

С.Х. Достанова¹, Г.Т. Касымова², К.Е.Токпанова³, Салех Гулам Сахи⁴

^{1,4}Сатпаев Университет, г. Алматы, Республика Казахстан

²Международная образовательная корпорация (кампус КазГАСА),
г. Алматы, Республика Казахстан

³Туран Университет, г. Алматы, Республика Казахстан

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Аннотация. В статье рассматриваются основные направления развития теории сейсмостойкости зданий и сооружений. Представлены различные модели системы «здание-фундамент-основание». Большое внимание уделено влиянию основания на сейсмические воздействия и волновой процесс землетрясений.

Ключевые слова: сейсмостойкость, динамика, здания, основания, волновой процесс, сейсмическое воздействие, спектральный метод, энергия, колебания.

Большой вклад в развитие сейсмостойкого строительства внесли казахстанские ученые: академики Т.Ж. Жунусов, Ш.М. Айталиев, д.т.н. Т.Д. Абаканов, коллективы КазНИИСА и института сейсмологии и др., их рекомендации и конструктивные решения помогают современным инженерам строителям возводить здания, сохраняющие свою прочность и безопасность при землетрясениях повышенной интенсивности.

Непредсказуемость сильных землетрясений и их последствий вызывают глобальную тревогу и повышают риск их появлений. В последние годы частые землетрясения (Италия, Китай, Япония и др.) высокой интенсивности и их последствия говорят о необходимости совершенствования теории и практики сейсмостойкого строительства [1-17]. Это объясняется тем, что параметры сейсмического воздействия имеют высокую степень неопределенности, как по спектральному составу, так и по амплитуде, а расчет ведется в детерминированной постановке [1]. Кроме того, в существующих нормах не учитывается взаимное влияние сооружения и основания на сейсмические воздействия, что приводит к некоторым погрешностям результатов расчета.

Недостаточный учет волновых процессов и неточное определение влияния грунтов на сейсмические нагрузки [2] может привести к переоценке несущей способности зданий и сооружений. Инженерный анализ, учитывающий волновые эффекты, должен предусматривать выбор подходящей модели сейсмического движения и определение расчетных параметров сейсмического воздействия. Некоторые ученые полагают, что разрушительное воздействие землетрясения заключается в том, что сейсмическое воздействие инициирует в фундаменте сооружения, бегущие вверх разрушительные поперечные волны, скорость и форма которых зависят от характера сейсмического возмущения, физических и геометрических характеристик сооружения, поэтому проверку прочности конструкций следует выполнять не на стоячие, а на бегущие волны.

В настоящее время появились противоречия между теорией и практикой. Наиболее распространённым методом расчета сооружений на сейсмостойкость является спектральный метод, который основан на определении собственных частот и форм собственных колебаний как резонансных для разрушительных землетрясений, при этом интенсивность воздействия задается коэффициентом сейсмичности. Но как показывают натурные испытания зданий и их фундаментов на сейсмостойкость резонансным методом с помощью вибрационных машин достичь резонансных частот для конструкций очень сложно [3].

В научной школе ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко идея И.И. Гольденבלата [7] нашла свое продолжение в виде метода «трех моделей», отражающего три стадии, через которые проходит конструкция в процессе землетрясения:

А – упругая стадия для расчета на проектируемую интенсивность землетрясения. Конструкция работает упруго в течение всего воздействия, внутренние усилия не превышают предельных. Физико-механические характеристики системы постоянны и такие же, как до землетрясения. Расчет проводится линейно-спектральным методом. Интенсивность воздействия задается коэффициентом сейсмичности. Цель расчета – не допустить повреждений при слабых землетрясениях.

В – упругопластическая стадия для расчета на максимальные расчетные землетрясения. Внутренние усилия в некоторых элементах превышают предельные, они подвергаются пластическому деформированию, возможно выключение связей. Физико-механические характеристики изменяются от цикла к циклу, происходит деградация жесткости во времени. Воздействие задается в виде экстремальных сценарных акселерограмм. Расчет проводится интегрированием нелинейных уравнений движения во временной области. Цель расчета – уточнение процесса локализации и накопления повреждений для выбора расчетной схемы поврежденного объекта. Расчет настолько сложен, что в настоящее время может быть реализован только в упрощенном приближенном виде.

