



ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ВИБРО- И СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ БЛОКОВ

УДК 624.15:699.841

АВТОРЫ

НЕМЧИНОВ Ю.И., д-р техн. наук, первый заместитель директора по научной работе ГП НИИСК;

МАРЬЕНКОВ Н.Г., д-р техн. наук, заведующий отделом ГП НИИСК;

ЖАРКО Л.А., канд. техн. наук, заведующая отделом ГП НИИСК;

БУЛАТ А.Ф., д-р техн. наук, академик, директор Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины;

ДЫРДА В.И., д-р техн. наук, заведующий отделом Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины;

ЛИСИЦА Н.И., канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены результаты многолетних экспериментально-теоретических исследований в Украине по проблеме сейсмоизоляции многоэтажных зданий, а также по виброзащите зданий от поездов метрополитена и автотранспорта.

The results of experimental-theoretic investigations in Ukraine on the problem of seismic isolation high-rise buildings, as well as vibration protection of buildings from underground trains and vehicles are presented.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

здание, резинометаллические сейсмоизолирующие блоки, испытания изоляторов, расчет на акселерограммы

ВВЕДЕНИЕ

После разрушительных землетрясений в Армении, 1988 г. и особенно в Японии, 1995 г. сейсмоизоляция используется при строительстве многоэтажных зданий и мостов во многих странах. В г. Осака, Япония, построено сейсмоизолированное здание высотой 50 этажей [6, 11, 12].

Сейсмоизоляция – это перспективное направление, которое развивается в последние годы в разных странах. В России, например, на 2010 г. построено уже более 300 сейсмоизолированных зданий и более 70 сейсмоизолированных мостов [7, 8]. В последние годы все большее число сейсмоизолированных зданий, мостов и других сооружений возводятся в различных странах на разных континентах. Наибольшее применение сейсмоизоляция получила в Японии, Китае, США, РФ, Канаде, Армении, Новой Зеландии и Италии. Широкое распространение при реконструкции и возведении новых зданий получили системы сейсмоизоляции на основе резинометаллических сейсмоизолирующих блоков (РСБ).

НЕРЕШЕННЫЕ ЗАДАЧИ

В Украине данное направление развивается пока медленными темпами, что связано как с отсутствием необходимого финансирования, так и с необходимостью экспериментальной проверки систем сейсмоизоляции на натуральных фрагментах зданий.

Согласно ДБН В.1.1-12:2014 [1] и Еврокода 8 [5] при проектировании зданий, оснащенных сейсмоизоляцией, необходимо, помимо спектрального метода расчёта, выполнять прямой динамический расчёт с использованием инструментально зарегистрированных записей ускорений грунта при землетрясениях на площадке строительства или же сгенерированных акселерограмм на основе результатов работ по сейсмомикрорайонированию.

Основное различие между деформированием конструкций неизолированного здания и сейсмоизолированного здания с применением РСБ заключается в существенном различии относительных горизонтальных перемещений междуэтаж-



ных перекрытий при землетрясении [6 - 8]. Значительные допустимые (равные высоте сейсмоизолирующего блока) горизонтальные перемещения верха РСБ обеспечиваются физическими свойствами резиновых элементов. В настоящее время наибольшее распространение получили сейсмоизолирующие слоистые резинометаллические блоки, которые обеспечивают эффективное гашение энергии при землетрясении.

На основе выполненного анализа нормативных документов и исследований по проблеме сейсмозащиты зданий с помощью устройства систем сейсмоизоляции можно сделать следующие выводы и предложения:

1. Для сейсмоопасных районов Украины применение сейсмоизоляции во вновь проектируемых зданиях различной этажности в сейсмоопасных районах является перспективным направлением, т. к. позволяет повысить сейсмостойкость конструкций и получить экономический эффект от 300 до 700 тысяч грн. на одно здание высотой от 9 до 16 этажей (данные расчётов лаборатории экономических исследований НИИСК на 2006 г.).
2. С целью снижения стоимости строительства зданий (в условиях экономического кризиса в Украине) проектным и исследовательским организациям необходимо внедрять в больших объемах системы сейсмоизоляции и виброзащиты от наземного и подземного транспорта при строительстве многоэтажных зданий.
3. Для более широкого строительства зданий с системами сейсмоизоляции необходимо использовать данные проведенных экспериментальных исследований РСБ запатентованной конструкции [10] (рис. 1). Стоимость выпускаемых в Украине РСБ в 5...7 раз меньше зарубежных аналогов (Китай, Италия, Япония и т. д.).

