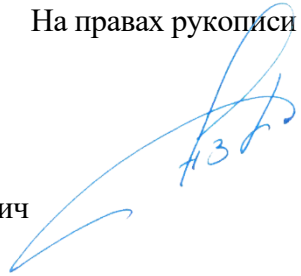


На правах рукописи

Валиев Азамат Джониевич



**ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ
КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ
С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ**

Специальность 2.1.9. Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владикавказ – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО
«Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»

**Научный
руководитель**

кандидат технических наук, доцент
Абаев Заурбек Камболатович

Официальные оппоненты

Рыбаков Владимир Александрович
доктор технических наук, доцент,
Высшая школа промышленно-
гражданского и дорожного
строительства ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический
университет Петра Великого», доцент

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра сопротивления материалов,
теоретической и строительной
механики ФГБОУ ВО «Дагестанский
государственный технический
университет», заведующий кафедрой

**Ведущая
организация**

ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет»

Защита диссертации состоится «30» мая 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.295.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» по адресу: 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» <http://www.dstu.ru/>.

Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru/>.

Автореферат разослан «28» апреля 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
К.Т.Н., доцент



Х. Р. Зайнулабидова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Большинство зданий и сооружений существующего жилого фонда сейсмических регионов Российской Федерации (27 из 89 субъектов; 24,2 % от общего населения страны) построено до актуализации нормативной документации на строительство в сейсмических регионах, в связи с чем актуальной становится задача оценки соответствия фактической сейсмостойкости зданий нормативным требованиям с учетом физической деградации свойств строительных материалов и конструктивных особенностей, присущих различным типам сооружений. Крупнопанельные здания (КПЗ) из сборного железобетона были одним из самых распространенных конструктивных типов массовой застройки в СССР. Методы расчета, регламентированные в своде правил СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» и СП 335.1325800.2017 «Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования», не позволяют в полной мере учесть нелинейную динамическую работу сооружений в результате сейсмического воздействия. Поскольку многим из этих зданий почти 50 лет и их техническое состояние зачастую бывает неудовлетворительным, актуальным становится вопрос оценки сейсмостойкости крупнопанельного жилого фонда сейсмических районов с учетом отмеченных особенностей.

Степень разработанности. Крупнопанельные здания подвержены негативному влиянию недостаточного обслуживания и окружающей среды. Значительное количество таких зданий в России и Европе требует анализа механизмов их повреждения и обрушения. Российские нормы и стандарты должны включать положения, касающиеся сборных крупнопанельных конструкций. Большинство зданий были построены в период массовой застройки крупнопанельными домами, и, ввиду своего возраста, могут находиться в плохом состоянии. Важно определить, следует ли восстанавливать их, реконструировать или сносить – для решения этого вопроса должна быть разработана соответствующая научно-обоснованная методология.

Исследованиями поведения крупнопанельных железобетонных стен при сейсмических воздействиях занимались такие ученые как Ашкинадзе Г. Н., Шапиро Г. И., Махвиладзе Л. С., Поляков С. В., Маклакова Т. Г., Бейкер Д., Пауэлл Г., Олива М., Клофф Р., Соколов Б. Ф. и многие другие. Исследованиями работы и моделирования швов крупнопанельных зданий занимались

Данель В. В., Зенин С. А., Колчунов В. И. и др. Большой вклад в исследования крупнопанельных зданий в общем внесли такие организации, как ЦНИИЭП жилища, ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко.

Однако, несмотря на значительные успехи в теории и практике проектирования крупнопанельных зданий, можно отметить недостаточные исследования нелинейной работы стыков при сейсмических воздействиях. Представленные в литературе вибродинамические натурные исследования позволяют получить качественные представления об основных динамических параметрах сооружения (период колебаний, декремент затухания) и характере его повреждаемости, что, безусловно, является крайне необходимым для проектирования зданий. В то же время данных результатов недостаточно для численного параметрического моделирования нелинейной работы здания при сейсмических воздействиях и последующей оценке его сейсмостойкости.

Цель работы: разработка эффективных методов оценки сейсмостойкости и их реализация для крупнопанельного жилого фонда.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи:**

1. Разработать методику моделирования работы и накопления повреждений крупнопанельных зданий с учетом физической нелинейности.

2. Провести инкрементальный динамический анализ разработанных моделей, включая выбор и масштабирование записей землетрясений для рассматриваемой площадки строительства.

3. Разработать кривые повреждаемости крупнопанельных жилых зданий серии 92С, в том числе определить критерии уровней работоспособности.

4. Разработать организационные рекомендации и предложения для внедрения результатов работы в практику снижения сейсмического риска в Российской Федерации.

Объект исследования – крупнопанельные жилые здания (КПЗ) серии 92С и ее модификации.

Предмет исследования – эффективные методы оценки сейсмостойкости зданий и сооружений в нелинейной постановке.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались метод конечных элементов, методы математического моделирования сейсмических воздействий, строительной механики и динамики сооружений. Результаты

исследований сопоставлялись с известными результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Научная новизна диссертации:

– Предложена методика моделирования крупнопанельных жилых зданий с учетом физически нелинейной работы элементов сооружений, отличающаяся использованием комбинации нелинейных конечных элементов пластин и 2-узловых нелинейных конечных элементов для моделирования нелинейной работы горизонтальных стыков.

– Разработана методика построения кривых повреждаемости для крупнопанельных жилых зданий на основе инкрементального динамического анализа, отличающаяся выбором записей землетрясений для рассматриваемой строительной площадки и учетом различных интенсивностей сейсмического воздействия.

– Впервые разработаны кривые повреждаемости для крупнопанельных жилых зданий, представляющие собой графические отображения вероятности превышения определенного уровня повреждений при сейсмическом событии определенной интенсивности.

