

УДК 699.841 [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-01)

ІНЖЕНЕРНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПІДВІСНИХ БУДІВЕЛЬ НА СЕЙСМІЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

ENGINEERING METHOD OF CALCULATING SUSPENDED BUILDINGS FOR SEISMIC LOAD

Азізов Т.Н., д.т.н., професор, Майстренко О.Ф., к.т.н., доцент, Ель Амарі Амін, студент (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Azizov T.N., Doctor of Engineering, Professor, Maistrenko O.F., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, El Amari Amine, student (Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture, Odessa)

При використанні підвісних будівель у два, три і більше поверхів несуча рама не може бути розглянута, як система з однією масою. Таке спрощення призводить до помилок у визначенні динамічних зусиль. У статті за масу несучої рами прийнята її еквівалентна маса, яка визначена з умови рівності кінетичної енергії для систем з однією масою і багатьма масами. Показано вплив еквівалентної маси та жорсткості несучої рами на величину максимальних динамічних сил при сейсмічному навантаженні.

Most often, dynamic vibration dampers are used to dampen vibrations under seismic loads. In this case, the vibration damper is a pendulum suspended within the building. In previous works by the authors of this article, it was proposed to suspend the entire building on a supporting frame. A dynamic scheme for calculating such a structure is proposed. However, the entire mass of the supporting frame is concentrated at its top.

To construct the equations of motion for such a system, the Lagrange equation of the second kind was used. In the dynamic scheme, it is assumed that the base oscillates according to the sine law. This scheme was compared with the traditional cantilever scheme, when the building is considered as a cantilever, at the end of which the entire mass of the building is concentrated. At the same time, the dynamic forces in the suspended and cantilever designs are significantly different.

The supporting frame is considered as one mass. However, when using suspended structures of two, three or more floors, the supporting frame cannot be considered as a system with one mass. Such a simplification can lead to errors in determining dynamic forces. In this article, its equivalent mass is taken as the mass of the supporting frame. The equivalent mass is determined from the equality of kinetic energy for systems with one mass and many masses.

The article shows that the value of the equivalent mass has a significant impact on dynamic forces. Tables are provided to compare the maximum dynamic forces from base vibration depending on various factors. These reasons are: the mass of the building, the

mass of the supporting frame, and the rigidity of the frame. A graph of maximum dynamic force versus equivalent mass is presented. The construction of such graphs makes it possible to determine the structural design of the supporting frame to reduce dynamic forces.

The advantage of the engineering calculation method is that it is very simple and does not require the use of software packages. This method should be used for preliminary calculations. In preliminary variant calculations, the rigidity and mass of the supporting frame are determined from the point of view of the minimum dynamic force. After adopting a certain structural design of the load-bearing frame, its final calculation is performed using well-known programs for calculating seismic impacts.

Ключові слова: сейсмічне навантаження, динамічна схема, еквівалентна маса, рівняння Лагранжа.

Keywords: seismic load, dynamic scheme, equivalent mass, Lagrange equation.

Аналіз досліджень і постановка задачі

Динамічні навантаження на споруду характеризуються швидкою зміною в часі їх величини, напряму або місця застосування. Тому вони викликають коливання споруди, які необхідно враховувати за її розрахунку.

Колівальний характер мають як переміщення точок споруди, так і внутрішні зусилля і напруження у його елементах. Визначення очікуваних амплітуд переміщень, внутрішніх зусиль і напружень у споруді при її коливаннях під дією динамічного навантаження, тобто при вимушених коливаннях та порівняння їх із допустимими значеннями становлять основний зміст динамічного розрахунку споруди.

Існує багато робіт [3, 9, 10-12], в яких розглянуті питання пасивних динамічних гасників коливань (ДГК), які не потребують додаткових джерел енергії. Такі гасники прості в експлуатації, порівняно недорогі, а їх надійність доволі висока. ДГК представляє собою пристрій, у якому виникають сили інерції, які зменшують інтенсивність коливань конструкції, що захищається.

Частіше за все ДГК виконуються у вигляді маси, яка приєднується за допомогою пружного і демпфуючого елементів до будівлі. Маса гасників коливань представляє собою або тверде тіло, до якого можуть бути приєднані змінні вантажі, або пружну конструкцію, або контейнер, заповнений штучними вантажами, сипучим матеріалом і навіть рідиною.

Наприклад, всесвітньо відома башта Тайбей 101 у Тайвані висотою 509 м має гасник коливань у вигляді металевого маятника масою 660 т, який розташований між 87 та 91 поверхами споруди.