С – упругая стадия несущего ядра для расчета на максимальные расчетные землетрясения. Предполагается, что некоторые из периферийных элементов повреждены или разрушены, но основные несущие элементы не достигли предельного состояния и деформируются упруго. Физико-механические характеристики конструкции изменены, но постоянны во времени; жесткость снижена, демпфирующие свойства возросли. Может быть нарушена симметрия объемно-планировочных решений, что приведет к изгибно-крутильным колебаниям. Расчет проводится линейно-спектральным методом. Интенсивность воздействия задается коэффициентом сейсмичности. Цель расчета – проверка способности поврежденного сооружения выдержать эксплуатационные нагрузки и сопротивляться возможным афтершокам. На основании указанных моделей сформулирован общий критерий сейсмостойкости: сооружение считается сейсмостойким, если его конструкция при заданной схеме повреждений (достижении заданного предельного состояния) сохраняет при расчетном сейсмическом воздействии свою несущую способность.

Существуют и другие подходы для совершенствования теории сейсмостойкого строительства [4-17]. Например, принятая расчетная модель зданий в виде консольного стержня для всех без исключения конструкций, независимо от их размеров является несовершенной. Современные программные комплексы позволяют спроектировать пространственную модель сооружения любой сложности, так что консольная модель уже практически не применяется. Кроме того, волновое сейсмическое движение имеет пространственный характер. Если фундамент достаточно жесткий, воздействие, создаваемое полем волновых сейсмических перемещений под фундаментом здания, в осредненном виде представляет собой вектор сейсмического воздействия. Этот вектор в общем случае содержит и поступательные, и ротационные компоненты. Если фундамент податливый, а длины доминирующих сейсмических волн соизмеримы с размерами конструкции в плане, движение каждой опорной точки происходит независимо, по индивидуальному закону, отражающему процесс прохождения волны, также в результате приводящий к угловым движениям основания и конструкции. Поэтому необходимо, чтобы обе модели были пространственными – и модель сооружения, и модель воздействия. В этом случае они будут соответствовать друг другу и позволят обнаружить качественно новые особенности движения динамических систем. Анализ последствий разрушительных землетрясений последних десятилетий ставит перед исследователями задачу совершенствования принятых моделей путем введения в расчет новых факторов, влияющих на прочность сооружения. Например, недооценивается роль перекрытий в повышении сейсмостойкости здания, в то время как картина повреждения зданий указывает на важную роль перекрытий. Кроме того, в динамических расчетах недостаточно ясна модель, как и какая часть сейсмического воздействия, передается на здание. Указанные в нормах коэффициенты и формулы для их определения не поддаются проверке и уточнению, поэтому противоречат реальному поведению конструкций при землетрясениях. Следующим важным вопросом является то, как это сейсмическое воздействие распространяется по вертикали здания и эти проблемы вносят неопределенность в результаты расчета при проектировании зданий и сооружений.

Наиболее распространенный линейно-спектральный метод основан на рассмотрении стационарности расчетной динамической модели, в то время как сейсмическое воздействие представляет собой нестационарный случайный процесс. Сейсмическое воздействие в спектральном методе представлялось в виде стационарного случайного эргодического процесса с применением корреляционной теории. При этом сейсмические перемещения рассматривались как гармонические колебания, при которых происходят возвратно-поступательные перемещения грунта, изменяющиеся по закону синуса или косинуса. На самом деле землетрясения создают множество хаотичных толчков, т.е. скачкообразных перемещений, которые вызваны происхождением наиболее опасных поверхностных волн сжатия в грунте. Во фронте этих волн скачком появляется скорость перемещения грунта, а за волной она исчезает. Некоторые исследователи утверждают, что попадание собственных колебаний зданий в резонанс с хаотичными толчками

весьма маловероятна, тем более при пластических деформациях и начальных разрушениях здание сразу «уходит» от резонанса, но при этом никак не может уйти от опасного разрушающего воздействия волн среза. Поэтому вероятность разрушения от действия инерционных сил близка к нулю. По многочисленным наблюдениям большинство сейсмических разрушений зданий происходит сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые не успевают раскачать здание, т.е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс. 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.

В результате динамического расчета сооружения на действие разрушительного землетрясения необходимо установить возможность прогрессирующего разрушения или малоциклового усталости элементов несущих конструкций. Поведение конструкций при нагружении ее за пределом упругости зависит не только от мгновенных значений перемещений и ускорений элементов, но и от всей истории нагружения, а именно от напряженно-деформированного состояния сооружения перед приложением сейсмического воздействия. Все это усложняет прогнозирование поведения конструкции здания и сооружения при разрушительных землетрясениях.