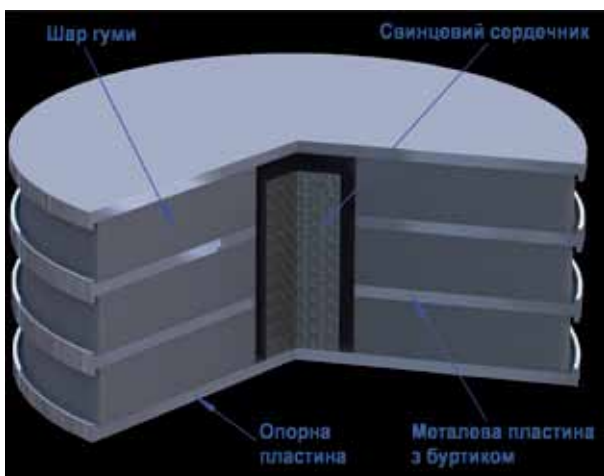


Рис.1. Общий вид резинометаллической высокодемпфирующей сейсмоизолирующей опоры со свинцовым сердечником.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2010 г. Ялтинским филиалом института «КрымНИИпроект» с участием ГП НИИСК был разработан проект 10-этажного крупнопанельного жилого дома с устройством сейсмоизоляции в уровне цокольного этажа. Конструктивное решение зданий с размерами в плане 16,0×18,2 м основано на серии 1-464 АС/ЮБК – сборные железобетонные стеновые панели и монолитные плиты перекрытий для применения при расчётной сейсмичности 8 баллов.

Устройство сейсмоизоляции позволяет снизить деформирование этажей здания при землетрясениях не только в горизонтальном и вертикальном направлениях, но и при крутильных колебаниях.

Для обоснования эффективности сейсмоизоляции здания при интенсивности сейсмических воздействий 9 баллов (г. Ялта) были выполнены численные исследования пространственных моделей зданий по двум вариантам: с применением сейсмоизоляции и при её отсутствии. Расчётные данные подтвердили снижение горизонтальных сейсмических нагрузок до двух раз для варианта расчётной модели с сейсмоизоляцией на основе РСБ в уровне цокольного этажа. При этом расчётное значение периода собственных колебаний здания на РСБ по первой форме равно 1,4 с (при отсутствии сейсмоизоляции расчётное значение периода равно 0,5 с). Максимальные перекосы этажей получены для модели здания без изоляторов при воздействии сейсмических нагрузок по направлению поперечной оси здания, вычисленных по спектральному методу, и равны 1/708, что в 1,8 раза больше расчётных перекосов здания с сейсмоизоляцией (1/1234).

Для практического применения систем сейсмоизоляции зданий Институтом геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины и ГП НИИСК были выполнены экспериментальные исследования для обоснования параметров РСБ, запатентованы их конструкции, разработана конструкторская документация и изготовлены экспериментальные образцы трёх типов резинометаллических сейсмозащитных блоков диаметром 400мм и 500мм и общей высотой резинового слоя: 2×120 мм, 2×70 мм и 2×50 мм (рис. 2).

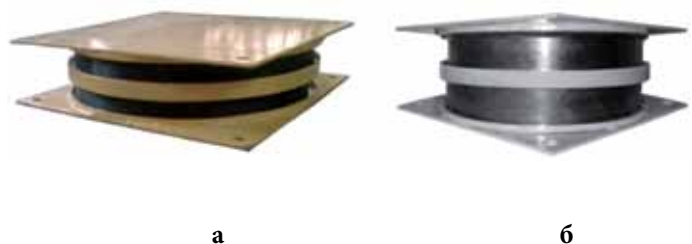


Рис.2. Общий вид конструкций РСБ на натуральном каучуке, выпускаемых в Украине: сейсмозащитный блок 1-го типа (высота резиновых элементов 2×50 мм, диаметр 500 мм) - а; сейсмозащитный блок 2-го типа (высота резиновых элементов 2×70 мм, диаметр 400 мм) - б



Для экспериментального определения фактических жесткостных и демпфирующих характеристик РСБ были проведены в ГП НИИСК лабораторные испытания трёх типов разработанных конструкций при статических и динамических нагрузках в соответствии с требованиями Еврокода 8 [10], европейского и международного стандартов.

