающие упругими свойствами, конструкции из них должны иметь однородные свойства.

5. **Принцип замкнутого контура:** несущие элементы конструкции должны быть связаны между собой, образуя замкнутые контуры как в вертикальном направлении, так и в горизонтальном.

6. **Принцип фундаментальности:** фундаменты сейсмостойких конструкций должны быть прочными, достаточно глубоко заложеными, желателно на податливых прослойках или специальных субструкциях, заменяющих плохие грунты, для обеспечения однородности и прочности грунтового основания.

7. **Принцип сейсмоизоляции:** применять устройства, снижающие интенсивность колебательных процессов, передаваемых от грунта на здание.

К этому можно добавить и еще один принцип, о котором упоминают Б.А. Кириков и другие ученые.

8. **Принцип гарантированного качества** выполнения СМР. Б.А. Кириков предупреждает, что к этим принципам надо относиться так же, как и к любым другим – их не обязательно полностью соблюдать. Разумеется, можно строить очень высокие или несимметричные сооружения, но в этом случае надо принять какие-то дополнительные меры, чтобы обеспечить их прочность и устойчивость при землетрясении.

Многие исследователи отмечают, что принципы симметрии, гармонии, антитяжести, эластичности и др. в нормативной литературе почти не раскрываются. Из учебной литературы, затрагивающей эти вопросы, можно назвать ставшую библиографической редкостью книгу К. Арнольда и Р. Рейтермана “Архитектурное проектирование сейсмостойких зданий” [13] и учебник американского специалиста А. Чарлесона (Charleson A., *Seismic design for architects*) [14].

Перечисленными выше принципами целесообразно руководствоваться как функциональными посылками рационального формообразования. Учитывая неопределенность и сложность сейсмической нагрузки, необходимо в первую очередь стремиться снизить уровень ее воздействия на здания или сооружения [12].

Концептуальные основы проектирования сейсмостойких зданий и сооружений, базирующиеся на современных представлениях теории сейсмостойкости сооружений и последствиях последних разрушительных землетрясений, изложены в работе [9, с. 18–27].

Суть этой концепции состоит в обязательном выполнении трех условий:

- несущие конструкции зданий и сооружений должны обладать запасом сейсмостойкости, достаточным для **неоднократного** восприятия расчетной сейсмической нагрузки без существенных повреждений;
- несущие конструкции зданий и сооружений должны обладать запасом сейсмостойкости, достаточным для **однократного** восприятия сейсмической нагрузки, превышающей расчетную на один балл, без обрушения сооружения в целом или его отдельных частей;
- инженерные коммуникации должны обладать такой же сейсмостойкостью, как здания и сооружения.

Для достижений поставленной цели расчет сооружений и коммуникаций на сейсмическую нагрузку, соответствующую сейсмичности площадки, должен проводиться по второму предельному состоянию; расчет на нагрузку, превышающую сейсмичность площадки на один балл – по первому предельному состоянию.

Согласно этой концепции, при проектировании особо ответственных зданий и сооружений несущие конструкции должны быть рассчитаны по второму предельному состоянию на нагрузки, превышающие расчетную сейсмичность площадки на один балл и по первому предельному состоянию на нагрузки, превышающие расчетную сейсмичность площадки на два балла.

Поставленная авторами статьи цель соответствует основным положениям СНиП 2.01.07–85* “Нагрузки и воздействия” (СП 20.13330.2011) и означает отказ от практики балансирования на грани сейсмического разрушения сооружений при недостаточности знаний о силе и характере предстоящего землетрясения и об особенностях работы сооружений под сейсмической нагрузкой.

В этой же концепции сейсмическое районирование и микросейсморайонирование предлагается проводить *по двум параметрам: по ускорению и по упругому перемещению горизонтальных сейсмических движений грунта основания*. На картах сейсмического районирования каждому району должны быть назначены соответствующие нормативные (средние) ускорения и упругие перемещения сейсмических движений грунта, а также диапазон их изменения в пределах района. Задача микросейсморайонирования – уточнение расчетных значений ускорений и упругих перемещений сейсмических движений грунта в границах диапазона, установленной картой сейсмического районирования.

Сейсмостойкость зданий и сооружений рекомендуется рассчитывать **методом бегущих волн**. При этом необходимо учитывать: пространственный нелинейный характер сейсмической реакции сооружения, податливость и инерционные свойства грунтов основания, накопление повреждений в узлах и элементах сооружения вследствие деструктивной, усталостной, коррозионной, температурно-влажностной деградации материалов.