Сейсмічна ізоляція будівель виконується також із застосуванням в'язів, що вимикаються [3]. Як відомо, основна ідея систем із в'язями, що вимикаються, полягає в тому [3, 10], що елемент, що вимикається, прикріплюється жорстко до в'язевого елемента і до основної несучої

конструкції, забезпечуючи жорсткий зв'язок вищерозташованих поверхів і фундаменту до певних порогових величин сейсмічного навантаження. Після перевищення цих порогових величин елемент, що вимикається, руйнується.

У роботах [1, 6] запропонована схема будівлі, яка сама є маятником, тобто будівля підвішена на несучій рамі. Конструкція складається з несучої рами, на якій підвішений каркас будівлі на тросі.

Каркас будівлі розглядається (див. [1, 6, 7]) як зосереджена маса, підвішена на раму. Розрахункова динамічна схема подана у вигляді еліптичного маятника, в якому повзун прикріплений до нерухомої стінки пружиною, жорсткість якої підбирається з рівності горизонтальних переміщень консолі (несучої рами) і умовної пружини від дії одиначної горизонтальної сили.

Для побудови рівнянь руху такої системи в [6, 7] використано рівняння Лагранжа другого роду. Така схема порівнювалася з традиційною консольною схемою, коли будівля (одноповерхова) розглядається як консоль, на кінці якої зосереджена вся маса будівлі, а основа коливається по заданому закону, який приймається з відомих сейсмічних даних. При цьому показано, що динамічні сили в підвісній схемі і консольній суттєво відрізняються.

У цих роботах несуча рама розглядається як одна маса. Однак, при використанні підвісних будівель у два, три і більше поверхів несуча рама не може бути розглянута, як одномасова система. Таке спрощення може призвести до помилок у визначенні динамічних зусиль.

З огляду на вищесказане, **метою цієї статті** є розроблення інженерного методу розрахунку підвісних будівель з уточненням динамічної схеми несучої рами.

Викладення основного матеріалу

Розглянемо динамічну схему, яка наведена в [6, 7] (рис. 1).

Візок внизу на рис. 1 імітує основу, яка коливається навколо положення рівноваги O за законом $x = a \cdot \sin(p \cdot t)$, де a – амплітуда коливань; p – кругова частота коливань; t – час. Маса m_1 – це маса консолі (несучої рами), маса m_2 – маса підвісної будівлі.

На рис. 1 реальна схема, де консоль згинається, замінена спрощеною схемою, де жорсткий стрижень повертається навколо шарніра O в основі. Враховуючи, що вертикальне переміщення верху консолі (маси m_1) значно менше за його горизонтальне переміщення, така заміна цілком прийнятна. Невідомі узагальнені переміщення q_1 та q_2 означають: q_1 – горизонтальне переміщення умовної пружини жорсткістю k_x ; q_2 – кут повороту нитки підвісу відносно вертикалі.

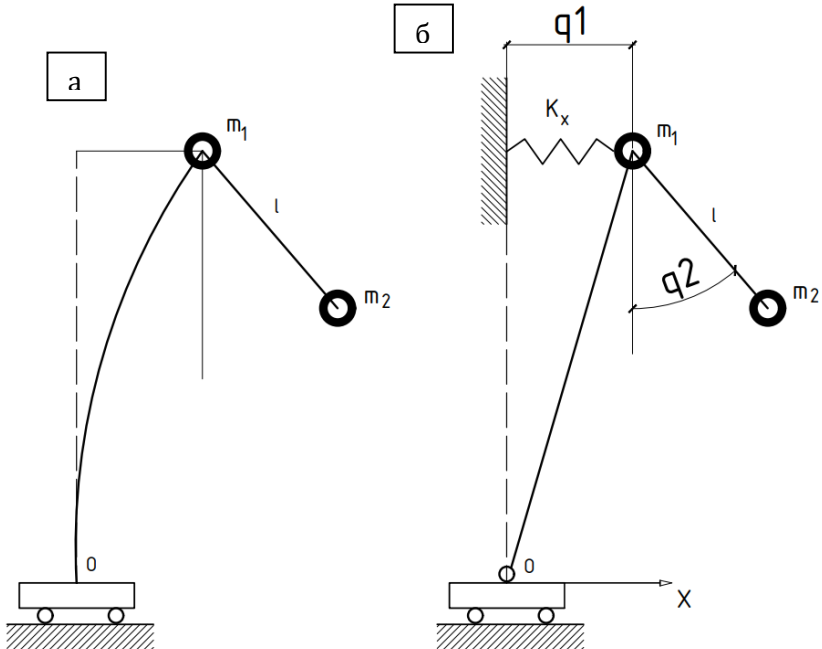


Рисунок 1 – Динамічна розрахункова схема консольно-підвісної системи:
 а) реальна схема; б) спрощена схема