– Разработаны рекомендации и предложения, позволяющие повысить эффективность оценки сейсмического риска крупнопанельных жилых зданий в сейсмических районах, отличающиеся использованием кривых повреждаемости в рамках текущей практики снижения последствий сейсмических событий.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

– Предлагаемые решения позволяют обеспечить более точную и надежную оценку сейсмической уязвимости существующих крупнопанельных жилых зданий и предоставят ценную информацию о стратегиях снижения риска и сейсмоусиления.

– Потенциальный вклад в разработку научно обоснованной политики и нормативных актов по строительству, оценке сейсмостойкости и сейсмоусилению зданий в сейсмических районах.

Положения, выносимые на защиту:

– Методика моделирования крупнопанельных жилых зданий с учетом физически нелинейной работы элементов сооружений;

– Методика проведения инкрементального динамического анализа, включая выбор и масштабирование записей землетрясений для рассматриваемой площадки строительства;

– Кривые повреждаемости крупнопанельных жилых зданий, включая критерии для определения уровней работоспособности.

– Рекомендации и предложения по внедрению результатов работы в практику снижения сейсмического риска в Российской Федерации.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 2.1.9. *Строительная механика*, а именно п. 2. Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета; п. 7. Теория и методы расчета зданий и сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы, пожары, аварии и так далее).

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов исследований подтверждается использованием апробированных методов динамики сооружений и опытом сейсмостойкого строительства. Результаты исследований соответствуют данным других авторов, имеющимся по отдельным вопросам, затронутым в диссертации.

– Работа выполнялась в рамках проекта № 24-79-00087 «Исследование нелинейной сейсмической реакции крупнопанельных зданий») Российского научного фонда в рамках Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными «Проведение инициативных исследований молодыми учеными».

– Работа поддержана премией Главы Республики Северная Осетия-Алания среди молодых ученых и специалистов за 2023 г.

– Работа поддержана грантом «Студенческий стартап» Фонда содействия инновациям (договор № 1463ГССС15-L/88312).

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на следующих конференциях и семинарах:

– Научно-практической конференции «Пространственные модели и методы расчета сейсмостойкости сооружений», приуроченной к 75-летию профессора Ю. П. Назарова (Москва, 17–18 декабря 2024 г.).

– V-й Международной научно-технической конференции “International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering” (Владимир, 2024 г.).

– XV-й Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием (Сочи, 2023 г.).

– 7-й Международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (Сочи, 2023 г.).

– Исследование было отмечено благодарностью Председателя Парламента Республики Северная Осетия-Алания Т. Р. Тускаева (Распоряжение от 06.02.2023 г. № 11/лс).

– Результаты исследования были внедрены в работу администрации местного самоуправления г. Владикавказа (акт о внедрении результатов научного исследования в практику от 22.01.2024 г. № 42) и Министерства строительства и архитектуры Республики Северная Осетия-Алания (акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы от 08.12.2023 г. № 01-13/3-61) в рамках реализации государственной программы Республики Северная Осетия-Алания «Обеспечение доступным и комфортным жильем граждан в Республике Северная Осетия-Алания» на 2023–2025 годы.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе 6 – в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, и 4 статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы и 5 приложений. Ее содержание изложено на 187 страницах, проиллюстрировано 95 рисунками и 20 таблицами. Библиографический список литературы содержит 116 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность выполненных исследований.

В первой главе рассмотрена история появления и развития крупнопанельного домостроения в СССР. Было определено, что наибольшее распространение в сейсмоопасных регионах получила типовая серия 1–464.

Была проведена оценка существующего жилого фонда города Владикавказа, выявлены основные типовые серии многоквартирных крупнопанельных жилых зданий, обозначено распределение населения по территории Республики Северная Осетия-Алания, определены основные дефекты указанных типовых зданий, проанализированы

основные типы конструктивных схем сейсмостойких крупнопанельных зданий.

Наибольшее распространение в г. Владикавказе получила типовая крупнопанельная серия 92С и ее модификации 92-05с-84-ОР, 92-06с-84-ОР, 92-07-854-ОР, представляющие собой дома этажностью 5, 7, 9, 10, 11, 12 и 16 этажей с количеством секций 1, 2, 4, 6.

Было установлено, что при общем количестве многоквартирных домов в городе 1780 шт., 148 являются крупнопанельными. Также, что при общем количестве жителей города 292 000 человек, 35 000 проживают в крупнопанельных зданиях, что составляет 11,6 %, при отношении крупнопанельных домов к остальным 8,3 %.

Для расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия высокой интенсивности предлагается использовать явные методы интегрирования уравнений движения. Уравнение движения может быть записано в матричном виде следующим образом:

$$M\ddot{u}_t + f_t^{int} = f_t^{ext} \quad (1)$$

где f_t^{int} – вектор внутренних сил; f_t^{ext} – вектор внешних сил.

Вектор ускорений может быть определен согласно формуле 2:

$$\ddot{u}_t = M^{-1}(f_t^{ext} - f_t^{int}) \quad (2)$$

Векторы скоростей v и перемещений u на соответствующем шаге определяются, согласно формулам 3 и 4:

$$v_{t+\Delta t/2} = v_{t-\Delta t/2} + \ddot{u}_t \Delta t \quad (3)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + v_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2} \quad (4)$$

Вторая глава посвящена описанию методов строительной механики, снижающих трудоемкость расчетных моделей, основными из которых являются: упрощение геометрии (удаление отверстий и элементов), оптимизация сетки конечных элементов, применение эффективных решателей и алгоритмов.

Также были описаны численные методы строительной механики и проведено исследование динамического отклика системы с одной степенью свободы различными численными методами. Система с одной степенью свободы, которую мы рассматриваем, имеет следующие параметры: масса $m = 0,028 \text{ кН} \times \text{с}^2/\text{м}$, жесткость $k = 1,13 \text{ кН/м}$, период колебаний $T_n = 1 \text{ сек}$ (что соответствует частоте $n = 6,283 \text{ рад/сек}$) и коэффициент затухания $\zeta = 0,05$. Результаты исследования представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 можно сделать вывод, что наиболее точным для указанной системы является метод Ньюмарка. Также установлено, что при уменьшении шага интегрирования, результаты, полученные другими методами прямого интегрирования, приближаются к значениям, полученным методом Ньюмарка. Кроме того, можно заключить, что линейная формулировка задачи приводит к снижению уровня напряженно-деформированного состояния.