Испытания РСБ проводились в два этапа: сначала динамические – определение частот колебаний и демпфирующих характеристик опор, а затем статические – определение жесткостных характеристик опор на сжатие и сдвиг.

При динамических испытаниях на четырёх одинаковых РСБ устанавливался железобетонный блок массой 5100 кг (рис. 3). Колебания блока в горизонтальной и вертикальной плоскостях задавались специальным устройством и регистрировались восьмиканальной системой сейсмомониторинга и двухканальной спектроанализатором марки 2148 фирмы «Брюль и Кьер» (Дания).

На основе инструментальных записей сигналов виброускорений при собственных колебаниях динамической системы «бетонный блок-РСБ» определены динамические вертикальная и горизонтальная (сдвиговая) жесткости и параметры затухания испытанных РСБ.



Рис.3. Определение динамических характеристик резинометаллических сейсмоизолирующих опор.

При статических испытаниях опор на сжатие нагружение осуществлялось гидравлическими домкратами ступенями по 50...300 кН на специальном стенде и на прессе ступенями до максимальной нагрузки 9000 кН, в зависимости от типа опоры с выдержкой 5 мин на каждой ступени, после чего снимались показания вертикальных перемещений. Испытания опор на сдвиг проводились на специальном стенде, оборудованном гидравлическими домкратами для создания вертикальных и сдвиговых нагрузок.

С целью определения влияния свинцового сердечника на жесткостные и демпфирующие характеристики РСБ (испытывались резиновые элемен-

ты диаметром 500 мм) были проведены циклические испытания на сжатие и на сдвиг двух опор без свинцовых сердечников и двух – со свинцовыми сердечниками. Сердечники были изготовлены в виде сплошных цилиндров высотой 100 мм и диаметром 70 мм (14% от диаметра резинового элемента опоры). Анализ опытных данных показал, что наличие свинцового сердечника существенно влияет на жесткостные и диссипативные характеристики РСБ при сдвиге.

Испытания опор на сжатие (рис. 4) выполнены для трёх типов опор – диаметр 400 мм, высота: 2×70 мм и 2×120 мм; диаметр 500 мм, высота 2×50 мм.

На рис. 4 приведен общий вид опоры при сжимающей нагрузке 3000 кН (троекратное превышение номинальной нагрузки).



Рис.4. Общий вид РСБ диаметром 500 мм под нагрузкой 3000 кН (испытания на прессе).

Для оценки влияния буртиков металлических пластин на жесткостные и демпфирующие характеристики РСБ были выполнены испытания двух образцов опор: при наличии средней металлической пластины с буртиками и при средней пластине без буртиков (гладкая пластина). На рис. 5 приведены зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» при различном исполнении средней пластины РСБ.

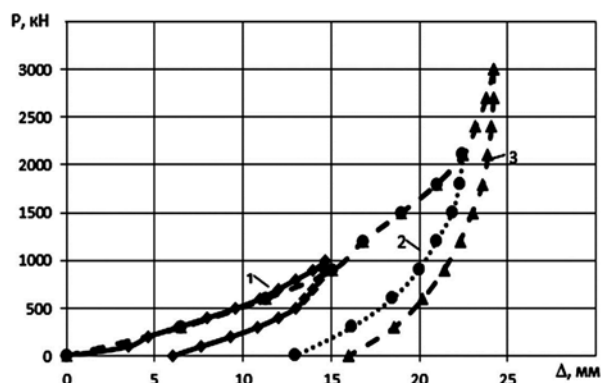


Рис.5. Зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» при различном исполнении средней пластины РСБ.



– перемещение» при средней пластине с буртиками (кривая 1) и гладкой и рифленой средней пластине (кривая 2 и 3). Анализ кривых показывает, что наличие буртиков на средней пластине приводит к увеличению вертикальной жёсткости РСБ на 10...12 %.