У роботі [6] виведена система рівнянь руху для такої динамічної схеми:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2 l \ddot{\varphi} \cos \varphi - m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - (m_1 + m_2)p^2 a \sin pt + kx = 0 \\ \ddot{x} \cos \varphi + l \ddot{\varphi} - ap^2 \sin pt \cos \varphi + g \sin \varphi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння. Точка або дві точки над символом у виразі (1) позначають, відповідно, першу та другу похідні за часом t . Через x та φ в системі (1) позначені відповідно невідомі q_1 та q_2 на рис. 1.

Система диференціальних рівнянь Лагранжа досить легко вирішується [2, 4]. Вирішення цієї системи дасть нам закон руху системи. Знаючи закон руху, досить просто отримати сили, що діють на елементи системи, у тому числі на пружину, що в нашому випадку є горизонтальною складовою динамічної сили, яка діє на несучу раму.

Однак, як видно з рис. 1, несуча рама представлена як одна маса. Насправді несуча рама в будь-якому випадку буде мати горизонтальні

елементи, які з'єднують її колони, і тому сама рама повинна розглядатися як багатомасова система (рис. 2).

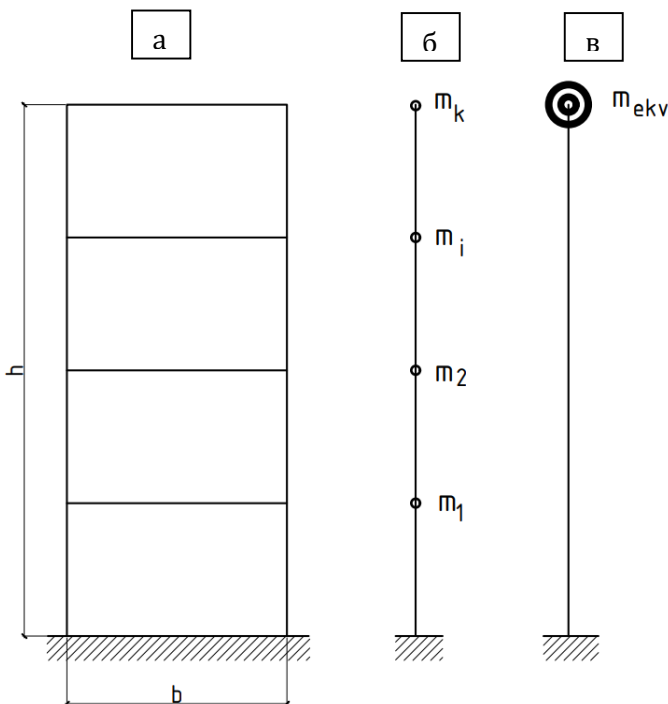


Рисунок 2 – Представлення несучої рами (а) у вигляді багатомасової (б) системи та у вигляді одномасової системи (в) з еквівалентною масою

Маси $m_1 \dots m_n$ на рис. 2.б складаються з мас ригелів на рівні умовного поверху рами і мас колон висотою в поперех.

У такій схемі, якщо додати підвісну масу, буде $n+1$ узагальнених координат, відповідно, і система диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду буде складатися з $n+1$ диференціальних рівнянь другого ступеня.

У роботах [6, 7] було сказано, що такий динамічний розрахунок виконується для попереднього аналізу конструкції, тому що для підбору жорсткості несучої рами, її маси слід провести велику кількість розрахунків. Якщо при варіантних розрахунках застосовувати повні розрахунки з використанням програмних комплексів, то це займе багато часу. Тому, після

таких спрощених розрахунків, коли вже попередньо підібрані конструкція несучої рами і перерізи її елементів, можна приступати до кінцевого аналізу конструкції з використанням програмних комплексів.

Використання багатомасової системи за рис. 2.б суттєво ускладнює рішення системи диференціальних рівнянь. А використання одномасової системи з масою на кінці консолі, яка дорівнює сумі всіх мас елементів рами, призводить до суттєвих помилок зі збільшенням висоти рами.