Для прямого интегрирования уравнений движения в дальнейшем использовался метод Ньюмарка-бета ($\beta = 0,25$, $\gamma = 0,5$), являющийся безусловно устойчивым и эффективным для расчета на записи землетрясений с различным шагом интегрирования.

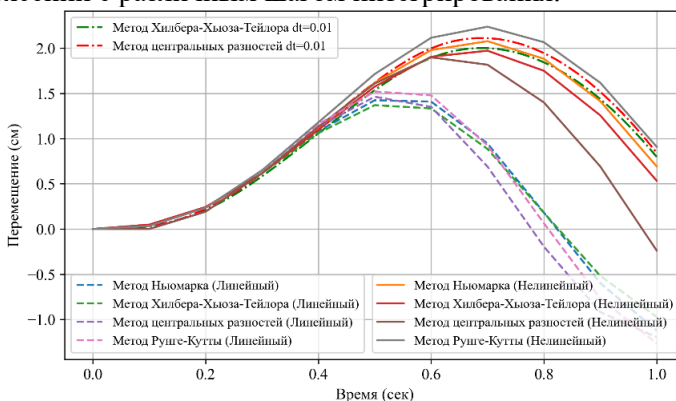


Рисунок 1. Отклик системы (линейной и нелинейной) с одной степенью свободы

Для изучения сейсмической реакции простых стен принимаются следующие расчетные предпосылки:

- Сборные панели остаются линейно упругими – это предполагает, что панели либо сплошные, либо имеют лишь незначительные проемы, и то, что они достаточно усилены;
- Все нелинейное и неупругое поведение происходит в зонах соединений;
- Система перекрытий действует как жесткий диск;
- Фундамент является жестким.

Основные предпосылки и допущения, применяемые при моделировании стыков крупнопанельных зданий (см. рисунок 2):

- Все точки горизонтального сечения после приложения усилий остаются в одной плоскости;
- Для растянутой зоны сечения не учитываются сопротивления бетона на растяжение;

– Эпюры нормальных сжимающих напряжений вдоль стен линейна или билинейна.

Билинейная эпюра сжимающих напряжений позволяет описать все расчетные ситуации и включает как частные случаи, так и линейную и прямоугольную эпюры нормальных сжимающих напряжений.

Расчетная модель объекта исследования моделировалась комбинацией трех конечных элементов: КЭ 44, КЭ 259 и КЭ 255.

Стеновые панели моделируются упругими 4-узловым КЭ 44. Элементы стыков моделируются КЭ 259 – нелинейным 4-узловым конечным элементом, работа которого задается би- или трилинейной диаграммой. Элементы закладных деталей моделируются КЭ 255 – 2-узловым нелинейным элементом, работа которого задается билинейной диаграммой (см. рисунок 2).

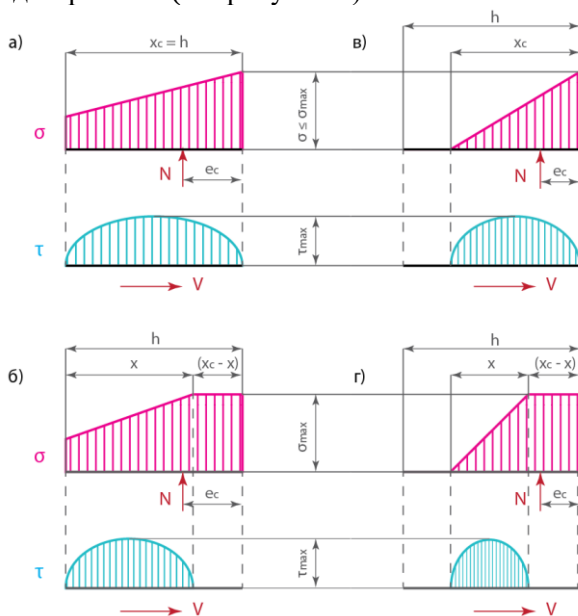


Рисунок 2. Эпюры нормальных и касательных напряжений в горизонтальном сечении бетонной стены при совместном действии сжатия и сдвига:

а, б – сжатие по всей длине стены, соответственно, для линейной и билинейной эпюр,
 в, г – сжатие на части длины стены

В программе ЛИРА-САПР нелинейная работа элемента стыка моделируется путем комбинации двух нелинейных элементов: КЭ 259, моделирующий работу шва, и КЭ 255, моделирующий работу шпонки (см. рисунок 3).

КЭ 259 представляет собой четырехгранный элемент, адаптивной формы с возможностью задания би- и трилинейной диаграммы работы.

$$\text{а) } \sigma_m \leq 1.15R_m^{2/3} \quad \lambda_m = 1.5 \cdot 10^{-3} R_m^{-2/3} t_m \quad (5)$$

$$\text{б) } 2R_m^{2/3} \geq \sigma_m \geq 1.15R_m^{2/3} \quad \lambda_m = 5 \cdot 10^{-3} R_m^{-2/3} t_m \quad (6)$$

Коэффициент податливости шва определяется согласно формуле:

$$\lambda_{c,pl} = \left(\lambda_m + \lambda'_m + \frac{h_{sl}}{E_b} \right) \frac{A_{pl}}{A_{pl}} \quad (7)$$

где λ_m и λ'_m – коэффициенты податливости при сжатии, соответственно, верхнего и нижнего горизонтальных растворных швов; R_m – кубиковая прочность раствора; t_m – толщина растворного слоя; h_s – высота (толщина) опорной части панели перекрытия; E_b – начальный модуль упругости бетона опорной части плиты перекрытия; A_{pl} – площадь платформенных участков стыка, через которые передаются сжимающие напряжения.