Кроме того, в соответствии с требованиями стандарта ISO и европейского стандарта для определения состояния конструкции РСБ при вертикальных максимальных нагрузках, превышающих проектные в 4 раза, один образец РСБ (вариант со средней рифлёной пластиной без кольца и без сердечника) был испытан циклическими вертикальными нагрузками на прессе по такой специальной программе: 3 полуцикла «нагрузка - разгрузка» ступенями по 300 кН (выдержка на каждой ступени 5 минут) до 3000 кН; 2 полуцикла «нагрузка - разгрузка» ступенями по 500 кН (выдержка на каждой ступени 2 минуты) до 5000 кН; 1 полуцикл «нагрузка - разгрузка» ступенями по 1000 кН (выдержка на каждой ступени 5 минут) до 9000 кН.

При сжимающих многоцикловых нагрузках от 3000 кН до 9000 кН после полной разгрузки РСБ в течение 10 минут резиновые элементы полностью принимали первоначальную форму. При этом трещины ни в одном из 12-ти испытанных резиновых элементов, изготовленных на натуральном каучуке, не обнаружены.

Сейсмоизолирующие блоки изготавливаются на основе стандартных резиновых элементов заданных размеров (в Украине были испытаны РСБ с диаметрами резиновых элементов от 400 мм до 500 мм, которые использовались при устройстве сейсмоизоляции многоэтажных зданий).

По результатам расчёта сейсмоизолированного здания на сейсмические нагрузки определяются геометрические параметры резиновых элементов, жёсткость на сжатие и на сдвиг РСБ. Сейсмоизолирующие блоки устанавливаются между нижней фундаментной плитой (например, на её рёбрах жёсткости) и верхней монолитной железобетонной распределительной плитой здания. Возможны варианты установки РСБ в уровне цокольного этажа, а также на оголовках свай. Нижняя опорная пластина с помощью анкеров крепится к рёбрам жёсткости фундаментной плиты или к оголовку свай, а верхняя опорная пластина – к верхней распределительной железобетонной плите здания или к монолитным стенам цокольного этажа здания.

ПРИМЕР РАСЧЕТА 16-ЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ С СИСТЕМОЙ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

В соответствии с требованиями Еврокода 8 [5] и ДБН В.1.1-12:2014 [1] расчеты зданий с системой сейсмоизоляции следует выполнять на воздействия акселерограмм с учетом нелинейного деформирования материалов конструкций. Для решения этой задачи использована методика на основе метода спектра несущей способности (СНС). В соответствии с этой методикой были выполнены расчеты пространственной нелинейной

модели сейсмоизолированной секции №2 (вариант с дополнительным цокольным этажом высотой 1,6 м, в котором размещены резинометаллические сейсмоопоры).

Конструктивная схема блок-секции №2 здания представляет собой железобетонные рамы с диафрагмами жесткости по осям 1 и 6 (начиная с отметки +3.30 м и до верхнего этажа), а также монолитные стены вдоль остальных продольных и поперечных стен. В проектируемой секции № 2 имеется подвальный этаж и 16 надземных этажей. План типового этажа приведен на рис. 6. Отметка пола первого этажа секции (± 0.00) соответствует абсолютной отметке 28,5 м. Высота подвала равна 3,5 м, высота ростверка – 1,5 м. Сваи буронабивные диаметром 1,2 м и длиной 25,9 м. Бетон ростверка и свай класса С20/25, арматура класса А400С.

Блок-секция запроектирована с размерами в плане ростверка 18x27 м и высотой от низа фундаментного ростверка до верха покрытия 61,1 м. Несущие железобетонные стены приняты толщиной 400 мм, стены лифтового блока толщиной 200мм. Колонны имеют поперечное сечение 40x40 см, ригели двух типов: сечением 40x50 см и 30x40 см. Для обеспечения пространственной жесткости здания стены объединяют монолитные железобетонные перекрытия толщиной 160 мм.

