

В.О. Сахаров, к.т.н., доцент

В.А. Мельник, аспірант

Київський національний університет будівництва та архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИКОРИСТАННЯ СЕЙСМОІЗОЛЯЦІЇ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН 47-ПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ

Наведено порівняльні результати розрахунку висотної будівлі на сейсмічні навантаження як системи «основа – фундамент – будівля». Розрахунки викладено у тривимірній постановці за прямим динамічним методом і схемою Ньюмарка. Показано вплив використання гумометалевих опор на зміну напружено-деформованого стану конструкцій.

Ключові слова: *сейсміка, динаміка, висотна будівля, Ньюмарк, сейсмоізоляція, гумометалеві опори, система «основа – фундамент – будівля».*

В.А. Сахаров, к.т.н., доцент

В.А. Мельник, аспірант

Київський національний університет будівництва та архітектури

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ 47-ЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ

Приведены сравнительные результаты расчета высотного здания на сейсмические нагрузки как системы «основание – фундамент – здание». Расчеты произведены в трехмерной постановке прямым динамическим методом по схеме Ньюмарка. Показано влияние использования резинометаллических опор на изменение напряженно-деформированного состояния конструкций.

Ключевые слова: *сейсмика, динаміка, висотне здание, Ньюмарк, сейсмоізоляція, резинометаллические опоры, система «основание–фундамент–здание».*

V.O. Sakharov, Ph.D.

V.A. Melnik, postgraduate

Kyiv National University of Construction and Architecture

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SEISMIC ISOLATION ON THE STRESS-STRAIN STATE OF 47-STOREY BUILDING

In the article comparative results of calculations of high-rise buildings under seismic loads as a system “basement-foundation-building” are given. The calculations were made in three-dimensional case by direct dynamic method using the Newmark’s scheme.

Influence of using elastomeric isolators on changes of construction’s stress-strain state is shown.

Keywords: *seismicity, dynamic, high-rise building, Newmark, seismic isolation, rubbers supports, basement-foundation-building.*

Вступ. Сприйняття будівлею навантажень сейсмічного характеру нерідко викликає в споруді недопустимі переміщення, деформації або ж навіть руйнування. Зниження таких навантажень можливе кількома способами:

підвищення жорсткості будівлі зарахунок збільшення матеріалоємності конструкцій, що у свою чергу, призводить до суттєвого підвищення матеріалоємності будівлі,

абовлаштування сейсмоізоляції. Останні можуть використовуватися як для нових, так і існуючих конструкцій. Найбільш поширеною сейсмоізоляцією протягом останнього часу є гумометалеві опори (ГМО), які є відносно дешевим та простим варіантом конструктивного зниження сейсмічної небезпеки. У літературі та всесвітній мережі Інтернет є інформація щодо застосування ГМО для конкретних споруд та будівель. Проте мало досліджень присвячено раціональному та ефективному розташуванню цього типу сейсмоізоляції. Крім цього, практично відсутня інформація щодо комплексного проектування сейсмоізоляції при врахуванні системи «основа – фундамент – будівля». Ці питання потребують подальших досліджень з метою найбільш раціонального з конструктивної та економічної точок зору використання ГМО.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Для вивчення ефективності використання сейсмоізоляторів виконують різносторонні дослідження та розрахунки. Зокрема, у роботі [3] виконано порівняння розрахунку будівлі з ГМО та без них, вона знаходиться в м. Сочі, інтенсивність сейсмічного навантаження складає 9 балів. За умов використання ГМО вдалося знизити максимальні переміщення на 45%, максимальні зусилля у вертикальних елементах – на 30% порівняно з будівлею без сейсмоізоляції.

Зважаючи на необхідність дотримання санітарно-гігієнічних норм при проектуванні будівель, важливу роль відіграє максимальне прискорення, яке спричинює ця будівля. За допомогою ефективного підбору та розташування сейсмоізоляторів [4] вдалося знизити прискорення більш ніж удвічі.