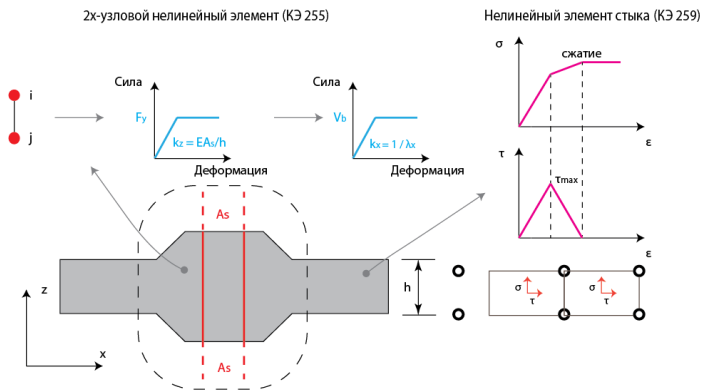


Рисунок 3. Реализация элемента стыка в ПК ЛИРА-САПР

Расчетная прочность при сдвиге V_{kb} одной шпонки бетонного шпоночного соединения принимается равной меньшему из значений усилий $V_{sh,b}$; $V_{c,b}$; $V_{crc,b}$, соответствующих разрушению шпонки, соответственно, от среза, смятия и образования наклонных трещин, определяемых по формулам 8–10:

$$V_{sh,b} = 1.5R_{bt} \cdot A_{sh} ; \quad (8)$$

$$V_{c,b} = R_{b,loc} \cdot A_c ; \quad (9)$$

$$V_{crc,b} = 0.7R_{bt} \cdot A_j ; \quad (10)$$

где R_{bt} – расчетное сопротивление бетона замоноличивания стыка на растяжение; $R_{b,loc}$ – сопротивление шпонки местному смятию; A_{sh} – площадь среза шпонки; A_c – площадь смятия шпонки; A_j – площадь продольного сечения стыка, приходящаяся на одну шпонку.

Прочность второго участка определяется как прочность на сжатие свариваемых арматурных выпусков.

Коэффициент податливости для каждого участка определяется согласно АЗ СП 335.1325800.2017, в соответствии с которым первый участок определяется по формуле 11:

$$\lambda_{\tau,s} = \lambda_{\tau,b} + \lambda_{\tau,m} \quad (11)$$

где $\lambda_{\tau,b}$ – коэффициент податливости бетона шпонки определяется по формуле 12; $\lambda_{\tau,m}$ – коэффициент податливости выпусков определяется по формуле 13:

$$\lambda_{\tau,b} = \frac{l_{loc} \left(\frac{1}{E_{b,w}} + \frac{1}{E_{b,mon}} \right)}{A_{loc}} ; \quad (12)$$

$$\lambda_{\tau,m} = \frac{6}{d_s n_s} \left(\frac{1}{E_{b,w}} + \frac{1}{E_{b,mon}} \right) ; \quad (13)$$

где l_{loc} – условная высота шпонки (принимаемая при определении ее податливости при сдвиге), равная 250 мм; A_{loc} – площадь сжатия шпонки, через которую передается в соединении сжимающее усилие (мм²); $E_{b,w}$ – модуль деформации бетона сборного элемента (МПа); $E_{b,mon}$ – модуль деформации бетона замоноличивания вертикального стыка (МПа); d_s – диаметр арматурных связей между сборными элементами (мм); n_s – количество арматурных связей между сборными элементами.

Следующим шагом было упрощение пространственной расчетной модели с целью снижения трудоемкости. На первом этапе проведен переход от проверенной исходной модели с проемами к упрощенной модели, в которой стеновые панели с проемами были заменены на сплошные стеновые панели с редуцированной жесткостью. Затем численно уточнялся шаг сетки КЭ. На втором этапе решения в окрестностях фактических проемов уточнялись методом кинематической декомпозиции.

Методика апробировалась на примере типового жилого многоквартирного крупнопанельного дома типовой серии 92С,

расположенного по адресу г. Владикавказ, пр-т Доватора, 31 – 9-этажное 1-секционное здание. Высота этажей 3 м.

Был определен оптимальный размер сетки конечных элементов. Исследовались 3 размера сетки конечных элементов: 0,1 м; 0,2 м; 0,4 м. Панели с проемами, усложнявшие расчет и вызывавшие концентрацию напряжений в отдельных точках, были заменены на сплошные панели с редуцированной жесткостью. Коэффициент редукции определялся как отношение площади стены без вычета проема к площади стены с вычетом проема.

В результате была принята сетка конечных элементов стеновых панелей, равная $0,4 \times 0,4$ м; и сетка конечных элемента швов $0,4 \times 0,1$ м (см. рисунок 4). Упрощенная модель показала сходимость результатов с исходной с погрешностью 5 %.

Была проведена верификация расчетной модели на результаты натурных вибродинамических испытаний на полномасштабных моделях. При модальном анализе расчетной модели основной тон колебаний составил 0,37 с, что совпадает с результатами испытаний (0,38 с). Было проведено сравнение амплитудно-частотных кривых, определенных при натурных испытаниях с результатами расчета (см. рисунок 5а).

Из графиков можно сделать вывод о том, что, как и характер, так и значения амплитудно-частотных кривых, достаточно хорошо коррелируют.

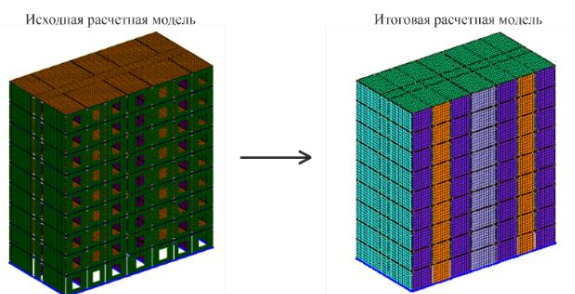


Рисунок 4. Конечно-элементная модель здания

Для проверки работоспособности расчетной модели был проведен нелинейный динамический анализ (формула 14) на запись землетрясения, произошедшего в Армении в Спитаке.