В настоящее время сейсмостойкость зданий и сооружений рассчитывается методом бегущих волн. При этом важно учитывать пространственный нелинейный характер сейсмической реакции сооружения, деформационные и инерционные свойства грунтов основания, накопление повреждений в узлах и элементах сооружения вследствие деструктивной, усталостной, коррозионной, температурно-влажностной дегградации материалов. Спектральный метод расчета сооружений на сейсмический резонанс представляет частный случай метода бегущих волн, применимый в пределах линейно-упругой реакции системы «сооружение – грунт основания». Технология спектрального метода должна быть основана на применении реальных динамических характеристик этой системы и очищена от эмпирических коэффициентов, лишенных физического содержания и потому не поддающихся проверке или уточнению экспериментальным путем. В расчетах высотных (более 15 этажей) сооружений на акселерограммы сейсмических воздействий необходимо отказаться от гипотезы мгновенного распространения в сооружении волн напряжений и деформаций и учитывать реальные скорости движения изгибных поперечных волн. Расчет особо ответственных зданий и сооружений в общем случае следует производить методом бегущих волн на индивидуальную искусственную сейсмограмму-эталон. При проектировании особо ответственных зданий и сооружений идентификации подлежит индивидуальная расчетная модель каждого объекта. В качестве основного средства достижения поставленной цели проектирования рекомендуются специальные конструктивные мероприятия, направленные на снижение сейсмической нагрузки на здания и сооружения.

При расчете зданий и сооружений на сейсмостойкость важно также учитывать высвобождаемую в очаге энергию землетрясения. Эта энергия передается к поверхности земли сейсмическими волнами. Объемные и поперечные волны движутся к поверхности с разными скоростями. Существенные изменения волны претерпевают при переходе из скального основания в осадочный слой; в более мягком осадочном слое скорость распространения волн снижается. Если среда, по которой проходят эти волны, слоистая, возникают отражения и преломления на границах, а само волновое движение происходит с частичным рассеиванием. Кроме того, осадочный слой обладает упругопластическими свойствами [4], поэтому, если напряжения в грунте будут превышать предел упругости, возникнут и упругие, и пластические волны. Таким образом, описание близкой к реальной волновой картины у поверхности земли становится самостоятельной сложной задачей. Продвижение бегущей сейсмической волны под фундаментом может привести к раскачиванию и крутильным колебаниям (трехмерным ротациям) сооружения [5]. В этом случае даже при малых углах ротаций происходит перераспределение и рост внутренних усилий в конструкции [6], а при больших углах задача становится геометрически нелинейной [4-6]. Для учета волнового движения под фундаментом и ввода в расчет ротаций применяются интегральная дилатационно-ротационная и дифференцированная модели сейсмического движения грунта. В интегральной дилатационно-ротационной модели объем грунта под фундаментом движется как твердое тело с тремя угловыми и тремя линейными степенями свободы. Дифференцированная модель сейсмического грунтового движения задается векторным полем кинематических параметров, определенным в каждой точке грунта.

При использовании спектрального метода необходимо учитывать нелинейный характер конструкции при однократном нагружении без упрочнения. При использовании метода предельного равновесия предполагается, что вся затрачиваемая энергия передается конструкции при простом однократном нагружении. В действительности же сооружение при сейсмических воздействиях работает в условиях повторно переменных нагружений, это необходимо также исследовать и учитывать в расчетной модели.

Исходя из изложенных фактов, динамический расчет зданий и сооружений на сейсмические нагрузки требует дальнейших разработок и исследований, согласованных с результатами нормативных расчетов и экспериментальных данных. В связи с этим спектральный метод должен модифицироваться в соответствии с новыми требованиями прочности и надежности зданий и сооружений. На основании указанных проблемах сейсмостойкости зданий и сооружений и уровня развития теории сейсмостойкости можно сделать следующие выводы.

Выводы:

1. Имеющиеся противоречия между теорией и практикой сейсмостойкого строительства зданий и сооружений, требуют дальнейшего развития теории и сближение ее к описанию реального поведения конструкций при землетрясениях повышенной и проектной интенсивности.