Тому для того, щоб, з одного боку не розглядати багатомасову систему, а з іншого боку, уточнити розрахунок, застосуємо використання еквівалентної маси. Для цього багатомасову систему замінимо системою з однією масою, яка розташована в кінці консолі (див. рис. 2.в).

Відомо [5], що для рішення складних динамічних задач використовують метод приведення мас. Приведена маса m_{ekv} – це така маса, з одним ступенем свободи, яка динамічно еквівалентна заданій системі з багатьма масами. Умову еквівалентності виберемо у формі рівності кінетичних енергій одномасової системи і заданої. Для цього розглянемо схему консольної балки (рис. 3).

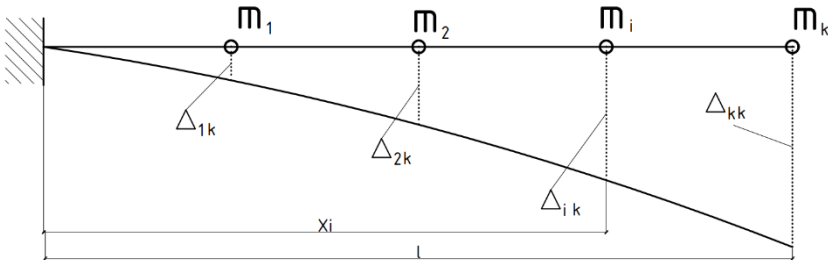


Рисунок 3 – Схема для визначення еквівалентної маси

У цьому випадку значення еквівалентної маси буде визначене з відомого виразу [5]:

$$m_{ekv} = \frac{1}{\delta_{kk}^2} \sum_{i=1}^n m_i \delta_{ik}^2 \quad (2)$$

де δ_{kk} – переміщення у точці k (в кінці консолі) від одиничної сили, яка діє саме в тій точці (див. рис. 3); δ_{ik} – переміщення в точці i від дії одиничної сили в кінці консолі. Величини δ_{kk} і δ_{ik} визначаються за відомими формулами будівельної механіки.

Слід зауважити, що заміна багатомасової системи на еквівалентну одномасову справедлива для першої форми коливань вказаної системи. Але,

зважаючи на те, що динамічні сили часто бувають максимальними саме за першої форми коливань, а також на те, що це попередні орієнтовні розрахунки, ми можемо вважати можливою таку заміну.

Таким чином, застосовуючи вже виведену систему рівнянь Лагранжа (2) для двохмасової системи, ми можемо розрахувати за схемою рис. 1 багатомасову систему. Розглянемо, на скільки впливає заміна величини маси m_1 , як суми всіх мас поверхів на еквівалентну масу. Для цього попередньо орієнтовно було розраховано декілька варіантів підвісної будівлі розмірами в плані 6х6 та 9х9 метрів з різною кількістю поверхів. Будівлі підвішені на несучі рами розмірами в плані відповідно 7х7 та 10х10 метрів. Для варіанта будівлі 6х6 метрів в якості елементів несучої рами прийнята сталеві труба 530х6 мм; для будівлі 9х9 метрів – сталеві труба 820х9 мм. Для визначення коефіцієнта жорсткості (див. рис. 1) для кожного варіанта були розраховані рами в програмі Lira-SAPR на дію одичної горизонтальної сили, яка прикладена до верхньої точки рами. В таблиці 1 всі розрахунки проведені для вихідних даних: амплітуда коливань поверхні землі $a=0.036$ м; кругова частота коливань $p=10$. Відомо, що кругова частота коливань визначається за формулою:

$$p = \sqrt{W/a} \quad (3)$$

де W – прискорення коливань. Відомо, що в середньому максимальне прискорення може бути прийнятним для 9-бального землетрусу $W=3.6$ м/с² [6, 7]. Тому, приймаючи різні значення для амплітуди a , можна визначити відповідну кругову частоту коливань за формулою (3).

Як можна бачити з таблиць 1 та 2, використання еквівалентної маси несучої рами замість повної суттєво впливає на величину максимальної динамічної сили. Тому в розрахунках для правильного визначення динамічної сили слід приймати еквівалентну масу рами при застосуванні динамічної схеми за рис. 1. При цьому можна обійтися розрахунком двохмасової системи замість багатомасової.

Значення еквівалентної маси m_{ekv} суттєво впливає на величину максимальної динамічної сили F_{max} . Як приклад, на рис. 4 наведений графік залежності динамічної сили F_{max} від еквівалентної маси (маси m_1 на рис. 1) для варіанта коефіцієнта жорсткості $K_x=2251.7$ кН/м (четвертий варіант в таблиці 1).