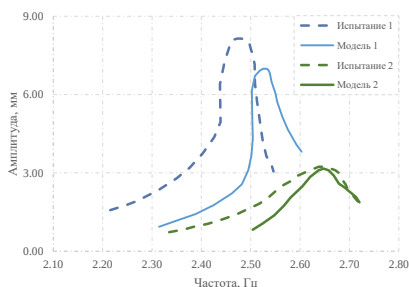
$$\begin{aligned} m(\ddot{u}_g(t) + \ddot{u}(t)) + c\dot{u}(t) + ku(t) &= 0 \\ m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) &= -m\ddot{u}_g(t) = p_{eff}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

где m – масса системы; k – жесткость системы; c – демпфирование системы; $u(t)$ – относительное перемещение; $u_g(t)$ – перемещение основания.

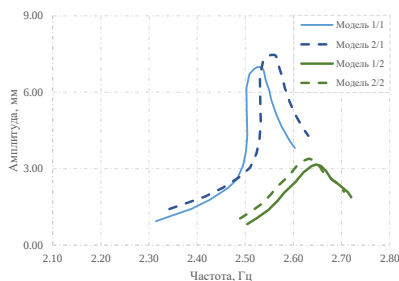
Было проведено сравнение перемещений и относительных междуэтажных перекосов в различные временные точки записи акселерограммы. Из результатов можно сделать вывод, что максимальные значения перемещений, а также значения максимальных относительных междуэтажных перекосов в одних временных точках для обеих моделей разнятся в пределах 3–6 %.

Было проведено сравнение амплитудно-частотных кривых исходной расчетной модели и итоговой (см. рисунок 5б).

Из рисунка 5б можно сделать вывод, что кривые отличаются незначительно. По результатам можно прийти к заключению об эквивалентности расчетных моделей в разрезе оценки общего отклика здания на сейсмическое воздействие.



а) Результаты натурных испытаний и исходная расчетная модель



б) Исходная и итоговая модель

Рисунок 5. Сравнение амплитудно-частотных кривых

Было проведено сравнение итоговой расчетной модели со стержневой многомассовой системой с эквивалентной жесткостью и нагрузкой (см. рисунок 6). Жесткость сечения равна:

$$EI_x = 4\,100 \times 10^6 \text{ кН} \times \text{м}^2; EI_y = 15\,630 \times 10^6 \text{ кН} \times \text{м}^2.$$

Нагрузка в упрощенной модели была задана в узлах перекрытий, равная $m = 5\,500 \text{ кН}$.

Из результатов модальных анализов и характера форм собственных колебаний можно сделать вывод:

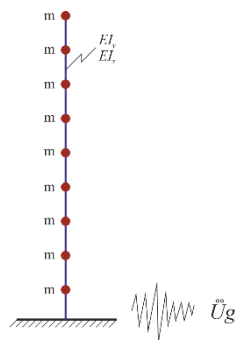


Рисунок 6. Многомассовая стержневая модель

1. Период основной формы колебаний консольной многомассовой системы отличается от периода основной формы исходной расчетной модели – 0,31 с и 0,37 с, соответственно.

2. Наибольшая масса в консольной системе задействована в изгибных формах колебаний, а в исходной модели – при совместном действии изгибной и крутильной формы.

3. В консольной модели отсутствуют крутильные формы колебаний.

4. Для корректного моделирования стержневой многомассовой системы с эквивалентными жесткостными параметрами требуются дальнейшие исследования.

Третья глава была посвящена разработке кривых повреждаемости на основании результатов, полученных с помощью инкрементального динамического анализа.

Записи землетрясений были отобраны согласно характеристикам наиболее близкорасположенных к городу Владикавказу зон возникновения очагов землетрясений (далее – зоны ВОЗ).

Были отобраны записи 20 землетрясений со схожими характеристиками. Записи были получены со свободной базы данных землетрясений Тихоокеанского исследовательского центра сейсмостойкого строительства. Расчетные спектры ускорений, масштабированные до 2 м/с^2 , представлены на рисунке 7.

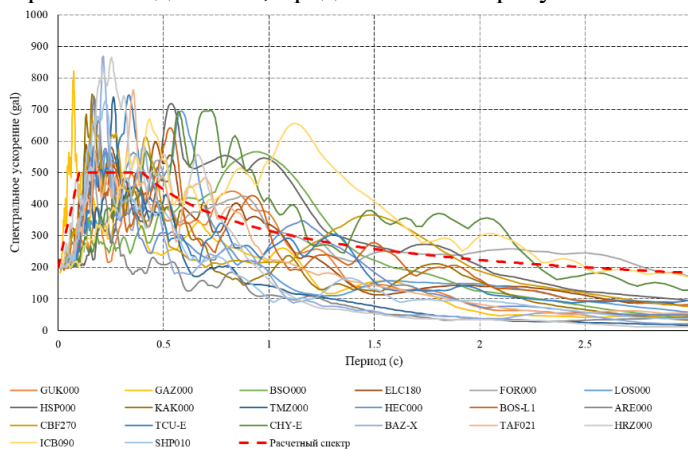


Рисунок 7. Расчетные спектры ускорений рассматриваемых землетрясений

Был проведен инкрементальный динамический анализ (*Incremental dynamic analysis, IDA* – далее ИДА), предполагающий выполнение

нескольких нелинейных динамических анализов во временной области расчетной модели на запись землетрясений, каждая из которых масштабируется до нескольких уровней сейсмической интенсивности. Уровни масштабирования выбираются таким образом, чтобы расчетная модель прошла все уровни работоспособности – от непосредственного пребывания людей до предотвращения обрушения.

