

УДК 699.841(091)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-12-102-114

ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ СИЛ СУХОГО ТРЕНИЯ. ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

B.C. Семенов

Аннотация. Сегодня существует множество систем, призванных предотвратить разрушительное воздействие землетрясений на здания и сооружения. В настоящей статье в исторической ретроспективе выполнен анализ отдельных конструктивных решений пассивных систем сейсмозащиты, использующих силы сухого (внешнего) трения. Показано, что известные уже многие десятилетия системы сейсмоизоляции, отделяющие надфундаментную часть здания (суперструктуру) от фундамента или фундамент от основания (субструктуры), конструктивно просты, надежны и экономичны. Поэтому заслуживают внимания, дальнейшей разработки и дополнительных исследований. Кроме того, отмечено, что для создания эффективной и надежной сейсмозащиты строительного объекта требуется системный подход.

Ключевые слова: сейсмостойкость; системы сейсмозащиты; сейсмоизоляция; сухое трение; триклические материалы; системный подход.

КУРГАК СҮРҮЛҮҮ КҮЧТӨРҮНӨ НЕГИЗДЕЛГЕН ПАССИВДҮҮ СЕЙСМИКАЛЫК КОРГОО СИСТЕМАЛАРЫ. ТАРЫХЫЙ АСПЕКТ

B.C. Семенов

Аннотация. Бүгүнкү күндө имардаттарга жана курулмаларга жер титирөөнүн кыйратуучу таасирин алдын алуу үчүн көптөгөн системалар бар. Бул макалада кургак (тышкы) сүрүлүү күчтөрүн колдону менен пассивдүү сейсминалык коргоо системалары үчүн жекече долбоордук чечимдердин тарыхый талдоосу берилген. Көптөгөн ондогон жылдардан бери белгилүү болгон жана үстүнкү түзүлүштү пайдубалдан же пайдубалды субструктуралдан белүп турган сейсминалык изоляция системалары структуралык жактан жөнөкөй, ишенимдүү жана үнөмдүү экенин көрсөтүлгөн. Ошондуктан, алар көңүл бурууга, андан ары өнүктүрүүгө жана кошумча изилдөөлөргө татыктуу. Андан тышкary, имарат үчүн натыйжалуу жана ишенимдүү сейсминалык коргоону түзүү үчүн системалуу мамиле талап кылышыны белгиленет.

Түйүндүү сөздөр: сейсминалык туруктуулук; сейсминалык коргоо системалары; сейсминалык изоляция; кургак сүрүлүү; сүрүлүү материалдары; системалык мамиле.

PASSIVE SEISMIC PROTECTION SYSTEMS BASED ON DRY FRICTION FORCES. HISTORICAL ASPECT

V.S. Semenov

Abstract. Today, there are many earthquake protection systems designed to prevent the devastating effects of earthquakes on buildings and structures. In this article, in historical retrospect, an analysis of individual design solutions for passive seismic protection systems (seismic insulation) based on dry (external) friction forces is performed. It is shown that the seismic insulation systems used for many decades, separating of the building (superstructure) from the foundation or the foundation from the base (substructure), are structurally simple, reliable and economical. Therefore, they deserve attention, further development and additional research. In addition, it was noted that a systematic approach is required to create effective and reliable seismic protection for a construction site.

Keywords: earthquake resistance; seismic protection systems; seismic insulation; dry friction; friction materials; a systematic approach.

Вопросы защиты зданий и сооружений от сейсмического воздействия имеют глубокие исторические корни, а ответы на них не утратили своей актуальности и сегодня. Это подтверждается рядом прошедших на земном шаре катастрофических сейсмических событий последних десятилетий (землетрясения в Мьянме, Таиланде, Турции и других странах) [1, 2]. Помимо этого, о важности сейсмоизоляции, как одного из способов защиты людей и зданий во время землетрясений, говорит и тот факт, что ещё в 2006 году в Кыргызской Республике был разработан СНиП КР 20-03:2006 «Системы сейсмоизоляции. Основные положения», а в 2018 году проектирование таких систем было включено в нормативную базу Российской Федерации (пункт 6.17 и приложение В, СП 14.13330.2018).

Несмотря на то, что поиск ответов на эти вопросы идет уже многие сотни лет, значимые результаты и практические решения появились только в XX веке. В этот период специалисты научились правильно оценивать параметры землетрясений, получили достоверные результаты поведения конструкций при сейсмических воздействиях. Это позволило разработать комплекс антисейсмических мер, которые с определенной степенью надежности обеспечивают устойчивость зданий и сооружений к землетрясениям. Однако анализ последствий разрушительных землетрясений последних лет выявил ошибки как в оценке их силы, так и в архитектурно-конструктивных решениях зданий. Поэтому и сегодня существует необходимость в создании новых систем сейсмозащиты, которые должны быть менее чувствительны к вариациям параметров воздействия и характеристикам конструкций. Кроме того, важно продолжать анализ существующих систем сейсмоизоляции, которые для снижения инерционных сил используют силы сухого (внешнего) трения. Анализу отдельных конструктивных систем, использующих эти силы, и посвящена настоящая работа.

Сначала несколько слов о природе сил трения. Из курсов физики и классической механики известно, что существует внешнее (сухое) и внутреннее (жидкое, или вязкое) трение. Внешнее трение – это трение, возникающее в плоскости касания двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении (трение скольжения, качения и верчения). Если соприкасающиеся тела неподвижны друг относительно друга, то имеет место трение покоя (рисунок 1, а) [3].

Внешнее трение обусловлено шероховатостью соприкасающихся поверхностей, а в случае очень гладких поверхностей трение обусловлено силами межмолекулярного притяжения. Внутреннее трение – это трение между частями одного и того же тела (например, между слоями жидкости или газа). В отличие от сухого трения здесь отсутствует трение покоя [3].

В системах сейсмоизоляции используются все виды внешнего трения. Остановимся подробнее на трении скольжения (см. рисунок 1, б).