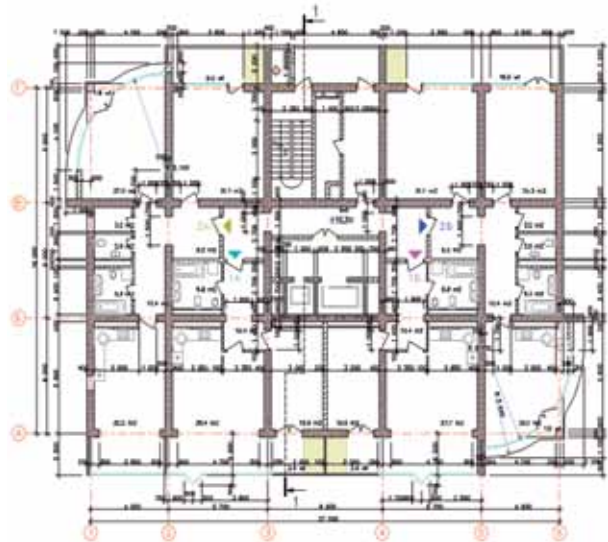


Рис.6. План типового этажа секции.

На участке строительства в 2009г. выполнялись работы по определению сейсмичности площадки строительства. По результатам этих работ установлено, что сейсмичность площадки строительства многоквартирного жилого дома составляет 8 баллов. Результаты работ по сейсмомикрорайонированию учитывались при расчётах динамической модели жилого дома с системой сейсмоизоляции.

В варианте расчетной модели жилого дома с сейсмоизоляцией был добавлен дополнительный цокольный этаж высотой 1,6 м, в пределах которого размещаются сейсмоопоры (рис. 7). Расчеты динамических моделей здания выполнены в соответствии с требованиями Еврокода 8 и ДБН В.1.1 -12:2014.



Расчеты проведены при помощи программного комплекса «Ли́ра-Windows». Расчетные схемы, принятые в виде пространственной системы, отражают конструктивное решение рассматриваемой секции.

Расчетные схемы состоят из стержневых элементов, моделирующих работу колонн, свай и перемычек, а также оболочечных элементов, которые моделируют работу перекрытий, диафрагм и фундаментного ростверка. Сопряжение элементов между собой – жесткое. Сейсмоопоры моделировались упругими связями по осям X, Y и Z. Жесткости сейсмоопор были определены по результатам проведенных испытаний.

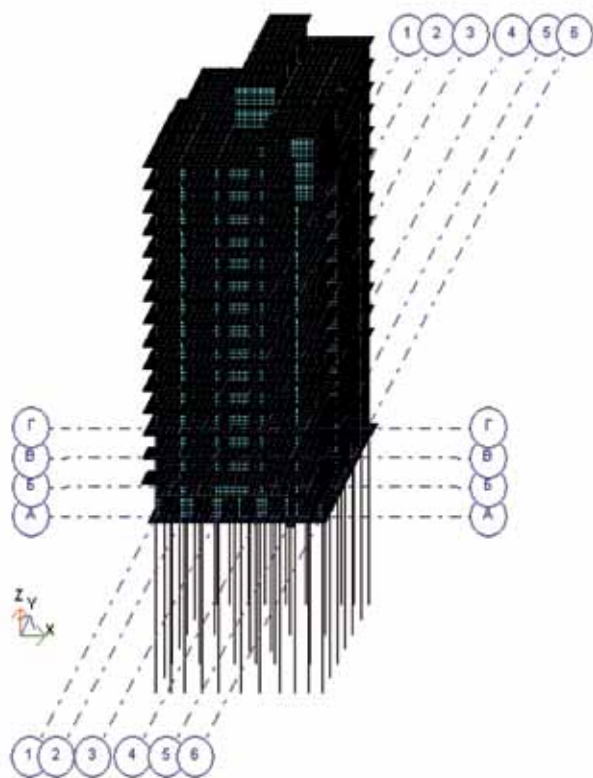


Рис.7. Компьютерная модель системы «основание – свайный фундамент – сейсмоопоры – верхнее строение».

При нелинейных расчетах сейсмоизолированной секции учитывалась физическая нелинейность бетона и арматуры. Процент армирования несущих стен был принят равным: 1,5 % – вертикальное и 0,6 % – горизонтальное. Расчеты проведены с помощью ПК ЛИРА при ступенчатом увеличении горизонтальных сейсмических нагрузок (по направлению цифровых осей), принятых по первой форме по результатам расчета сейсмоизолированного здания по спектральному методу. В результате расчетов определены нелинейные диаграммы деформирования всех этажей здания и построен спектр несущей способности - СНС (рис. 8), который аппроксимирован билинейной диаграммой в соответствии с рекомендациями Приложения В Еврокода 8 [10].