Використання сейсмоізоляторів, крім зменшення переміщень та напружень, має у своїй основі економічний ефект, що розкрито у роботі [5]. Будівлю, яка була запроектована для інтенсивності у 8 балів, було адаптовано для 9-бальної сейсмічності. Для цього було використано ГМО, які забезпечили практично повне збереження конструктивних рішень і дозволили знизити вартість зведення одного будинку на 4,3% стосовно альтернативних проектних рішень.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. В умовах економічної кризи гостро постають питання економії коштів. Зокрема, у сейсмічно активних районах вартість будівництва може бути у декілька разів вищою, ніж у «спокійних» регіонах. Тому зниження сейсмічного навантаження на будівлю за допомогою гумометалевих опор (як найбільш широко застосованої сейсмоізоляції у світі) дозволить не тільки поліпшити експлуатаційні характеристики нових та існуючих будівель, але й суттєво знизить вартість їхнього зведення. Раціональному розташуванню ГМО під будівлею присвячено недостатньо досліджень, що є обмеженням при інженерному застосуванні сейсмоізоляції. Також однією з головних проблем можна назвати правильне визначення сейсмічного навантаження.

Метою роботи є дослідження впливу влаштування сейсмоізоляції на напружено-деформований стан несучих конструкцій висотної будівлі на прикладі 47-поверхового хмарочосу.

Основний матеріал і результати. Проектування сейсмоізоляції для зменшення сейсмічного впливу потребує комплексного аналізу взаємодії в складі елементів системи «основа – фундамент – будівля». Улаштування сейсмоізолюючих опор, з одного боку, дозволяє зменшити сейсмічний вплив, проте, з іншого – підвищує деформативність конструкцій. У цій роботі дослідження проведено на базі реальної будівлі. Висота її сягає 150 м (45 надземних поверхів та 2 підземних). Геометричні розміри в плані складають 34,8х37,4 м. Будівля є монолітно-каркасною з несучим внутрішнім ядром жорсткості та пілонами по зовнішньому периметру. Зважаючи на висоту конструкції, будівлю віднесено до V категорії складності, вона має клас наслідків СС3.

Грунтову основу складено шарами супісків та глин, параметри яких наведено в табл. 1. Будівля має пальові фундаменти з буронабивних паль діаметром 1 м і довжиною 34 м, об'єднані плитним ростверком товщиною 2 м.

Для дослідження розподілу напружено-деформованого стану несучих конструкцій під дією сейсмічних навантажень будівля розглядалась як система «основа – фундамент – будівля». Розрахунки виконувалися за прямим динамічним методом скінченних елементів (МСЕ), за схемою Ньюмарка на базі автоматизованої системи наукових досліджень (АСНД) «VESNA».

Для коректного врахування роботи ґрунтової основи використовувався об'ємний ґрунтовий масив. Урахування масових сил ґрунтової основи поряд з її просторовою об'ємною жорсткістю є більш обґрунтованим з точки зору фізичних властивостей ґрунтової основи, тому при дослідженнях інерційні сили ґрунту було враховано.

Таблиця 1. Фізико-механічні параметри ґрунтової основи

ІГЕ	Назва ґрунту	Нормативні значення							
		Природна вологість	Число пластичності	Показник консистенції	Щільність ґрунту, г/см ³	Коефіцієнт пористості	Модуль деформації, кгс/см ²	Питоме зчеплення, кгс/см ²	Кут внутр. тертя, град
		W	I _p	I _L	ρ	e	E	c	φ
3	Супісок пластичний	0,24	0,05	0,67	1,94	0,71	70	0,09	18
5	Супісок твердий	0,20	0,03	<0	1,90	0,67	150	0,15	26
6	Пісок дрібний, щільний, маловологий	0,04	-	-	1,78	0,55	350	0,03	33

Скінченноелементну модель будівлі зображено на рис. 1, вона складається з ґрунтової основи, вертикальних та горизонтальних несучих конструкцій будівлі. Кількість поверхів складала 45 надземних та 2 підземних. Фундамент є пальовим. Розміри прийнятого ґрунтового масиву склали 170x170 м у плані та 135 м по висоті.