Согласно закону Амонтона – Кулона, силу трения скольжения F_{mp} можно условно принять прямо пропорциональной силе нормального давления $F_{max}(N)$, с которой здание (суперструктура) действует на основание (субструктуру). На самом деле она немного меньше.

$$\bar{F}_{mp}^{ck} = \mu \cdot m \cdot g, \quad (1)$$

где m – масса суперструктуры (верхнего строения);

g – ускорение свободного падения;

μ – коэффициент трения скольжения (зависит от рода и состояния соприкасающихся поверхностей).

Сила внешнего воздействия (землетрясения) F_c зависит от присоединенной массы грунта основания M (субструктуры) и ускорения этой массы A , которое возникает в ней при землетрясении:

$$\bar{F}_c = M \cdot A. \quad (2)$$

Проскальзывание сейсмической волны под фундаментом или в созданном в фундаменте скользящем поясе, произойдет при условии

$$\bar{F}_c > \bar{F}_{mp}^{ck}. \quad (3)$$

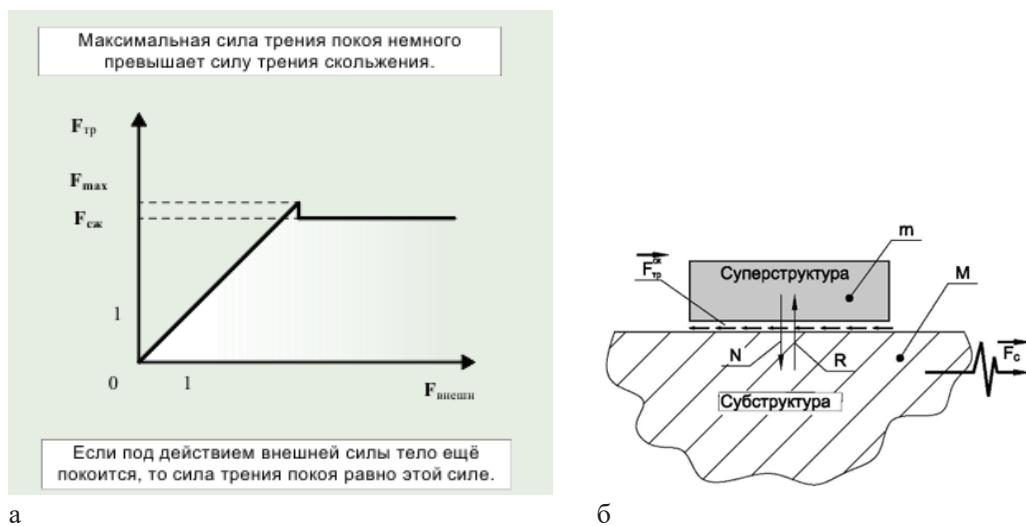


Рисунок 1 – Сила трения скольжения и её зависимость от других силовых факторов (на примере сейсмоизоляции): *а* – при монотонной нагрузке; *б* – при сейсмической нагрузке; субструктура – основание; суперструктура – здание или сооружение

Из сопоставления уравнений (1)–(3), можно определить величину ускорения (силу землетрясения или силу сейсмического воздействия) – критерий, при котором осуществляется проскальзывание сейсмической волны под суперструктурой, т. е. проявляется сейсмозащитное свойство скользящего слоя:

$$A > \mu \cdot m / M \cdot g. \quad (4)$$

Сейсмические воздействия передаются на здания через его фундаменты. Поэтому для снижения сейсмических нагрузок наиболее эффективным методом является изоляция надземной части здания от подземной, а в идеале – от основания. Этот подход, известный как сейсмоизоляция, позволяет уменьшить амплитуды колебаний и снизить инерционные силы, действующие на конструкции надземной части зданий, что значительно повышает уровень безопасности (сейсмостойкости) зданий и сооружений, расположенных в сейсмоактивных зонах.

Основные концептуальные подходы к проектированию сейсмостойких зданий и сооружений с эффективными системами сейсмоизоляции сформулированы С.В. Поляковым, Л.Ш. Килимником, А.В. Черкашиным, Я.М. Айзенбергом, А.Д. Абакаровым, Х.А. Мажиевым, В.И. Смирновым, А.М. Уздиным, Н.П. Абовским, Т.А. Белаш и другими советскими и российскими учеными [4–19].

Пристальное внимание вопросам обеспечения сейсмической защиты, в том числе системам сейсмоизоляции, уделяется в странах, расположенных в регионах высокой сейсмической активности (Япония, Италия, Китай, США и др.) [20–24].

Прежде чем перейти к историческому анализу пассивных систем сейсмоизоляции на основе сил внешнего трения, рассмотрим, какое место эти системы занимают в общей классификации современных систем сейсмозащиты (рисунок 2) [4, 5, 7, 15, 17, 25 и др.].

Согласно [25], такие системы делятся на три группы (см. рисунок 2). Первая включает традиционные методы: увеличение жесткости конструкций через увеличение сечений или использование более прочных материалов. Вторая группа – специальные системы, использующие как активные, так и пассивные принципы, снижающие сейсмические нагрузки на здания. Третья группа – комбинированные системы, сочетающие традиционные и специальные методы.

Активные системы построены на основе применения дополнительных источников энергии, работающих в противофазе к дестабилизирующему воздействию. Они генерируют воздействия,



Рисунок 2 – Классификация систем сейсмозащиты

уменьшающие эффекты от сейсмических воздействий, и базируются на компьютерном управлении процессом колебаний сооружения при землетрясении.

Пассивные системы используют устройства (комплекс устройств) с постоянными параметрами, способствующими снижению амплитуд колебаний зданий и сооружений без использования внешнего источника энергии. Параметры таких систем зависят только от свойств образующих их сейсмоизолирующих материалов и элементов. Таким образом, основное отличие в том, что активные системы ориентированы на снижение сейсмических нагрузок за счёт дополнительных усилий, а пассивные – на уменьшение связи между зданием и основанием.