Расчет особо ответственных зданий и сооружений в общем случае следует **производить методом бегущих волн на индивидуальную искусственную сейсмограмму-эталон**. Сейсмограмма-эталон составляется после разработки расчетной модели сооружения и представляет собой последовательность участков сейсмограмм, наиболее опасных для рассчитываемого сооружения.

Конструктивная схема сооружения должна обеспечить статическую неопределенность внутренних сейсмических сил в основных несущих конструкциях. Для сейсмостойкого строительства неприемлема конструктивная схема сооружения с основными статически определенными несущими связями, не обладающая в предельном состоянии способностью к перераспределению внутренних сил в другие – “лишние” связи.

Конструктивная форма сооружения должна обеспечить сложный пространствен-

ный характер его сейсмических колебаний. Опыт натурных испытаний указывает на трудность возбуждения интенсивных колебаний сооружения, когда его отдельные точки движутся по разным направлениям.

В качестве основного средства достижения поставленной цели практически все ученые рекомендуют применять **специальные конструктивные мероприятия, направленные на снижение сейсмической нагрузки**. Наиболее универсальный и эффективный принцип снижения сейсмической нагрузки – сейсмоизоляция. Применение этого принципа позволяет возводить в сейсмически опасных районах здания и сооружения более разнообразных архитектурных форм и размеров, в частности увеличить строительство зданий с несимметричными конструктивными схемами, расширить применение кирпичной и каменной кладки.

Представитель другой точки зрения на проблемы надежной сейсмозащиты зданий и сооружений профессор С.Б. Смирнов предлагает перейти “к качественно новой эффективной стратегии сейсмозащиты зданий”. Его стратегия содержит восемь принципов, которые “надо развивать и дополнять” [10, с. 28–36]:

1. Отбор, анализ и “принятие на вооружение” всех позитивных практических приемов и конструктивных решений по успешной сейсмозащите зданий, выработанных веками методом проб и ошибок, а также категорический отказ от использования тех конструкций и материалов, которые всегда проявляют низкую сейсмостойкость.

2. Использование только многосвязных строительных конструкций и элементов, имеющих максимальный запас прочности и надежности при минимальной стоимости.

3. Использование только нехрупких строительных материалов (в том числе армированных), обладающих достаточной ударной вязкостью, пластичностью и прочностью при сдвиге и растяжении и категорический отказ от использования хрупких и полухрупких строительных материалов.

4. Обеспечение плавности форм строительных конструкций, а также исключение в них и в их элементах резких скачков жесткости, острых углов и зон концентрации напряжений.

5. Частичное или полное отсечение зданий от их подземной части за счет введения надземной опорной плиты, резко повышающей многосвязность здания.

6. Использование особых фундаментов, имитирующих скальное основание.

7. Использование коробчатых железобетонных систем при строительстве многоэтажных зданий.

8. Отказ от сварных соединений.

В своих следующих работах С.Б. Смирнов развивает концепцию ударно-волнового воздействия, основывающуюся на теории волновых процессов и теории ударной прочности материалов. Вот его мнение: “Известно, что при землетрясениях появлению инерционных сил всегда предшествует появление в вертикальных элементах зданий волн поперечного сдвига, вызванных горизонтальными толчками, т. е. толчки и сдвиговые волны первичны, а инерционные силы вторичны. Логично было бы считать именно эти толчки и волны сдвига одной из главных причин сейсмического разрушения зданий, тем не менее, единственной общепринятой причиной сейсмических разрушений сооружений до сих пор считаются инерционные силы” [11, с. 10–14].

Надо сказать, что эту концепцию поддерживают не только отдельные российские ученые, но и киргизские специалисты-сейсмологи (Б.С. Ордобаев и др.).

Следует отметить, что в известных исследованиях обойдена молчанием проблема сейсмостойкого строительства в сложных грунтовых условиях, т. е. весьма распространенный случай сочетания сейсмологии и сложных (в т. ч. слабых) грунтовых условий. Согласно действующим нормам, в этом случае повышается коэффициент сейсмичности и увеличивается величина сейсмической нагрузки, т. е. используется вынужденный прием.

Именно это направление сейсмозащиты успешно развивают в последние годы ученые Сибирского федерального университета (бывший КрасГАСА). Под руководством д.т.н., проф. Н.П. Абовского ими сформулирован новый подход к проектированию сейсмостойких зданий, названный авторами “конструктивной сейсмобезопасностью в сложных грунтовых условиях” [12].

Смысл этого подхода к проблеме сейсмобезопасности заключается в идее прерывания тех связей, через которые на всю систему целиком (т. е. на фундамент и верхнее строение) передается внешнее динамическое воздействие, т.е. без нарушения целостности системы. При сейсмике – это, главным образом, тангенциальные связи (трение) между основанием и фундаментом и лобовое сопротивление фундамента волновому фронту.