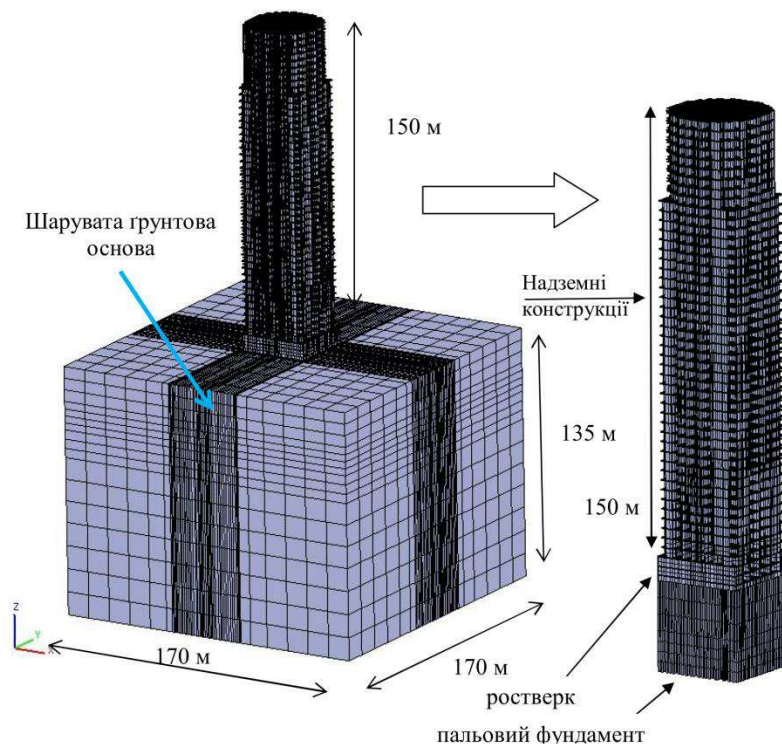


Рис. 1. Скінченноелементна модель системи «основа – фундамент – будівля»

Робота ґрунтового масиву описувалася просторовими ізопараметричними скінченними елементами з характеристиками відповідно до інженерно-геологічних вишукувань. Конструкції плитного ростверку, плит перекриття та покриття моделювалися просторовими елементами, колони та палі – стрижневими елементами. Інші вертикальні несучі елементи будівлі представлялись елементами оболонок згідно з геометричними та фізико-механічними параметрами. Зусилля, отримані за результатами розрахунків на сейсмічні навантаження повинні аналізуватись у комплексі з результатами на основне сполучення навантажень.

Для більшої достовірності розрахунки виконували у кількох програмних комплексах: АСНД «VESNA» та ПК «Ліра».

У реальних умовах сейсмічні коливання із часом згасають. Такі процеси можна характеризувати двома причинами: внутрішній опір за рахунок деформування матеріалу конструкції, вузлів і т.д. та зовнішній опір унаслідок взаємодії з навколишнім середовищем. Таким чином, описання процесів деформування системи під дією динамічного навантаження для дискретних систем із багатьма степенями вільності для МСЕ із врахуванням згасання необхідно розв'язати систему звичайних диференціальних рівнянь

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{U\} + [C] \frac{d}{dt} \{U\} + [K] \{U\} = \{Q(t)\}, \quad (1)$$

де $[M]$ – матриця мас; $[C]$ – матриця згасання; $[K]$ – матриця жорсткості; $\{U\}$ – вектор переміщень; $\{Q(t)\}$ – вектор навантажень як функція часу.

Для описання процесів згасання та заповнення матриці $[C]$ слід використовувати залежності, отримані на базі експериментальних даних для відповідних середовищ. Проте, враховуючи складність і високу вартість, а в окремих випадках і неможливість проведення експериментів, можна скористатися нормативними даними [1].

У багатьох випадках через велику кількість рівнянь застосовують методи, які передбачають однакові параметри згасання для всіх середовищ, що не відповідає дійсності. У цій роботі параметри згасання приймалися згідно з властивостями відповідних матеріалів за теорією Фогта і за рекомендаціями норм [1] через декремент коливань: для ґрунтів основи $\delta_{гр} = 0.6$; для конструкцій будівлі $\delta_k = 0.3$.

Параметр згасання перебуває в лінійній залежності від частоти і визначається залежно від обраної частоти, як у формулі (3) [6]

$$\kappa = \frac{\delta}{\pi \cdot \omega_0}, \quad (2)$$

де ω_0 – кругова частота (перша власна частота будівлі $\omega_0 = 4.78 \text{ с}^{-1}$ (0.76 Гц).

Матриця демпфування в цьому випадку буде визначатись:

$$[C] = \kappa [K]. \quad (3)$$

При чисельних дослідженнях хвиль, які розповсюджуються в дослідному об'ємі ґрунту, можуть віддзеркалюватися від зовнішнього контуру границь (де обмежені тільки переміщення або кути поворотів). Енергія таких хвиль випромінюється в навколишнє середовище, що в цій роботі реалізовано на основі методу граничного демпфування, запропонованого Лізмером. У цьому випадку забезпечується поглинання енергії, що приходить на границю.

За індивідуальними умовами, що були складені для цієї будівлі, максимальні відносні переміщення повинні складати не більше 1/500 висоти будівлі.