По опубликованным данным, на конец 2013 г. в мире насчитывалось более 23 тысяч зданий с пассивными системами сейсмозащиты, реализующих, в основном, принципы сейсмоизоляции (SI) и демпфирования (ED). Наибольшее количество, более восьми тысяч, таких зданий построено в Японии (рисунок 3) [20].

Очевидно, что количество построенных во всем мире зданий с современными системами сейсмоизоляции за прошедшее время значительно увеличилось.

В истории архитектуры есть примеры, в которых строители отделяли сооружение от его основания, используя в качестве промежуточного слоя в уровне верха фундаментов прокладки из мягких материалов (рисунок 4) [26, 27].

Археологические раскопки показали, что в III–VII вв. многие крупные постройки Средней Азии и Северного Кавказа возводились на песчаных подушках, а в более поздний период (X–XVII вв.) применяли подушки из чистой глины с обязательным слоем камыша в нижней части стен.

При строительстве мавзолеев в скалистом грунте котлованы заполняли рыхлой землей, песком и фундамент возводили по такому многокомпонентному слою. При таком решении грунтовая подушка частично гасила высокочастотные колебания основания при землетрясениях.

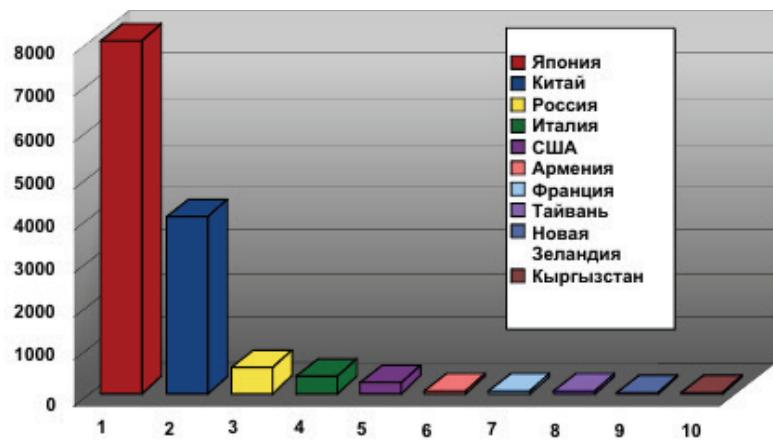


Рисунок 3 – Количество сейсмозолированных зданий, построенных в разных странах мира

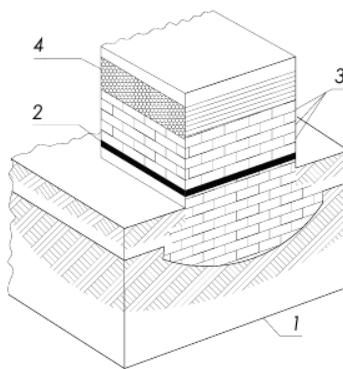


Рисунок 4 – Система сейсмозолизации древних зодчих:
1 – глина; 2 – песок; 3 – ганч (вязующий материал, применяемый в штукатурных растворах, получается путем обжига природной смеси гипса с глиной); 4 – камыш

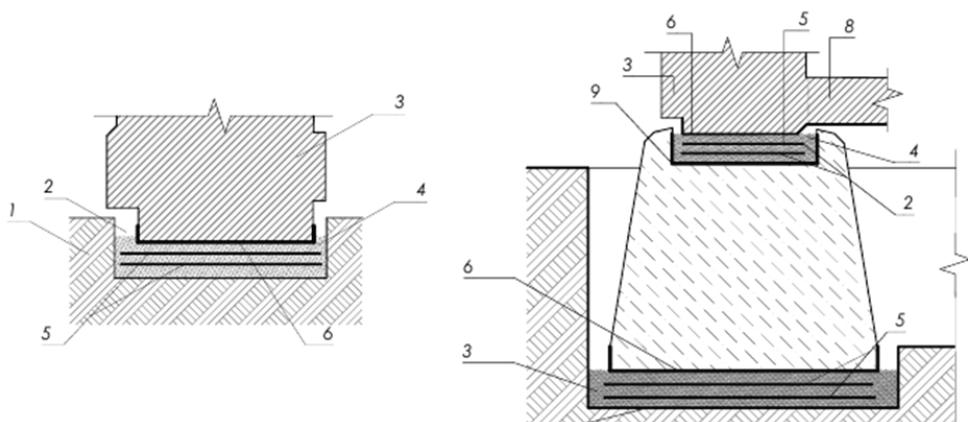


Рисунок 5 – Варианты сейсмозолизации инженера А.Е. Лаврушко: а – скользящий слой между фундаментом и основанием; б – скользящий слой в двух уровнях; 1 – основание; 2 – котлован (траншея); 2 – выемка; 3 – фундамент; 4 – песок; 5 – гладкие или волнистые стальные листы; 6 – стальной лист подошвы фундамента; 7 – обвязка стены; 8 – перекрытие; 9 – стальной желоб

Отдельные конструктивные решения, использующие принцип сейсмозащиты, запатентованы еще в середине и во 2-й половине XX века.

Например, инженер А.Е. Лаврушко в 1928 году предложил использовать в качестве скользящего пояса металлические листовые прокладки и песок (рисунок 5) [28].

Несколько позже появляется много новых конструктивных решений, использующих этот принцип [4-35].

В зависимости от конфигурации поверхностей скольжения, устройства типа «скользящий пояс» подразделяются на две категории (рисунок 6) [15]. К первой относятся опорные конструкции с горизонтальными поверхностями скольжения. В процессе их относительного движения потенциальная энергия взаимного расположения элементов остается неизменной, что обеспечивает устойчивое равновесие системы. Устройства второй категории, обладающие наклонными или криволинейными поверхностями скольжения, способны вернуть сооружение в исходное положение после сейсмического воздействия благодаря возникновению гравитационной восстанавливающей силы, которая может быть постоянной (плоские наклонные поверхности) или меняющейся, зависящей от формы граней соприкасающихся элементов (криволинейные поверхности скольжения, пример будет рассмотрен ниже).