Для реализации данной идеи авторами предложены конструкции наземных незаглубленных

сплошных пространственных фундаментных платформ (ПФП) на скользящем слое, расположенном между ПФП и основанием. Такая система в достаточной мере защищена от значительных сейсмических воздействий, а объединение ПФП с верхним строением в цельную многовязную замкнутую систему еще более повышает ее сейсмостойкость.

Перспективность данного решения очевидна, поскольку ПФП имеет повышенную жесткость при относительно малом расходе материала, совмещает в себе ряд функций (конструктивных и эксплуатационных), не нарушает гидрогеологический режим основания и весьма эффективна для строительства в сложных грунтовых условиях.

Таким образом, главной целью конструктивной сейсмобезопасности являются решения, во-первых, по снижению сейсмического воздействия на систему (здание+фундамент) и, во-вторых, по изолированию (демпфирование, перераспределение и т. п.) отдельных частей здания от передающихся на систему сейсмических воздействий.

Данный подход приобретает особое значение в условиях неопределенности внешних воздействий, например, сейсмических.

При анализе существующих принципов сейсмозащиты, нельзя обойти вниманием развиваемую К.В. Козыревым и другими исследователями концепцию резонансного воздействия, основанную на учёте интенсивности, частотного состава и продолжительности землетрясения. По мнению авторов “в выпущенном и утверждённом нормативном документе России не оказалось конструктивных принципов, способных решить проблему сейсмобезопасности всего фонда зданий и сооружений, поскольку существующая теория сейсмостойкости не учитывает главную причину разрушения зданий при сильных землетрясениях – динамику преобладающих частот воздействия. Вхождение в резонанс – вот что является основной причиной разрушения зданий и сооружений при землетрясениях” [15, с. 14–18; 16].

Пять принципов резонансной концепции.

Принцип первый. Недопустимость вхождения в резонанс конструктивных систем здания может быть достигнута одним из следующих способов: **а)** для заданной площадки для строительства с установленными частотами ожидаемого воздействия следует проектировать здания с периодом собственных колебаний, не входящих в резонанс с воздействием; **б)** в случае

привязки разработанного ранее проекта следует размещать здание на площадках, где преобладающие частоты воздействия не совпадают с периодами собственных колебаний зданий; **в)** для вывода зданий из диапазона резонансных частот следует применять системы сейсмоизоляции.

Принцип второй. Использовать разработанный автором концепции “Резонансный метод расчёта зданий и сооружений на сильные сейсмические воздействия”; “резонансный коэффициент динамичности” в этом методе выражается уравнением, устанавливающим зависимость между частотным составом ожидаемого воздействия и периодами собственных колебаний зданий; указанное уравнение даёт возможность определять резонансный коэффициент динамичности конкретно для любого здания с его периодом собственных колебаний на площадке с ожидаемыми частотами сейсмического воздействия. При этом величина коэффициента может иметь любое значение: от минимального до предрезонансного. Кроме того, уравнение позволяет построить кривую воздействия для конкретного здания, которая имеет диапазон от резонансных частот до частот, на которые здание не реагирует. Кривая используется для выбора площадки строительства.

Принцип третий. Карта микросейсмораионирования для резонансной теории должна определять зоны с преобладающими частотами ожидаемого воздействия и соответствующие им ускорения сейсмических волн. Резонансной теории не требуется разграничение территории по бальности, т. к. основными параметрами служат преобладающие частоты воздействия и соответствующие им ускорения на рассматриваемом участке территории. Отсюда следует вывод, что рядом стоящие здания, различающиеся по жесткостным характеристикам, следует рассчитывать на сейсмические нагрузки, значительно отличающиеся друг от друга. В итоге определение максимальной сейсмической силы конкретизируется для каждого здания на любом участке территории.

Принцип четвертый. При отсутствии данных по ожидаемым частотам воздействия резонансный коэффициент динамичности следует принимать исходя из предположения, что период собственных колебаний здания близок к резонансной частоте. При этом следует учитывать, что при уменьшении жёсткости зданий расчётное ускорение уменьшается, а резонансный коэффициент увеличивается. На графике пересечение этих линий даёт наиболее рациональный период собственных колебаний для зданий, подлежащих защите от резонанса. Этот период

собственных колебаний равен 0,43 сек. Здесь ускорение составляет 280 см/сек² для 9 баллов, а резонансный коэффициент – 3,5. Эти величины определены аналитическим путём и могут быть рекомендованы для использования.