За результатами статичних розрахунків максимальні горизонтальні переміщення верхівки склали 10,1 см.

Для дослідження сейсмічного впливу динамічне навантаження було використано акселерограму № 8 з нормативного набору синтезованих акселерограм [1], обрана за переважаючим періодом власних коливань ($T_6=6,8$ с). Сейсмічність майданчика була прийнята в 7 балів. З метою детального аналізу характеру деформування будівлі розрахунки виконували для фрагменту тривалістю 6 с (рис. 2).

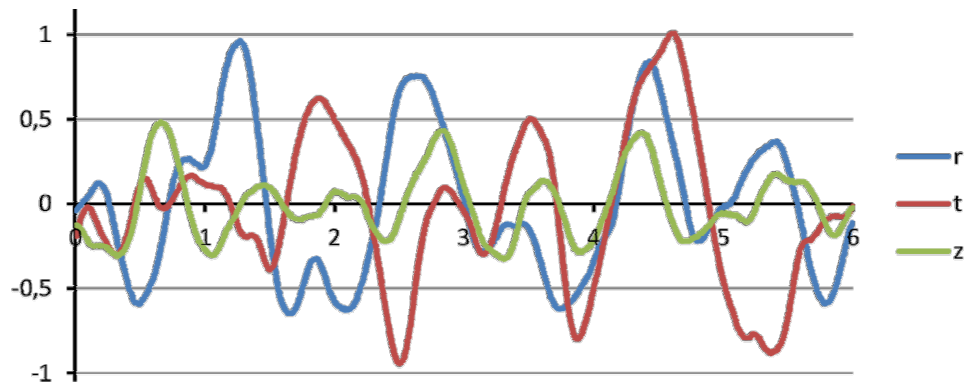


Рис. 2. Розрахункова синтезована акселерограма № 8 ($t=6$ с)

Складена скінченноелементна модель (рис. 3) містить 723183 рівняння. Час моделювання в 6 с деформацій будівлі склав близько 8 годин з використанням ПК на базі IntelCore i7, RAM 16Гб, HDD 1Тб.

У результаті розрахунку було отримано, що найбільш навантаженими елементами підвального поверху стали пілони та стіни, що знаходяться по зовнішньому периметру будівлі. Додаткові напруження від сейсмічного навантаження склали близько 230...250 кПа, а в окремих зонах концентраторів значення сягали 1 – 2 МПа.

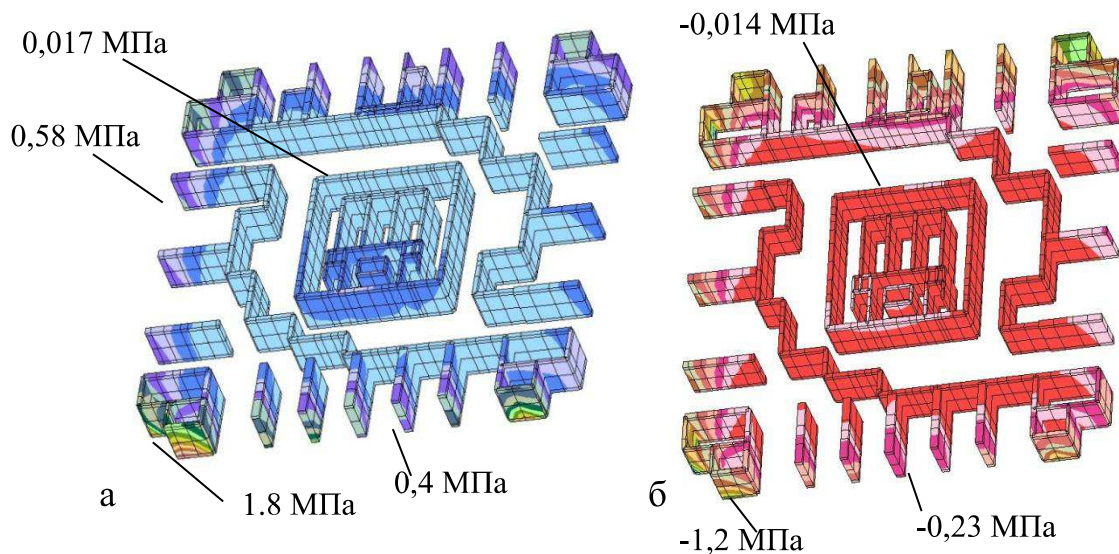


Рис. 3. Розподіл обвідних вертикальних напружень у несучих елементах підвального поверху: а – розтягу; б – стиснення