Описанные выше конструктивные решения относятся к устройствам первого типа. На рисунках 6, б и 6, в показано комбинированное решение, снабженное в первом случае наклонными гранями (ступенями) горизонтальных плоскостей железобетонных поясов, и наклонными гранями (плоскостями) опорных фундаментных плит [15].

Примером первой группы систем с горизонтальными площадками скольжения служат разработанные в КНР конструкции малоэтажных зданий с системой типа «скользящий пояс» (рисунок 6, а). В народе они получили название «здания, построенные на песке». По этой технологии в КНР построено несколько кирпичных зданий: три одноэтажных и одно четырехэтажное. Натурные испытания одного такого «построенного на песке здания» традиционной конструктивной системы на взрывное воздействие показали его достаточную сейсмостойкость [15].

Большое внимание разработке современных систем типа «фундаментная платформа на скользящем слое», уделяют специалисты Сибирского Федерального университета [13, 14]. Учитывая сложный

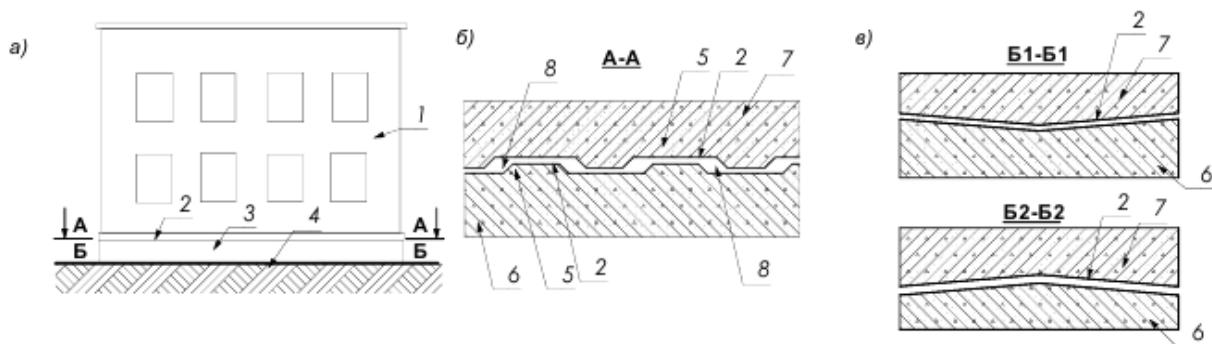


Рисунок 6 – Примеры систем сейсмозащиты типа «скользящий пояс» [15]:
 а – общий вид; б – сечение А-А – вариант многогранных граней поясов типа «выступ – выемка»;
 в – сечение Б-Б с плоскими наклонными гранями поясов; 1 – здание (суперструктура);
 2 – скользящий слой; 3 – фундамент; 4 – основание (субструктура); 5 – система «выступ – впадина»;
 6 – нижний пояс; 7 – верхний пояс фундамента; 8 – зазор между наклонными гранями
 (ограничитель горизонтальных перемещений)

характер сейсмических воздействий, зависящих и от характеристик грунтового основания, ими предложена комплексная система повышения сейсмостойкости зданий, которая включает:

- траншею, выполненную перед платформой, снижающую уровень воздействия, передающегося от грунта на фундамент от любого вида горизонтальных сейсмических воздействий: несимметричных, крутильных наклонных и др.;
- установку на скользящем слое монолитной пространственной фундаментной платформы, объединенной с расположенным на ней зданием или сооружением в замкнутую систему, что позволяет уменьшить трение между платформой и основанием и предотвращает передачу на фундамент горизонтальных сейсмических воздействий, мощность которых преодолевает силу трения;
- монолитную пространственную фундаментную платформу, обеспечивающую условия для устройства и работы скользящего слоя и создающую конструктивную безопасность путем замкнутости здания с платформой со скользящим слоем;
- тормозное устройство возвратного типа, установленное с возможностью ограничения перемещения пространственной фундаментной платформы и возврата ее в эксплуатационное положение.

Предложенная комплексная система показана на рисунке 7.

В целом, данный комплекс повышает сейсмоустойчивость и надежность конструкции зданий или сооружений на монолитной пространственной фундаментной платформе и обеспечивает экономичность их применения даже в сложных грунтовых условиях и высокой сейсмичности.

Накоплен определенный опыт проектирования и строительства зданий со скользящим поясом и в нашей республике [4, 32–34]. Еще в 1970–80-х годах прошлого века во Фрунзенском политехническом институте в сотрудничестве с учеными ЦНИИСК им. Кучеренко, г. Москва, и проектировщиками института Фрунзегорпроект разработано конструктивное решение сейсмоизолирующего скользящего пояса для зданий с несущими стенами. Схема элементов скользящего пояса для зданий со стенами комплексной конструкции представлена на рисунке 8. Аналогичное решение («скользящий шов») для крупнопанельных зданий показано на рисунке 9.