На основе полученного графика СНС и неупругих спектров ускорений определено максимальное нелинейное перемещение верха сейсмоизолиро-

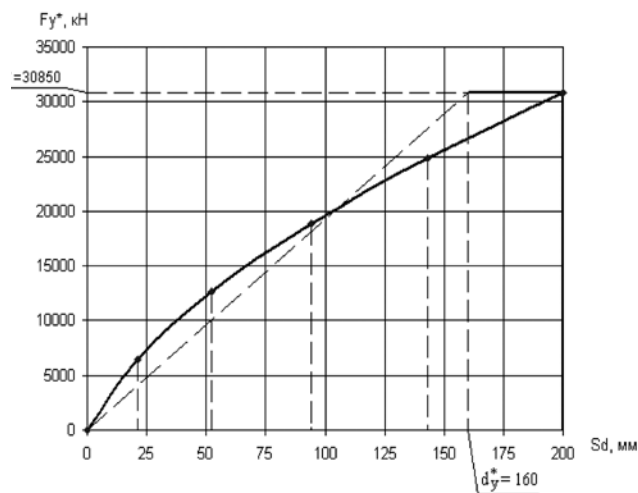


Рис.8. Спектр несущей способности (сплошная линия) секции и идеализированная диаграмма (пунктирная линия) для определения предела текучести и соответствующего ему перемещения.

ванной секции №2 (рис. 9), которое равно 200 мм.

Выполнен также расчет эквивалентной одно-массовой системы на воздействие акселерограммы vb6r (интенсивностью 8 баллов) из набора, рекомендуемого ДБН [1]. Диапазон преобладающих периодов данной акселерограммы составляет 0,9...1,5 с, т.е. такие воздействия вызывают максимальные колебания секции №2 на сейсмоопорах, так как период собственных колебаний изолированного здания вдоль цифровых осей (по оси Y в расчетной модели) получен равным 1,6 с. Расчетное значение горизонтального перемещения сейсмоизолированного здания получено равным 170 мм, что отличается от перемещения, полученного по методу СНС (200 мм), на 15%.

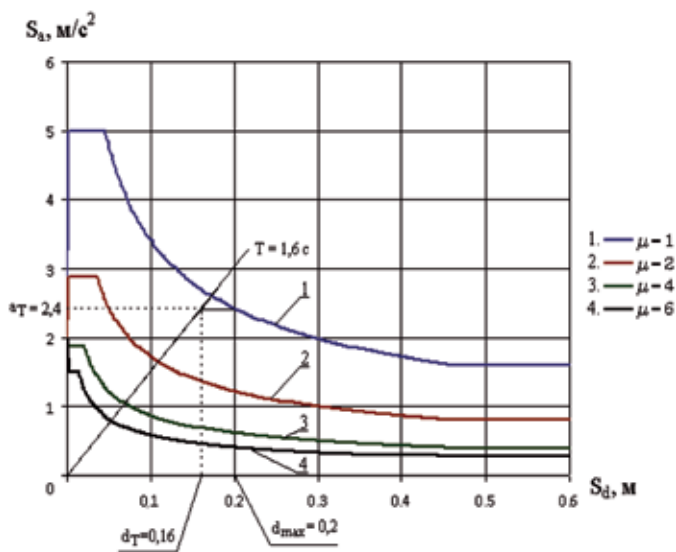


Рис.9. К определению перемещения верха секции на основе метода СНС ($a_T = 2,4 \text{ м/с}^2$ – ускорение, соответствующее пределу текучести; $\mu = 1$ – коэффициент податливости сейсмоизолированного здания).



ВЫВОДЫ

На основании выполненных динамических и статических испытаний высокодемпфирующих сейсмоопор (РСБ), численных исследований динамических пространственных моделей (с сейсмоизоляцией и при её отсутствии) 10-этажных крупнопанельных зданий и 16-этажного жилого дома с монолитными несущими стенами при интенсивности сейсмических воздействий 9 и 8 баллов можно сделать следующие выводы.

1. Разработанные в Украине системы сейсмоизоляции зданий на основе запатентованных высокодемпфирующих сейсмоизолирующих блоков обеспечивают снижение сейсмической реакции конструкций (нагрузок и амплитуд относительных колебаний этажей зданий, т.е. переколов), что позволяет проектировать экономичные здания с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости в соответствии с требованиями отечественных и Европейских норм по сейсмостойкому строительству. Расчётный экономический эффект составляет на одно здание высотой от 9 до 16 этажей от 300 до 700 тысяч грн. (данные расчётов лаборатории экономических исследований НИИСК на 2006 г.).