Як можна бачити з рис. 4, при певному значенні маси m_1 максимальна динамічна сила суттєво зростає. Тому в попередніх варіантних розрахунках слід ретельно визначити оптимальну масу несучої рами для запобігання великих значень динамічної сили. В цьому також полягає перевага запропонованого методу інженерного розрахунку підвісних будівель на дію сейсмічного навантаження.

Таблиця 1 – Значення максимальної динамічної сили по варіантах для будівлі 9x9 м

Коефіцієнт жорсткості рами K_x (Н/м)	Маса будівлі m_b (кг)	Кількість поверхів будівлі/рама	Маса рами m_r (кг)	Еквівалентна маса рами m_{ekv} (кг)	F_{max} (кН) при врахуванні маси:	
					для m_r	для m_{ekv}
2790179	405000	5/2	31681	17393	1113	262,3
3021148	486000	6/3	41761	17957	2353	292,7
2164502	567000	7/3	44641	19196	637,1	329
2251745	648000	8/4	54721	20575	632,2	349,2
1738224	729000	9/4	57601	21658	507,3	354,8
1768034	810000	10/5	67682	23350	488,4	378,4
1428163	891000	11/5	70562	24344	461,3	367,3
1430411	972000	12/6	80642	26289	428,7	397,8
1194315	1053000	13/6	83522	27228	420	386
1184273	1134000	14/7	93602	29204	409,3	398
1009999	1215000	15/7	96482	30102	418	377,5

Таблиця 2 – Значення максимальної динамічної сили по варіантах для будівлі 6x6 м

Коефіцієнт жорсткості рами K_x (Н/м)	Маса будівлі m_b (кг)	Кількість поверхів будівлі/рама	Маса рами m_r (кг)	Еквівалентна маса рами m_{ekv} (кг)	F_{max} (кН) при врахуванні маси:	
					для m_r	для m_{ekv}
3122073	180000	5/2	11785	6470	154,2	112,6
2423068	252000	7/3	16437	7068	245,6	138,7
1901864	324000	9/4	21089	7930	413,4	172,8
1510346	396000	11/5	25741	8881	894,5	190,3
1213151	468000	13/6	30393	9908	408,7	201,7
1164280	504000	14/7	33805	10547	366,6	210,3

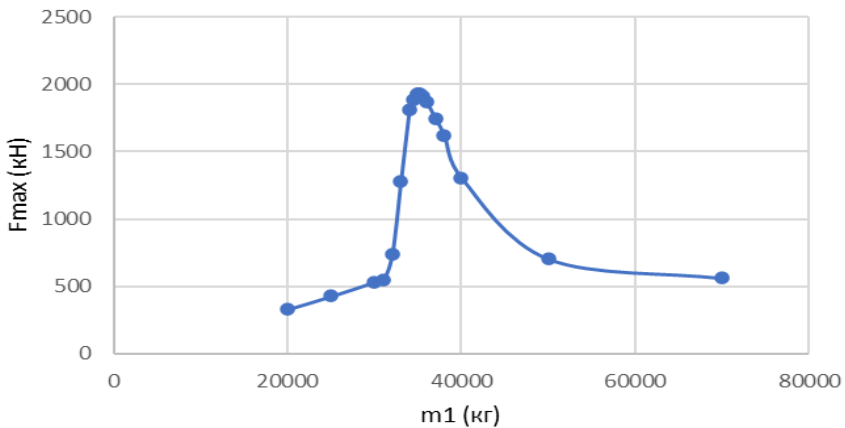


Рисунок 4 – Залежність динамічної сили F_{max} від маси m_1 в кінці консолі для значення коефіцієнта жорсткості $K_x=2251,7$ кН/м

Варіантні розрахунки при застосуванні програмних комплексів, коли треба зробити десятки або сотні попередніх розрахунків були б доволі складною задачею, яка б займала набагато більше часу, ніж розрахунок за інженерною методикою. Після визначення конструкції несучої рами кінцевий розрахунок слід проводити вже з застосуванням відомих програмних комплексів.

Запропонований інженерний метод розрахунку дозволяє також досліджувати вплив жорсткості елементів несучої рами на максимальну динамічну силу, кількість поверхів несучої рами, конструкції її елементів тощо. При цьому слід досліджувати вплив не тільки згинальної, а й крутильної жорсткості елементів несучої рами (при залізобетонному її варіанті), тому що неврахування впливу крутильної жорсткості може призвести до помилок [8].