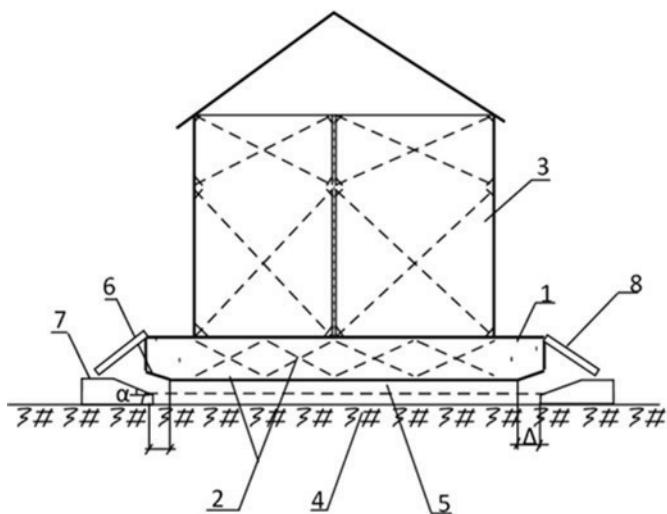


Рисунок 7 – Комплексная система сейсмоустойчивости СФУ:

- 1 – пространственная фундаментная платформа; 2 – железобетонные элементы;
 3 – здание или сооружение; 4 – основание; 5 – скользящий слой; 6 – скошенная нижняя грань пространственной фундаментной платформы; 7 – тормозное устройство возвратного типа в виде упора, прочно соединенное с основанием; 8 – защитные плиты (патент РФ № 73350)

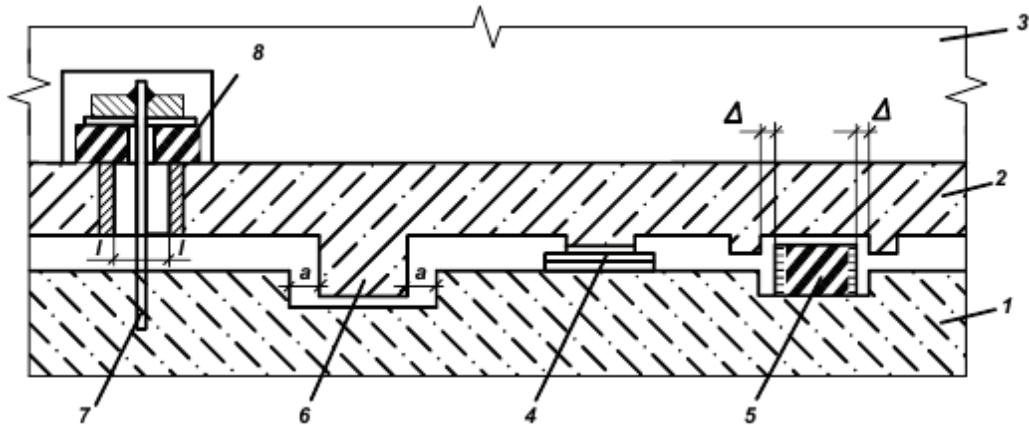


Рисунок 8 – Схема элементов скользящего пояса для зданий с несущими стенами комплексной конструкции: 1 – верхняя обвязка фундаментов (стен подвала или технического этажа); 2 – ростверк (обвязка стен верхних этажей); 3 – надземные конструкции здания; 4 – скользящая опора; 5 – упругий ограничитель горизонтальных перемещений (демпфер); 6 – жесткий ограничитель горизонтальных перемещений (упор); 7 – ограничитель вертикальных перемещений (вертикальная связь); 8 – вертикальный амортизатор

5 – упругий ограничитель горизонтальных перемещений (демпфер); 6 – жесткий ограничитель горизонтальных перемещений (упор); 7 – ограничитель вертикальных перемещений (вертикальная связь); 8 – вертикальный амортизатор

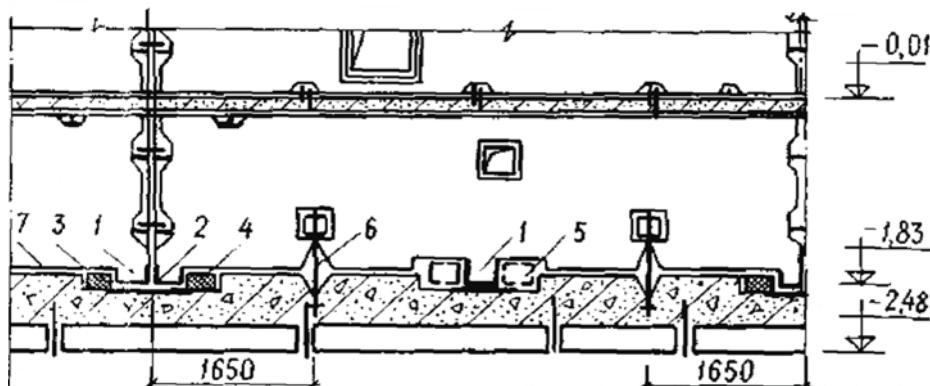


Рисунок 9 – Схема скользящего шва крупнопанельных зданий:
1 – опорные выступы из цокольных панелей; 2 – пластины из фторопласта;
3 – пластины из нержавеющей стали; 4 – резиновый демпфер; 5 – гидравлический домкрат;
6 – упругий ограничитель вертикальных перемещений; 7 – зазор

Скользящий пояс представляет собой ряд опор с пластинами из материалов с низким коэффициентом трения скольжения. Он устраивается между несущими конструкциями здания и фундаментом или непосредственно в фундаменте, разрезая его в горизонтальной плоскости. В качестве антифрикционных прокладок выбраны пластины из фторопласта и нержавеющей стали.

При определенной величине ускорения основания силы трения преодолеваются и здание начинает проскальзывать относительно фундамента, что, в свою очередь, снижает инерционные силы, возникающие в конструкциях вышележащих этажей.

Теоретические и экспериментальные исследования выявили механизм формирования сейсмических нагрузок на надземные конструкции и их существенное снижение (в 3–8 раз) по сравнению с нагрузками на здания традиционного типа [4, 32].

За прошедшие годы накоплен достаточно солидный опыт строительства зданий со скользящим поясом. В 1981 г. построены четыре трехэтажных кирпичных дома по ул. Мессароша; в 1983 г. – экспериментальный пятиэтажный крупнопанельный дом в микрорайоне Аламедин; в 1985 г. – экспериментальный девятиэтажный крупнопанельный дом 105-й серии по улице Иваницына, а с 1987 г. – массовое строительство девятиэтажных домов в 12-м микрорайоне.