2. Суммарные горизонтальные сейсмические нагрузки в уровне перекрытий крупнопанельных 10-этажных зданий с сейсмоизоляцией меньше до двух раз по сравнению с типовым решением (при отсутствии изоляции). Устойчивость здания против опрокидывания с учётом сейсмических нагрузок обеспечена (удерживающий момент больше опрокидывающего в 2,2 раза).

3. Процент армирования несущих стен зданий на нижних этажах с сейсмоизоляцией уменьшается в 1,5...2,0 раза по сравнению с вариантом отсутствия сейсмоизоляции. Эти данные подтверждают эффективность применения сейсмоизоляции для рассмотренных объектов проектирования – жилых домов высотой от 9 до 16 этажей.

4. Разработанные и испытанные конструкции РСБ были использованы в 2014-2015 гг. для сейсмозащиты и виброзащиты (от поездов метрополитена и автотранспорта) жилых домов в г. Киеве: 10-секционного 10-этажного жилого дома по ул. Киквидзе и 26-этажного жилого дома по Оболонскому проспекту.

5. Сейсмоизоляция на основе РСБ обеспечивает собственную частоту колебаний здания в горизонтальной плоскости 1 Гц и менее, что соответствует требованиям ДБН и Еврокода 8. Следует отметить, что разработанные конструкции РСБ могут быть также использованы для защиты зданий и сооружений от воздействий наземного (железнодорожного и автомобильного транспорта), подземного (метрополитена), а также для виброизоляции тяжёлых машин различного технологического назначения для обеспечения безопасной эксплуатации зданий и сооружений [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1 – 14:2014 / науковий керівник

Ю.І. Немчинов. - [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. - VI, – 110 с. – (Будівельні норми України).

2. ПК “Лира”, версія 9.4. Программний комплекс для расчёта и проектирования конструкций: справочно-теоретическое пособие под ред. академика АИИ Украины А.С. Городецкого. – К.-М., 2003. – 464 с.
3. Нагрузки и воздействия: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинні від 2007-01-01]. – К.: Мінбуд України, 2006. – 59 с. – (Будівельні норми України).
4. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Чинні від 2009-12-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с. – (Будівельні норми України).
5. Comité Européen de Normalisation: “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings”. EN 1998-1, CEN, Brussels, 2004.
6. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / [Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, А.К. Хавкин, К.Н. Бабик; ред. Немчинова Ю. И.]. – К., 2012. - 384 с.
7. Эффективные системы сейсмоизоляции. Исследования, проектирование, строительство / [Я.М. Айзенберг, В.И. Смирнов, С.И. Бычков, Ю.А. Сутырин] // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2002. – № 1. – С. 31-37.
8. Смирнов В.И. Испытания высокодемпфирующих резинометаллических опор для применения в сейсмоизолированном здании «Гостинично-туристического комплекса «Sea Plaza» в г. Сочи / В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2009. – № 4. – С. 40-48.
9. ДБН В.1.1-12:2006. Будівництво у сейсмічних районах України. – [Чинні від 2007-01-02]. – К.: Мінбуд України, 2006. - 82с. – (Будівельні норми України).
10. Пат. 58418 Україна. Антисейсмічна опора / В.І. Дирда, Ю.І. Немчинов, М.І. Лисиця, М.Г. Мар`єнков та ін.]; заявл. 30.09.2010; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.
11. Булат А.Ф. Резинометаллические блоки для вибросейсмозащиты машин и сооружений / [А.Ф. Булат, Ю.И. Немчинов, В.И. Дырда и др.] // Галузеве машинобудування, будівництво: зб. наук. праць. – Полтава: Полтавський національний технічний університет, 2009. – Вип. 3(25). – Т. 1. – С. 30-35.
12. Вибросейсмозащита тяжёлых машин, зданий и сооружений с помощью резинометаллических блоков / [А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Н.И. Лисица и др.] // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів: Львівська політехніка, 2011. – Вип. 45. – С. 460-464.