2. Т.к. землетрясения представляют собой сложный многопараметрический процесс, поэтому необходимо совершенствовать расчетные модели сейсмостойких зданий с учетом переменных физических, геометрических и конструктивных параметров всей системы «здание-фундамент-основание» в процессе землетрясений. Большое внимание необходимо уделять влиянию основания на сейсмические нагрузки и использовать системный подход к исследованию сейсмостойкости системы в целом.

3. В теории недостаточно учитывается волновой процесс землетрясений и нелинейный характер поведения конструкций, это требует развитие двух подходов: детерминированного и недетерминированного к изучению сейсмостойкости зданий и сооружений.

Литература:

1. *Логачев Н.А., Шерман С.И., Леви К.Г. Геодинамическая активность литосферы, ее интегральная оценка и связь с сейсмичностью // Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. – М.: Наука, 1987. – С. 97-108.*
2. *Джинчвелашвили Г.А., Колесников А.В. Расчет каркасных зданий на сейсмические воздействия с учетом развития неупругих деформаций// исследования по теории сооружений. Вестник ЦНИИСК им Кучеренко, №1 (XXVI). – М., 2009. – С. 194-200.*
3. *Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). – М., 2017. – 193 с.*
4. *Позняк Е.В. Развитие методов волновой теории сейсмостойкости строительных конструкций: дисс. ... д.т.н. – М., 2018.*
5. *Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий. – М.: Наука, 2012. – 414 с.*
6. *Назаров Ю.П., Позняк Е.В. Современная концепция интегральной модели сейсмического движения грунта в строительных расчетах на сейсмостойкость // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 9. – С. 74-80.*
7. *Гольденблат И.И., Николаенко Н.А. и др. Модели сейсмостойкости конструкций. – М.: Наука, 1979. – 252 с.*
8. *Конструктивная сейсmobезопасность зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях: препринт / под ред. Н.П. Абовского. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2009. – 186с.*
9. *Абовский, Н. П. Пространственные фундаментные платформы: сб. научн. работ. – Красноярск: КрасГАСА, 2006. – 187 с.*
10. *Шабданов М.Д., Турганбаев О.М. Актуальные проблемы современного сейсмостойкого строительства высотных зданий в Кыргызской республике // «Вестник КГУСТА». – Бишкек, 2014. – №3. – С. 50-55.*
11. *Хусомиддинов С.С. Актуальные проблемы современной сейсмологии. – Ташкент, 2016. – 209с.*
12. *Абаканов Т., Садыров Р.К., Абаканов А.Т., Алмабекова С.М., Шайдулла М. Учебное пособие по расчету каркасных систем на сейсмические воздействия. – Алматы: КазГАСА, 2019. – 150 с.*
13. *Чигринская Л.С. Сейсмостойкость зданий и сооружений: учеб. пособие. – Ангарск: АГТА, 2009. – 107 с.*
14. *Рашидов Т.Р., Сибукаев Ш.М. Сравнительный анализ моделей взаимодействия подземных сооружений с окружающим грунтом при сейсмических воздействиях/ Ин-т механики и сейсмостойкости сооружений АН Руз. – Ташкент, 2011. – С. 1-3.*
15. *Абаканов Т. Основы обеспечения геодинамической (сейсмической) безопасности зданий и сооружений на разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых // Научный журнал «Вестник КазГАСА». – Алматы, 2019. – №4(74). – С. 252-258.*
16. *Кусаинов А.А., Достанова С.Х., Полякова И.М. Динамика и устойчивость сооружений: учеб. пособие. – Алматы, 2016. – 265 с.*
17. *Ye. I. Rogov, A.A. Kussainov, V.V. Gumenyuk. Physical models of solid mass and related processes in interaction with foundations // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE). – 2018. – №2 (2). – P. 65-74.*

References:

1. Logachev N.A., Sherman S.I., Levy K.G. *Geodynamic activity of the lithosphere, its integral assessment and relationship with seismicity // Modern tectonic activity of the Earth and seismicity.* – M.: Nauka, 1987. – P. 97-108.
2. Jinchvelashvili G.A., Kolesnikov A.V. *Calculation of frame buildings for seismic effects taking into account the development of inelastic deformations. Research on the theory of structures. Bulletin of TsNIISK named after Kucherenko, No. 1 (XXVI).* – M., 2009. – P. 194-200.
3. Mkrtychev O.V., Jinchvelashvili G.A. *Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic stability (hypotheses and delusions).* – M., 2017. – 193 p.
4. Poznyak E. V. *Development of methods of the wave theory of seismic resistance of building structures: diss. ... doctor of Technical Sciences.* – M., 2018.
5. Nazarov Yu.P. *Calculation models of seismic effects.* – M.: Nauka, 2012. – 414 p.
6. Nazarov Yu.P., Poznyak E.V. *The modern concept of an integral model of seismic soil movement in construction calculations for seismic resistance // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* – 2016. – №9. – P. 74-80.
7. Goldenblat I.I., Nikolaenko N.A. and other. *Models of seismic stability of structures.* – M.: Nauka, 1979. – 252 p.
8. *Structural seismic safety of buildings and structures in difficult soil conditions: preprint / ed. N.P. Abovsky.* – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2009. – 186 p.
9. Abovskiy N.P. *Spatial foundation platforms: collection of scientific works.* – Krasnoyarsk: KrasGASA, 2006. – 187 p.
10. Shabdanov M.D., Turganbaev O.M. *Actual problems of modern earthquake-resistant construction of high-rise buildings in the Kyrgyz Republic // KGUSTA Bulletin, №3.* – Bishkek, 2014. – P. 50-55.
11. Khusomiddinov S.S. *Actual problems of modern seismology.* – Tashkent, 2016. – 209 p.
12. Abakanov T., Sadyrov R.K., Abakanov A.T., Almabekova S.M., Shaydulla M. *Tutorial on the calculation of frame systems for seismic effects.* – Almaty: KazGASA, 2019. – 150 p.
13. Chygrinskaya L.S. *Seismic resistance of buildings and structures. Tutorial.* – Angarsk: AGTA, 2009. – 107 p.
14. Rashidov T.R., Sibukaev Sh.M. *Comparative analysis of models of interaction of underground structures with the surrounding soil under seismic impacts / Institute of Mechanics and Seismic Resistance of Structures of the Academy of Sciences of Ruz.* – Tashkent, 2011. – P. 1-3.
15. Abakanov T. *Fundamentals of ensuring geodynamic (seismic) safety of buildings and structures at developed mineral deposits // Scientific journal «Bulletin of KazGASA».* – Almaty, 2019. – № 4 (74). – S. 252-258.
16. Kusainov A.A., Dostanova S.Kh., Polyakova I.M. *Dynamics and stability of structures. Tutorial.* – Almaty, 2016. – 265 p.
17. Ye. I. Rogov, A.A. Kussainov, V.V. Gumenyuk. *Physical models of solid mass and related processes in interaction with foundations // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE).* – 2018. – №2(2). – P. 65-74.

С.Х. Достанова¹, Г.Т. Қасымова², К.Е. Токпанова³,
Салех Гүлам Сахи⁴

^{1,4} Сәтбаев университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

²Халықаралық білім беру корпорациясы (ҚазБСҚА кампусы),
Алматы қ., Қазақстан Республикасы

³Туран университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

ҒИМАРАТТАР МЕН ИМАРАТТАРДЫҢ СЕЙСМИКАҒА ТӨЗІМДІЛІГІ ТЕОРИЯСЫНЫҢ ДАМУЫНЫҢ НЕГІЗГІ БАҒЫТТАРЫ

Аңдатпа. Мақалада ғимараттар мен имараттардың сейсмикаға төзімділігі теориясының негізгі даму бағыттары қарастырылған. «Ғимарат-іргетас-негіз» жүйесінің әр түрлі модельдері ұсынылған. Іргетастың сейсмикалық әсерлерге және жер сілкіністерінің толқындық процесіне әсеріне көп көңіл бөлінген.

Түйін сөздер: сейсмикаға төзімділік, динамика, ғимараттар, іргетастар, толқындық процесс, сейсмикалық әрекет, спектрлік әдіс, энергия, тербелістер.

S. Kh. Dostanova¹, G.T. Kasymova², K.E. Tokpanova³,
Saleh Ghulam Sahi⁴

^{1,4} Satpayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

²International Educational Corporation (KAZGASA campus),
Almaty, Republic of Kazakhstan

³Turan University, Almaty, Republic of Kazakhstan

MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF THE THEORY OF SEISMIC RESISTANCE OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Annotation. The article discusses the main directions of development of the theory of seismic resistance of buildings and structures. Various models of the «building-foundation-foundation» system are presented. Much attention is paid to the influence of the foundation on seismic effects and the wave process of earthquakes.

Keywords: seismic resistance, dynamics, buildings, foundations, wave process, seismic action, spectral method, energy, vibrations.