Заслуживает внимания предложенное более тридцати лет назад заведующим лабораторией оснований, фундаментов и механики грунтов Азербайджанского НИИ строительства и архитектуры (АзНИИСА), академиком РАЕН Ф.Г. Габибовым конструктивное решение системы сейсмоизоляции с использованием утилизированных металлокордных покрышек (рисунок 10) [29, 30]. В этом решении в скользящем слое, расположенному либо между фундаментом здания и основанием, либо внутри тела фундамента, установлены маты из металлокордных покрышек (шин). Такие многослойные маты обеспечивают не только скольжение, но и демпфирование возникающих при сейсмической нагрузке колебаний.

Ярким примером гравитационных систем на основе сил сухого трения служит механизм сейсмоизоляции на сферидах инженера А.А. Назина [12].

Основным элементом механизма являются цементно-песчаные сферицы, устанавливаемые между железобетонным поясом фундамента и железобетонным поясом (обвязкой) стены (рисунок 11). Другим важным элементом служит упругая прокладка, устанавливаемая между обвязкой и стеной здания. Она предназначена для гашения вертикальных колебаний.

Проведенные под руководством автора исследования, в том числе на специально сконструированной сейсмоплатформе, показали надежность системы, что позволило запроектировать и построить экспериментальное пятиэтажное жилое здание в несейсмостойком исполнении в городе Севастополе. После монтажа здания были проведены его натурные испытания, которые показали уменьшение смещений здания в 4–7 раз и ускорений в 5–7 раз по отношению к ускорениям основания в горизонтальной плоскости.

Интересным конструктивным решением с использованием скользящего слоя служит полезная модель доцента А.К. Акматова (КРСУ) (рисунок 12) [35]. В этом решении скользящий слой расположен между подошвой фундамента и бетонной подготовкой и закрыт демпфером из полистироловых или камышитовых плит, уложенных между выемкой под фундамент и самим фундаментом. Верхняя часть демпфера укладывается чуть ниже уровня земли в фундамент, в который жестко вмонтированы деревянные стойки каркаса.

На фундамент, поверх гидроизоляции, уложена кирпичная кладка из саманных блоков, в которые через каждые 2–3 ряда кладки при возведении укладывается армирующая плетёная сетка, выполненная из двух параллельных прочных полимерных шнурков, соединённых поперечными распущенными камышами с шагом в мм, не выходящими за пределы кладки.

Выводы. Устройства сейсмоизоляции типа «скользящий пояс» или «скользящий слой» получили достаточно широкое распространение. При этом устройства для проскальзывания, в том числе путем регулирования и снижения трения, разработаны недостаточно.

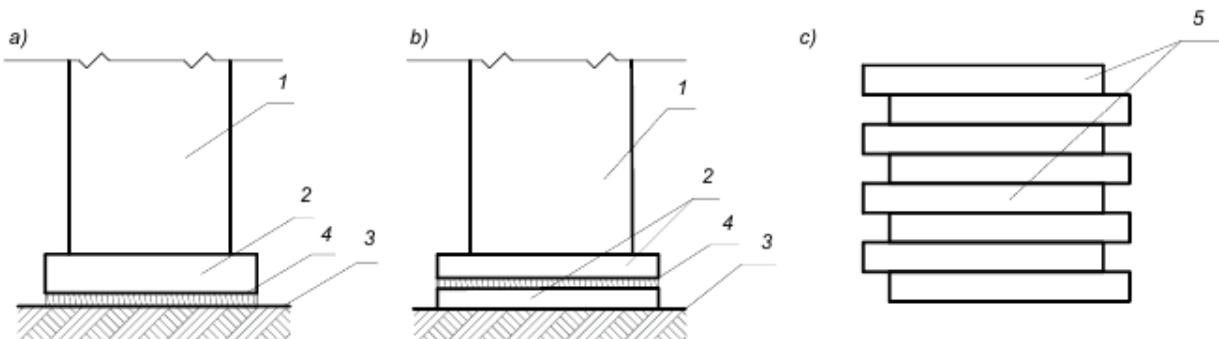


Рисунок 10 – Система инженера Ф.Г. Габибова: *a* – скользящий слой между подошвой фундамента и основанием; *b* – слой внутри тела фундамента; *c* – собранный элемент мата; 1 – стена; 2 – фундамент; 3 – основание; 4 – маты