Зважаючи на висоту ($H \approx 150$ м), будівля має значну інерційність. При цьому переміщення її верхівки «відстають» від ґрунту, а сама будівля може деформуватись у вигляді «напівхвилі» (рис. 4, а). Максимальне відхилення верху зафіксоване, коли коливання ґрунтового масиву разом з фундаментом відбувалось у протифазі на 3,7 с. При цьому на рівні 25-го поверху переміщення не перевищило 3 мм, у той час як на рівні фундаменту та покриття відповідно склали -14,3 см та 24,2 см в напрямку

«+X» (рис 4, б). Максимальні горизонтальні відхилення верху будівлі склали 27 см у напрямку «Y».

Аналіз динамічної поведінки показав, що такі коливання носять резонансний характер. Оскільки максимальні значення переміщень фактично є граничними, було розглянуто рішення щодо застосування системи сейсмоізоляції. Найбільш раціональним методом зменшення сейсмічного впливу в цих умовах є використання пасивної сейсмоізоляції у вигляді окремих ГМО. Такий варіант сейсмоізоляції працює на «відстроювання» частоти – зміщення частоти коливання будівлі від резонансних частот до більш нейтральних частот коливання. ГМО було прийнято розмірами 0,5x0,5x0,301 фірми «ShantouVibroTechIndustrialandDevelopmentCoLtd (VIBRO)» як трансверсально-ізотропний матеріал, вертикальна жорсткість складає 1214 кН/мм, горизонтальна жорсткість прийнята 1141 кН/м.

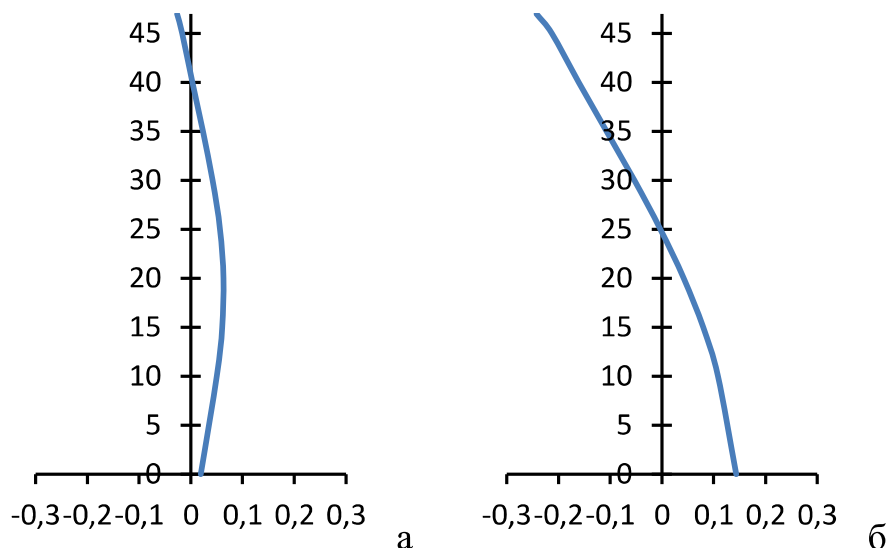


Рис. 4. Характер деформацій будівлі під дією сейсмічного навантаження:
а – на 5,3 с; б – на 3,7 с (максимальні відхилення верху будівлі)

Один із варіантів проектного рішення передбачав улаштування ГМО під усією будівлею між фундаментом плитою і вертикальними елементами підвального поверху. У результаті моделювання було отримано, що замість прогнозованого зменшення переміщень за рахунок використання сейсмоізоляції переміщення не зменшились, а дещо збільшились (рис. 5). Крім того, чітко відстежується тенденція до наростання амплітуди коливань, що відповідає резонансному режиму. Це може свідчити про те, що частота коливання перейшла до іншої ділянки резонансних частот.

Напружений стан несучих конструкцій також змінився – зросли напруження у центральному ядрі. У пілонах по периметру будівлі напруження збільшились в 1,5 – 2 рази.