Принцип пятый. Определение сейсмической надёжности существующей застройки значительно упрощается, а трудоёмкость снижается. При наличии карты микросейсмораионирования с указанием преобладающих частот ожидаемого воздействия достаточно определить период собственных колебаний рассматриваемого здания и сравнить с преобладающими частотами на карте. Полностью исключается огромная работа по обследованию зданий.

В заключение приведем отдельные предложения из работы [17], вошедшие в последнюю редакцию актуализированного СНиП “Строительство в сейсмических районах” [1].

- Расчеты выполняются на два уровня сейсмических воздействий: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ), для которых принимаются различные предельные состояния. Введение расчетных проверок на два уровня повышает надежность зданий, строящихся в наиболее сейсмоопасных районах.
- Даны указания по снижению сейсмических нагрузок путем применения сейсмоизоляции и других систем регулирования сейсмической реакции сооружения.
- Существенным образом расширен раздел, посвященный конструктивным мероприятиям, в который включены дополнительные рекомендации по проектированию многоэтажных зданий со стальным каркасом, зданий с несущими стенами из крупных блоков, бескаркасных зданий из монолитного железобетона, зданий из объемных блоков.

Таким образом, анализ источников показывает, что в СНГ на данный момент имеются три концепции, направленные на обеспечение сейсмобезопасности зданий и сооружений:

1. Действующая теория сейсмостойкости, которая основывается на силовой составляющей сейсмического воздействия (ускорениях сейсмических волн).

2. Ударно-волновая концепция, обосновывающая свои предположения на преобладающем воздействии на здания и сооружения поверхностных S-волн.

3. Концепция резонансного воздействия, базирующаяся на учёте интенсивности, частотного состава и продолжительности землетрясения.

По нашему мнению все они имеют право на жизнь и только более глубокие теоретические и экспериментальные исследования, а также анализ характера разрушений зданий в процессе происшедших и будущих землетрясений покажет какая из них наиболее полно отражает работу сооружений и обеспечивает их сейсмобезопасность.

Литература

- СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах: Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Мин. Регион. Разв. РФ. М., 2011. 88 с.
- СП 31-114-2004. Правила проектирования жилых и общественных зданий для строительства в сейсмических районах. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2005. 50 с.
- СНиП РК 2.03-30-2006. Строительство в сейсмических районах / Ком. по делам стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва М-ва индустрии и торг. РК. Алматы, 2006. 80 с.
- СНиП КР 20-02:2009. Сейсмостойкое строительство. Гос. агентство по арх. и строит. при правительстве КР. Бишкек, 2009. 102 с.
- Поляков В.С., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. М.: Стройиздат, 1989. 320 с.
- Кириков Б.А. Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции. М.: Наука, 1990. 72 с.
- Кириков Б.А. Сейсмостойкость древних сооружений. М.: Наука, 1992. 136 с.
- Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад С.А. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. 176 с.
- Бондаренко В.М., Гусев Б.М., Курзанов А.М. Концептуальные основы проектирования сейсмостойких зданий и сооружений // ПГС. 1997. № 3.
- Смирнов С.Б. О новых принципах эффективной сейсмоизоляции зданий и о реальной ситуации в этой сфере // ПГС. 1997. № 3.
- Смирнов С.Б. Решение проблемы надежной сейсмозащиты зданий и сооружений // ПГС. 1999. № 10.
- Конструктивная сейсмобезопасность зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях: препринт / под ред. Н.П. Абовского. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2009. 186 с.
- Арнольд К., Рейтерман Р. Архитектурное проектирование сейсмостойких зданий / пер. с нем. Л.Л. Пудовкиной; под ред. С.В. Полякова, Ю.С. Волкова. М.: Стройиздат, 1987. 195 с.
- Charleson A. Seismic design for architects. Architectural Press is an imprint of Elsevier. First edition, 2008. 296 p.
- Козырев К.В., Парфёнов Р.М. Сейсмическая безопасность в странах СНГ. Теория и практика сейсмозащиты зданий и сооружений // Бюлл. строит. техники, 2008. № 10. С.14-18.
- Козырев К.В. Новые подходы в теории сейсмозащиты зданий. Эл. ресурс. Режим доступа: <http://seismics.is-a-chef.org/index.php/ru/news/52-3>
- Развитие концепций и норм сейсмостойкого строительства / С.И. Полтавцев, Я.М. Айзенберг, В.М. Горпинченко, В.А. Ильичев, В.И. Ойзерман. Эл. ресурс. Режим доступа <http://relcom.wwwwsite.ru/BST/seismos.htm>