Записи землетрясений были масштабированы от $0,1\text{ g}$ до $0,5\text{ g}$. Модель была рассчитана на 100 масштабированных записей землетрясений, согласно результатам каждой из которых были построены указанные графики. Демпфирование было задано путем назначения элементам схемы коэффициентов Рэлея. Коэффициент демпфирования принят 5 % в долях от критического.

Результаты ИДА выгружаются в виде записей изменения перемещений во времени, при задании двухкомпонентной записи землетрясения отдельно выгружаются графики перемещений в каждом направлении. Таким образом, были построены графики перемещений этажей, из которых были сформированы графики перекосов этажей (см. рисунок 8).

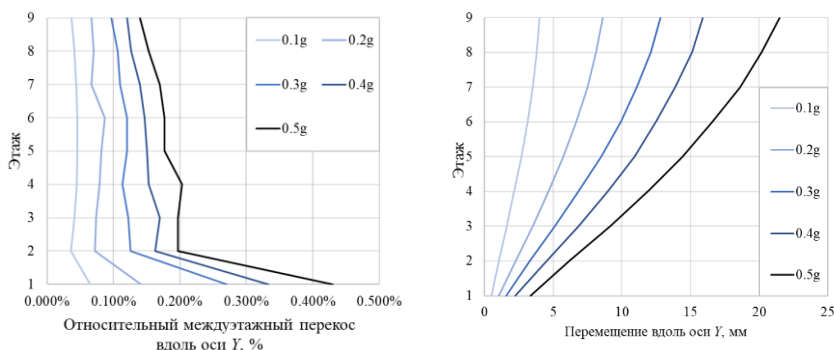


Рисунок 8. Результаты нелинейного динамического анализа (Чи-Чи, Тайвань, 09.20.1999, TCU025, $M_w = 7.62$)

Связь между реакцией и уровнем интенсивности для каждой записи представляет собой кривые ИДА. Для n записей конечный результат представляет собой набор из n кривых ИДА, в которых для каждого уровня интенсивности получаем n количество точек результатов. В качестве основного отклика сооружений, используемого для оценки уровня работоспособности, был принят относительный междуэтажный перекос (Δ , %). Получив выборку, была рассчитана

эквивалентная дисперсия логнормальных значений точек, согласно формуле 15:

$$\delta_{eq_i} = \frac{\ln \Delta_{\max,i}^{84\%} - \ln \Delta_{\max,i}^{16\%}}{2} \quad (15)$$

Пороговые значения перекосов этажей для крупнопанельных зданий не регламентируются. Зарубежные нормы для расчета зданий на сейсмические воздействия, такие как *International Building Code (IBC)*, *ASCE 7 (American Society of Civil Engineers)*, *Eurocode 8*, *New Zealand Standard NZS 1170.5*, регламентируют предельные значения перекосов этажей для зданий со стеновой конструктивной схемой в пределах от 0,01 (1 %) до 0,02 (2 %). Строительные нормы Японии – *Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA)* регламентируют для обычных зданий от 1/200 (0,5 %) до 1/100 (1 %). С учетом особенностей поведения крупнопанельных зданий, таких как характер повреждений, концентрирующихся в швах зданий, были приняты значения предельных относительных междуэтажных перекосов 0,1 %, 0,2 % и 0,35 %, соответственно для всех уровней работоспособности.

Условная вероятность относительного междуэтажного перекоса при данной мере интенсивности (IM) рассчитывается по формуле 16:

$$G\langle \Delta | IM_i \rangle = 1 - \Phi\left(\frac{\ln \Delta - \ln \Delta_{\max,i}^{50\%}}{\delta_{eq_i}}\right) \quad (16)$$

Для получения распределения вероятностей для каждого уровня пикового ускорения грунта (PGA) были определены 16-й, 50-й и 84-й процентиля, чтобы оценить медиану и эквивалентную дисперсию каждого уровня интенсивности PGA (см. рисунок 9).

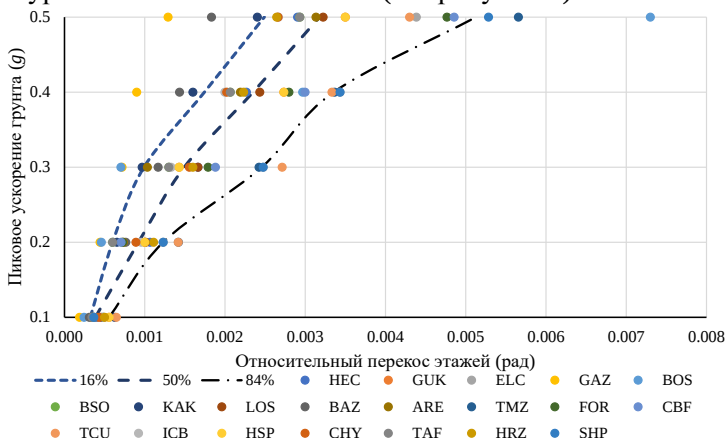


Рисунок 9. Результаты инкрементального динамического анализа

Из результатов расчета можно определить, что по мере увеличения уровня ускорений образуется более высокая дисперсия результатов.

Основываясь на результатах ИДА, были построены кривые повреждаемости (см. рисунок 10), представляющие собой логнормальное распределение согласно формуле 17:

$$P = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\beta_{RU}}\right) \quad (17)$$

где P – вероятность повреждений конструкций; Φ – функция нормального распределения; x – характеристика воздействия, пиковое ускорение грунта (PGA); λ – среднее $\ln(x)$.