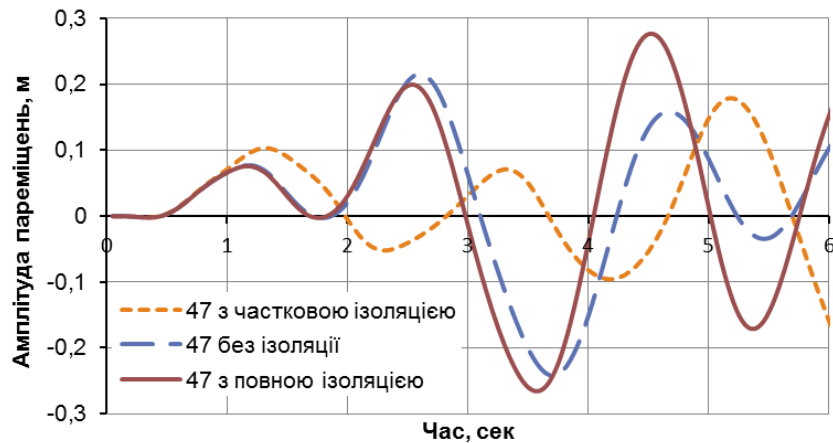


Рис. 5. Горизонтальні коливання верху 47-поверхової будівлі при різній схемі влаштування ГМО

З метою отримання максимального зниження переміщень і напружень при мінімальній кількості сейсмоізоляції було проведено варіаційні дослідження щодо пошуку розташування та кількості необхідних ГМО. Один із таких варіантів передбачав установлення сейсмоізоляторів лише під найбільш навантаженими пілонами, розташованими по контуру.

Ураховуючи значну висоту будівлі, з метою збереження стійкості будівлі опори влаштовували під частиною будівлі. На базі проведених попередніх досліджень було запропоновано варіант, де ГМО вводилися у рівні підвального поверху під пілони, що розташовані по периметру. Із розрахунку на вертикальне навантаження опори розташовувалися в кількості 6 шт. на один пілон.

В результаті було отримано, що в процесі сейсмічного навантаження амплітуда коливань будівлі істотно зменшилась, а період коливань збільшився (рис. 5). Максимальні переміщення зменшилися на 50% і склали 18 см на 5,2 с навантаження.

Висновки. Уведення конструкцій сейсмоізоляції має суттєвий вплив на розподіл НДС конструкцій у цілому, що необхідно враховувати на етапі проектування. Таким чином, з результатів виконаних досліджень можна зробити такі висновки:

1. При зведенні будівель і споруд у сейсмічно небезпечних районах використання систем пасивної сейсмоізоляції на базі ГМО дозволяє зменшити матеріалосміність та вартість конструкцій за рахунок зменшення сейсмічного впливу.

2. ГМО слід проектувати за результатами оцінювання взаємодії елементів системи «основа – фундамент – будівля» на базі прямих динамічних методів з використанням реальних параметрів середовищ.

3. Нераціонально підібрана сейсмоізоляція може призводити до збільшення амплітуди коливань будівлі за рахунок перелаштування будівлі в резонансний режим іншого діапазону.

4. Розташування ГМО в межах найбільш навантажених вертикальних конструкцій при дії сейсмічних навантажень дозволило зменшити амплітуду коливань на 50%.

Література

1. ДБН В.1.1-12:2006. Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Мінбуд України, 2006.
2. ДБН В.2.2-24:2009. Проектування висотних житлових і громадських будинків. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 25 с.
3. Мкртычев, О.В. Оценка сейсмостойкости здания с сейсмозащитой в виде резинометаллических опор // О.В. Мкртычев, А.А. Бунов. – Вестник МГСУ, 2013. – № 8. – С. 21 – 28.
4. Немчинов, Ю.И. Экономическая целесообразность научно-технического сопровождения объектов экспериментального строительства / Ю.И. Немчинов, А.К. Хавкин, Н.Г. Марьенков, Н.П. Ивлева, В.И. Дырда, Н.И. Лисица // Будівельні конструкції. зб. наук.праць. – К.: НДІБК, 2009. – Вип. 69. – С. 143–149.
5. ЛеТхиТхуэн. Исследование сейсмоизолируемого здания с применением заменяемых резинометаллических сейсмоизоляторов: дис. канд. техн. наук. – Москва. – 2010. – 135 с.
6. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Ляцеников, Н.Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
7. Гетун, Г.В. Дослідження впливу сейсмоізоляції на напружено-деформований стан висотної будівлі під дією сейсмічних навантажень / Г.В. Гетун, В.О. Сахаров, В.А. Мельник // Світ геотехніки. – 2013. – Вип. 2. – С. 25–35.
8. Чигринская, Л.С. Сейсмостойкость зданий и сооружений: учебное пособие. – Ангарская государственная техническая академия. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2009. – 107 с.

Надійшла до редакції 02.10.2013
© В.О. Сахаров, В.А. Мельник