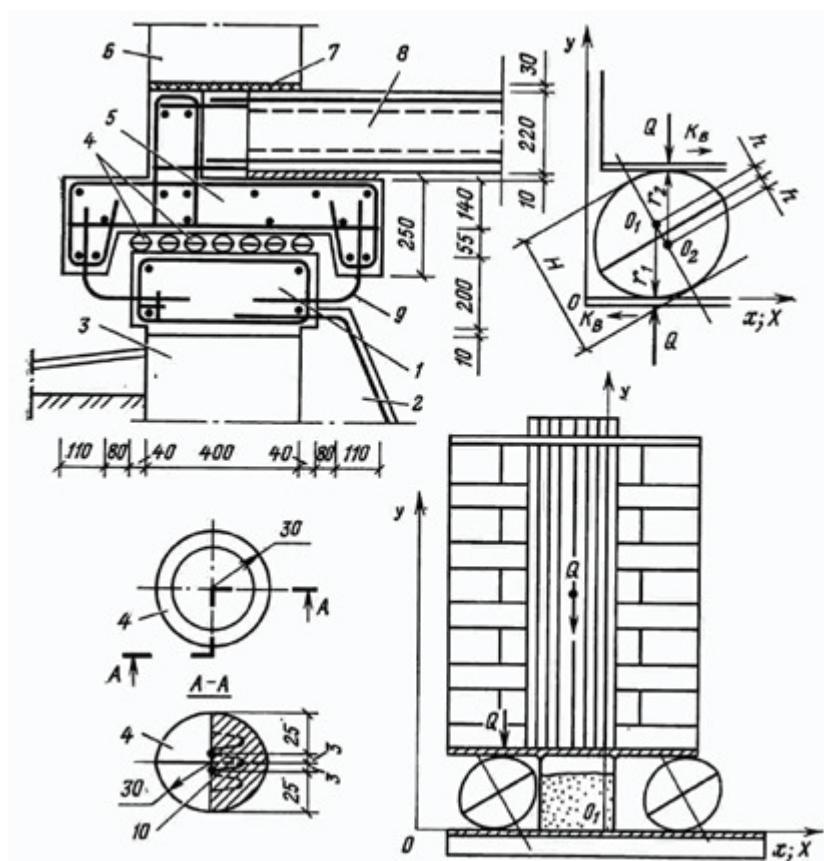


Рисунок 11 – Механизм сейсмозащиты на сферидах А.А. Назина:
 1 – железобетонный пояс фундамента; 2 – контрфорс; 3 – фундамент; 4 – цементно-песчаные сфероиды;
 5 – железобетонный пояс стены; 6 – стена; 7 – упругая прокладка; 8 – перекрытие над подвалом;
 9 – условная тормозная связь; 10 – спиральная арматура

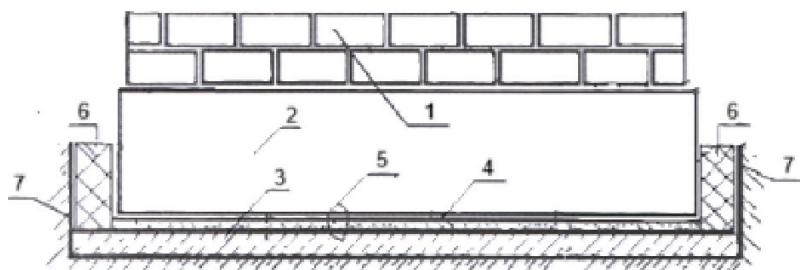


Рисунок 12 – Конструкция малоэтажного здания повышенной сейсмостойкости А.К. Акматова:

- 1 – стена;
- 2 – бетонная плита;
- 3 – бетонная подготовка;
- 4 – скользящий слой;
- 5 – слой инертного материала, 2–3 слоя полиэтилена, сухой крупнозернистый песок;
- 6 – полистирольные или камышитовые плиты;
- 7 – грунт

Приведенные выше примеры конструктивных решений систем сейсмоизоляции типа «скользящего слоя» можно рассматривать как обоснование целесообразности разработки новых инновационных решений, учитывающих появление новых материалов, обеспечивающих малую силу трения и проведения дополнительных исследований по конструкции и составу скользящего слоя.

Сейсмозащита – всего лишь часть строительного объекта, согласованно работающая с другими частями, элементами и узлами строительной системы. Поскольку между частями такой системы имеет место не только взаимодействие, но и взаимовлияние её элементов друг на друга, то все задействованные технические решения должны быть не только объединены в единую систему, но и еще и согласованы между собой, т. е. для организации эффективной и надежной сейсмозащиты строительного объекта требуется системный подход.

Термины и определения, используемые в статье

Сейсмозащита зданий и сооружений – комплекс мероприятий, направленных на повышение устойчивости конструкций к сейсмическим воздействиям (землетрясениям). Цель – обеспечить сейсмостойкость, чтобы здания и сооружения могли выдерживать сейсмические нагрузки без разрушения.

Пассивная система сейсмоизоляции. Система, параметры которой зависят только от свойств образующих ее сейсмоизолирующих элементов, обеспечивающих снижение механической энергии, передающейся системе при землетрясении, без использования дополнительных источников энергии.

Сейсмоизолирующий слой. Слой, разделяющий субструктуру и супер-структуру, в пределах которого устраивается система сейсмоизоляции, как правило, в основании здания.

Сейсмоизолирующие элементы. Элементы, образующие систему сейсмоизоляции, представляющие собой слоистые резинометаллические опоры, вязкие или фрикционные демпферы, маятниковые и другие устройства.

Сухое трение. Трение, возникающее при соприкосновении двух твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки. Силы сухого трения всегда направлены по касательной к соприкасающимся поверхностям. Сухое трение, возникающее при относительном покое тел, называют *трением покоя*. Сухое трение, возникающее при относительном движении тел, называют *трением скольжения*.

Поступила: 06.11.2025; рецензирована: 20.11.2025; принятa: 24.11.2025.