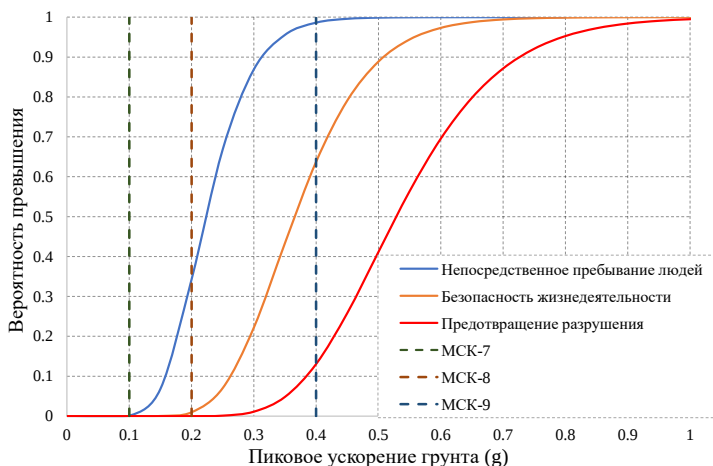


Рисунок 10. Кривые повреждаемости

Для объекта исследования вероятность наступления уровня работоспособности безопасного пребывания людей (IO) при ускорении грунта 1 м/с^2 равна 2 %, вероятность наступления стадии IO при ускорении грунта 2 м/с^2 равна 33 %, безопасности жизнедеятельности (LS) – менее 4 %, при ускорении грунта, равном 4 м/с^2 вероятность наступления уровня работоспособности безопасного пребывания людей равна 95 %, безопасности жизнедеятельности – 43 %, и предотвращения разрушения (CP) 6 %, что позволяет сделать вывод о высокой сейсмостойкости объекта исследования.

В четвертой главе рассматриваются вопросы и возможные варианты по практическому внедрению методики в текущую практику оценки сейсмостойкости зданий и сооружений.

Определены основные направления интеграции разрабатываемых решений в работу систем исполнительной власти и служб спасения при чрезвычайных ситуациях:

- Министерство строительства и архитектуры Республики Северная Осетия-Алания;
- Министерство жилищно-коммунального хозяйства, топлива и энергетики Республики Северная Осетия-Алания;
- Управление министерства по чрезвычайным ситуациям по Республике Северная Осетия-Алания.

Был разработан прототип системы мониторинга сейсмической повреждаемости многоквартирных жилых домов (см. рисунок 11), включающий в себя 3 модуля:

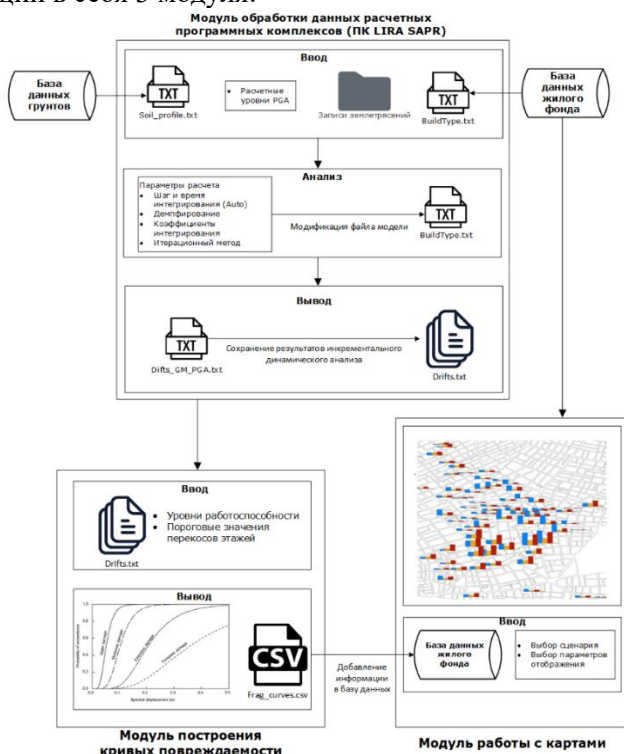


Рисунок 11. Схема работы системы прогнозирования сейсмической повреждаемости

- Модуль обработки данных расчетных программных комплексов;
- Модуль построения кривых повреждаемости;
- Модуль работы с картами.

Модуль обработки данных расчетных программных комплексов основывается на результатах, полученных после расчетов в ЛИРА-САПР. Помимо основных исходных данных, таких как конструктивно-планировочные решения рассматриваемых зданий и характеристик материалов, для фактической привязки к территории города задаются характеристики грунтов.

Модуль обработки данных расчетных программных комплексов основывается на результатах, полученных после расчетов в ЛИРА-САПР. Помимо основных исходных данных, таких как конструктивно-планировочные решения рассматриваемых зданий и характеристик материалов, для фактической привязки к территории города задаются характеристики грунтов.

Полученные данные передаются в следующий модуль – *Модуль построения кривых повреждаемости*. В указанном модуле исходными данными являются:

- Уровни работоспособности;
- Пороговые значения перекосов этажей.

Результаты передаются в *Модуль работы с картами*, который наносит полученные результаты на интерактивные карты, позволяющие ранжировать здания по необходимости внеочередного обследования фактического состояния несущих конструкций зданий с последующим уточнением результатов оценки сейсмостойкости.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Выполнена научно-квалификационная работа, в которой обоснованы научно-технические методы по оценке сейсмостойкости крупнопанельных зданий. Их внедрение вносит существенный вклад в практику защиты населения в случаях чрезвычайных ситуаций и создания условий для устойчивого функционирования жилищного фонда.

1. Обосновано выбран достаточный по точности и оптимальный по трудоемкости метод динамического расчета зданий с учетом физически нелинейной работы. Была разработана методика использования модели с упрощенной топологией, приводящей к снижению трудоемкости без потери точности результатов. Была разработана конечно-элементная модель объекта исследования (9-этажное здание серии 92С) для проведения нелинейного динамического анализа во времени. Для моделирования нелинейной работы стыка использовалась комбинация двух конечных элементов – КЭ 259 (нелинейный элемент стыка) и 2-узловой элемент КЭ 255 для моделирования работы шпонки.