Висновки та перспективи досліджень. Запропоновано інженерний метод розрахунку підвісних будівель при дії сейсмічного навантаження у вигляді заданого закону коливання основи. При цьому застосована раніше виведена авторами система рівнянь Лагранжа другого роду. На відміну від раніше запропонованого, замість повної маси несучої рами прийнята її еквівалентна маса, отримана з умови рівності кінетичної енергії багатомасової і одномасової систем.

У подальшому планується отримання залежності максимальних динамічних сил від жорсткості несучої рами, кількості її поверхів для різних значень амплітуди коливань основи та кругової частоти коливань.

References

1. Azizov T.N. Konstruktsiia seismichno stiikoi budivli / Patent na korysnu model №54247. Ukraina. Biull. №20. 25.10.2010.
2. Pavlovskiy M.A. Teoretychna mekhanika. Kyiv: Tekhnika, 2002.
3. Smyrnov V.Y. Prymenenye seismoizolyatsyy zdanyi y ystorycheskykh sooruzheniy / V.Y. Smyrnov, Ya.M. Aizenberh // Budivelni konstruktsii. Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. Vyp. 60. - K.: NDIBK, 2004. – S. 210-217.
4. Fedulina A.I. Teoretychna mekhanika. Kyiv: Vyshcha shkola, 2005.
5. Tsykhanovskiy V.K., Bieliatynskiy A.O., Talakh S.M. Budivelna mekhanika (spetskurs). Kyiv: NAU, 2014.
6. Azizov T.N. Dynamic design scheme of suspended seismically safe buildings / T.N. Azizov // Sciences of Europe. – 2017. – Vol 1, № 17. – S. 83-88.
7. Azizov T.N. CALCULATION OF DYNAMIC FORCES IN THE ELEMENTS OUTBOARD BUILDINGS// Sciences of Europe. – 2016. – Vol 4, № 9. – S. 69-73
8. Azizov T., Kochkarev D. Rigidity and Torsional Strength of Reinforced Concrete Bars with Normal Cracks // Sciences of Europe. – 2020. – Vol 1, № 47. – C. 27-36.
9. Chang C.C. Mass dampers and their optimal designs for building vibration control. Eng Struct n.d.:454–463. doi:10.1016/S0141-0296(97)00213-7.
10. Eisenberg Y. Constructions with disconnective constraints for seismic areas [Sooruzheniya s vyklyuchayushchimysya svyazyami dlya sejsmicheskikh rajonov]. 1976.
11. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples 2012:522.
12. Moon K.S. structural Design of Double Skin Facades as Damping Devices for Tall Buildings. Procedia Eng 2011:1351–1358. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.170.

Література

1. Азізов Т.Н. Конструкція сейсмічно стійкої будівлі / Патент на корисну модель №54247. Україна. Бюлл. №20. 25.10.2010.
2. Павловський М.А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002.
3. Смирнов В.И. Применение сейсмоизоляции зданий и исторических сооружений / В.И. Смирнов, Я.М. Айзенберг // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 60. - К.: НДІБК, 2004. – С. 210-217.
4. Федуліна А.І. Теоретична механіка. Київ: Вища школа, 2005.
5. Цихановський В.К., Белятинський А.О., Талах С.М. Будівельна механіка (спекурс). Київ: НАУ, 2014.
6. Azizov T.N. Dynamic design scheme of suspended seismically safe buildings / T.N. Azizov // Sciences of Europe. – 2017. – Vol 1, № 17. – S. 83-88.
7. Azizov T.N. CALCULATION OF DYNAMIC FORCES IN THE ELEMENTS OUTBOARD BUILDINGS// Sciences of Europe. – 2016. – Vol 4, № 9. – S. 69-73
8. Azizov T., Kochkarev D. Rigidity and Torsional Strength of Reinforced Concrete Bars with Normal Cracks // Sciences of Europe. – 2020. – Vol 1, № 47. – C. 27-36.
9. Chang C.C. Mass dampers and their optimal designs for building vibration control. Eng Struct n.d.:454–463. doi:10.1016/S0141-0296(97)00213-7.
10. Eisenberg Y. Constructions with disconnective constraints for seismic areas [Sooruzheniya s vyklyuchayushchimysya svyazyami dlya sejsmicheskikh rajonov]. 1976.
11. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples 2012:522.
12. Moon K.S. structural Design of Double Skin Facades as Damping Devices for Tall Buildings. Procedia Eng 2011:1351–1358. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.170.