Литература

1. Землетрясение в Мьянме (2025). Википедия: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение_в_Мьянме_\(2025\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение_в_Мьянме_(2025)) (дата обращения: 05.09.2025).
2. Землетрясение в Турции и Сирии (2023). Википедия: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение_в_Турции_и_Сирии_\(2023\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясение_в_Турции_и_Сирии_(2023)) (дата обращения: 05.09.2025).
3. Мерзляков А.А. О внешнем трении и законе трения / А.А. Мерзляков // ОНВ. 2006. № 4 (38). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vneshnem-trenii-i-zakone-treniya> (дата обращения: 06.10.2025).
4. Поляков С.В. Современные методы сейсмозащиты зданий / С.В. Поляков, Л.Ш. Килимник, А.В. Черкашин. М.: Стройиздат, 1989. 320 с.
5. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция и аддативные системы сейсмозащиты / Я.М. Айзенберг, М.М. Деглина, Х.Н. Мажиев [и др.]; отв. ред. Я.М. Айзенберг. М.: Наука, 1983. 141 с.
6. Айзенберг Я.М. Аддативные системы сейсмической защиты сооружений / Я.М. Айзенберг, А.И. Нейман, А.Д. Абакаров [и др.]; отв. ред. С. В. Медведев. М.: Наука, 1978. 246 с.
7. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин, Т.А. Сандович, Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. 175 с.
8. Уздин А.М. Энергопоглощение в системах сейсмозащиты зданий и сооружений: монография / А.М. Уздин, Т.А. Белаши / Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. 178 с.
9. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 1997. № 12. EDN:HASBGB.
10. Смирнов В. И. Сейсмоизоляция – современная антисейсмическая защита зданий в России / В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 41–54. EDN RARPTB.
11. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция – инновационная технология защиты высотных зданий от землетрясений в России и за рубежом / В.И. Смирнов // Сб. ст. 80 лет ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2007. С. 24–32. EDN ZELYRX.
12. Назин В.В. Новейшие сейсмостойкие конструкции и железобетонные механизмы сейсмоизоляции зданий и сооружений / В.В. Назин. М.: Стройиздат, 1993. 135 с.
13. Сейсмозащитные устройства: актуальные проблемы сейсмобезопасности: монография / ред. Н.П. Абовский [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 98 с. URL: <https://znanium.com/catalog/product/492779> (дата обращения: 28.10.2025).
14. Абовский П.Н. Конструктивная сейсмобезопасность зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях: препринт / под ред. Н.П. Абовского. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2009. 186 с.
15. Абакаров А.Д. Системы специальной сейсмозащиты зданий и сооружений: учебное пособие для студентов бакалавриата направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 07.03.01 «Архитектура» и специальности 08.05.01 «Уникальные здания и сооружения» / А.Д. Абакаров, Х.М. Омаров, Р.Г. Гасанов. Махачкала: ДГТУ, 2020. 132 с.
16. Абакаров А.Д. Оценка областей рационального применения системы сейсмоизоляции зданий со скользящим фундаментальным поясом / А.Д. Абакаров, Х.Р. Зайнулабиева // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2016. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-oblastey-ratsionalnogo-primeneniya-sistemy-seismoizolyatsii-zdaniy-so-skolzyaschim-fundamentalnym-royasm> (дата обращения: 28.10.2025).
17. Белаши Т.А. Сейсмоизоляция в системах сейсмозащиты зданий / Т.А. Белаши // Вестник Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. 2018. № 5 (5). С. 16–19. DOI 10.30451/iaeee.506. EDN YWDIMS.
18. Белаши Т.А. О перспективах применения сейсмоизоляции в сейсмостойком строительстве на территории Российской Федерации / Т.А. Белаши, А.А. Бубис, К.Э. Игнатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 5. С. 106–114. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-5-106-114. EDN WXPWJA.
19. Белаши Т.А. Сыпучие природные материалы в системах сейсмозащиты зданий / Т.А. Белаши, М.С. Деменкова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2018. № 4 (35). С. 21–24.
20. Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M., & Salvatori, A. (2014). Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use (Vol. 34, pp. 449–488). Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_14

21. *Hamid N.H., Azmi I.F. and Shin S.* Trends of Using Based Isolation System in High Seismic Regions // International Journal of Applied Engineering Research. ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 18 (2018), pp. 13439–13447 URL: <http://www.ripublication.com> https://ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n18_04.pdf
22. *Nakamura, Y., Okada, K.* Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan // Geoenviron Disasters. 6, 7 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0123-y>.
23. Systematization modern devices for the protection of buildings and structures due to seismic impacts / N. Kolosova, E. Kolosov, K. Agishev // MATEC Web Conf. Volume 107, 2017 Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering DYN-WIND'2017. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710700065> (дата обращения: 10.09.2025).
24. *Omkar R. Shelar.* Base Isolation and Damping Systems for Earthquake Resistance // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 12 | Dec 2018. P.1400–1405. URL: <https://www.irjet.net> (дата обращения: 18.10.2025).
25. *Семенов В.С.* Современные системы сейсмозащиты зданий и сооружений. Классификация. Основные конструктивные решения / В.С. Семенов, Т.В. Веременко // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. № 6. С. 65–70.
26. *Кириков Б.А.* Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции / Б.А. Кириков. М.: Наука, 1990. 72 с.
27. *Кириков Б.А.* Сейсмостойкость древних сооружений / Б.А. Кириков. М.: Наука, 1992. 136 с.
28. Авторское свидетельство СССР 132392: Фундаменты сейсмостойких строений на искусственном основании. Автор А.Е. Лаврушко. URL: <https://poleznayamodel.ru/patent/3/32392.html> (дата обращения: 07.09.2025).
29. *Габибов Ф.Г.* Разработка инновационных резинометаллических сейсмоизоляторов из утилизированных отходов / Ф.Г. Габибов, Е.М. Шокбаров // Вестник Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. 2018. № 5 (5). С. 19–21. DOI: 10.30451/iaeee.507. EDN XTGVGN.
30. *Габибов Ф.Г.* Разработка экономичных сейсмостойких зданий с использованием металлокордных резиновых отходов / Ф.Г. Габибов, Х.Р. Баят, Л.Ф. Габибова // Вестник АО «КазНИИСА». 2016. № 11 (63). С. 18–24.
31. *Саркисов Д.Ю.* Сейсмостойкость зданий и сооружений: учеб. пособие для студентов специальности 271101 «Строительство уникальных зданий и сооружений» / Д.Ю. Саркисов. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. 156 с.
32. *Поляков С.В.* Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим поясом в фундаменте / С.В. Поляков, Л.Ш. Килимник, Л.Л. Солдатова. М.: Стройиздат, 1984. 32 с.
33. Рекомендации по проектированию зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом и динамически гасителями колебаний / НИИОСП им. Герсеванова. М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1985. С. 55.
34. *Апсеметов, М.Ч.* Развитие сейсмостойкого строительства в Кыргызстане / М.Ч. Апсеметов // Вестник КГУСТА им. Н. Исanova. 2017. № 2 (56). С. 149–153. EDN YMBAUO.
35. *Акматов А.К.* Сейсмостойкое малоэтажное здание. Полезная модель // Интеллектуальная собственность. Официальный бюллетень. № 12 (297). Бишкек, 2022. С 8–9. URL: <https://patent.gov.kg/wp-content/uploads/2023/01/ИМ-122022.pdf>.