2. Основываясь на параметрах возможных очагов землетрясений для г. Владикавказа, были отобраны записи 20 землетрясений. Записи землетрясений были масштабированы от 0,1 g до 0,5 g. Был проведен инкрементальный динамический анализ разработанной модели. Модель была рассчитана на 100 масштабированных записей землетрясений. Для каждой записи были построены графики перемещений и относительного междуэтажного перекоса, используемого в качестве основного критерия оценки сейсмостойкости.

3. Путем статистической обработки результатов инкрементального динамического анализа были построены кривые повреждаемости, характеризующие вероятность наступления одного из трех уровней работоспособности конструкций: непосредственного пребывания людей (*IO – immediate occupancy*), безопасности жизнедеятельности (*LS – life safety*), предотвращения обрушения (*CP – collapse prevention*). Пороговые значения перекосов этажей, соответствующие уровням работоспособности, приняты 0,1 %, 0,2 % и 0,35 % для уровней *IO*, *LS* и *CP*, соответственно.

4. Предложена система прогнозирования сейсмической повреждаемости многоквартирных домов, включающий в себя три основных модуля:

- Модуль обработки данных расчетных программных комплексов;
- Модуль построения кривых повреждаемости;
- Модуль работы с картами.

Разработаны рекомендации по внедрению предлагаемых решений в деятельность администраций местного самоуправления Республики Северная Осетия-Алания и городского округа г. Владикавказа в рамках реализации государственной программы РСО-Алания «Обеспечение доступным и комфортным жильем граждан в Республике Северная Осетия-Алания». В частности, результаты работы в виде кривых повреждаемости крупнопанельных зданий были использованы АМС г. Владикавказа в процедуре признания многоквартирных домов аварийными и подлежащими сносу или реконструкции.

Результаты работы также могут быть внедрены в текущую практику защиты населения от чрезвычайных ситуаций, осуществляемую Главным управлением МЧС по РСО-Алания в качестве одного из инструментов прогнозирования сейсмической повреждаемости городских районов.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, перечень которых размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. **Валиев А. Д.** Оценка сейсмостойкости крупнопанельного жилого здания в нелинейной постановке с использованием ПК ЛИРА-САПР // Вестник евразийской науки. – 2024. – Т. 16. – № 5.

2. **Valiev A.** Dynamic response of a linear multiple degrees-of-freedom system / Z. Abaev, A. Valiev, M. Kodzaev, R. Gurbanov // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 2 (111). – Pp. 1–17. DOI 10.4123/CUBS.111.4

3. **Валиев А. Д.** Разработка рекомендаций по реализации политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на основе мирового опыта / З. К. Абаев, А. Д. Валиев, М. Ю. Кодзаев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2023. – № 3. – С. 48–72. DOI 10.37153/2618-9283-2023-3-48-72

4. **Валиев А. Д.** Расчет кирпичной дымовой трубы на сейсмические воздействия. Сравнительный анализ методов расчета / З. К. Абаев, А. Д. Валиев, М. Ю. Кодзаев // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 5.

5. **Валиев А. Д.** Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан / З. К. Абаев, М. Шилдкамп, А. Д. Валиев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 6. – С. 18–45. DOI 10.37153/2618-9283-2022-6-18-45

6. **Валиев А. Д.** Оценка дефицита сейсмостойкости кирпичной дымовой трубы в соответствии с актуальными нормами проектирования / З. К. Абаев, А. Д. Валиев, М. Ю. Кодзаев // Строительство и техногенная безопасность. – 2020. – С. 13–25. DOI 10.37279/2413-1873-2020-19-13-25

Публикации в изданиях, индексируемых международной системой цитирования (Scopus и Web of Science):

7. **Valiev A.** Large panel reinforced concrete buildings inelastic behavior modeling approach for nonlinear seismic analysis / Z. Abaev, A. Valiev, M. Kodzaev // Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Nature. – 2024. – Vol. 400. – 2024. – Pp. 162–174. DOI 10.1007/978-3-031-47810-9_16

8. **Valiev A.** Modeling of the precast concrete hollowcore floor diaphragm with tie beams under seismic action / Z. Abaev, A. Valiev, M. Kodzaev // AIP conference proceedings. – 2023. DOI 10.1063/5.0151657

9. **Valiev A.** Methodology of the reinforced concrete large panel buildings modeling with SAPFIR-Generator visual programming tool / Z. Abaev, A. Valiev, M. Kodzaev // AIP conference proceedings. – 2023. DOI 10.1063/5.0151656

10. **Valiev A.** Methodology of determination of the platform joint of reinforced concrete large-panel buildings stiffnesses / Z. Abaev, A. Valiev, M. Kodzaev // Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Nature. – 2023. – Vol. 308. – Pp. 277–286. DOI 10.1007/978-3-031-21120-1_27

Публикации в других изданиях и материалы конференций:

11. **Валиев А. Д.** Создание базы данных сейсмического риска на примере 34 микрорайона г. Владикавказа / А. Д. Валиев, А. Т. Хабаев, З. К. Абаев // Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. Сборник докладов III-й Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 83–87.

12. **Валиев А. Д.** Методика корректного моделирования сборного железобетонного перекрытия с устройством антисейсмических поясов / З. К. Абаев, А. Д. Валиев // Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях. Сборник докладов II-й Международной научно-практической конференции. – 2021. С. 211–217.

13. **Валиев А. Д.** Сравнительный анализ приближенных методов расчета многоэтажных многопролетных рам / З. К. Абаев, А. Д. Валиев, Д. Д. Короева // Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2021. – С. 14–20.

14. **Валиев А. Д.** Предварительная количественная оценка дефицита сейсмостойкости Республики Северная Осетия-Алания / З. К. Абаев, А. Д. Валиев // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Материалы IX-й Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 15–18.

Валиев Азамат Джониевич

Оценка сейсмостойкости крупнопанельных зданий
с учетом физической нелинейности