



Doi: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v21i3.108>

УДК 624.042.7



БАРАБАШ М.С.

Д-р технічних наук, проф.,
Національний авіаційний
університет, директор,
ТОВ «ЛІРА САПР»,
м. Київ, Україна,
e-mail: bmari.lira@gmail.com,
тел.: +38 (095) 286-39-90,
ORCID: 0000-0003-2157-521X



ПІКУЛЬ А.В.

Асист., Київський національний
університет будівництва і
архітектури, інженер-програміст,
ТОВ «ЛІРА САПР»,
м. Київ, Україна,
e-mail: anatol.pikul@gmail.com,
тел.: +38(097)217-68-79,
ORCID: 0000-0002-1516-8266



ПИСАРЕВСЬКИЙ Б.Ю.

Інженер-проектувальник,
ТОВ «ЛІРА САПР»,
м. Київ, Україна,
e-mail: mikst1234@gmail.com,
тел.: +38 (044) 590 58 85,
ORCID: 0000-0002-1001-2879

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛЬНОГО ДЕМПФУВАННЯ

АНОТАЦІЯ

Для оцінки напружено-деформованого стану конструкції будівлі необхідно з високою точністю визначити зовнішні впливи та їх характер. До числа характерних прикладів зовнішніх впливів відносяться багато різновидів динамічного навантаження. Під час динамічних впливів на конструкцію завжди присутній фактор демпфування. Демпфування може забезпечуватися конструктивними пристроями – демпферами (гасителями коливань). Але навіть у разі, якщо демпфери не встановлюються, то фактор демпфування все одно присутній і обумовлюється матеріальним демпфуванням.

Стаття присвячена чисельному дослідженню впливу матеріального демпфування на несучі конструкції будівлі під час динамічних впливів. Запропоновано методологічний підхід щодо моделювання роботи конструкції під час динамічного впливу в часі та з врахуванням матеріального демпфування. Наведено рішення системи рівнянь руху на основі методу Ньюмарка в матричному вигляді. Описано фізичну суть матеріального демпфування. Запропоновано методологічний підхід щодо врахування різноматеріальності частин конструктивної системи.

Наведено приклад розрахунку конструкцій будівлі сумісно з ґрунтовою основою, з врахуванням сейсмічних впливів. Розрахунок виконаний у програмному комплексі «ЛІРА-САПР», в якому реалізовано рішення задачі на динамічний вплив в часі на основі методу Ньюмарка. Для сейсмічного захисту будівлі прийнято систему сейсмічної ізоляції з використанням гумово-металевих сейсмічних опор.

Виконано порівняльний аналіз результатів розрахунку з урахуванням і без урахування матеріального демпфування. Підтверджено значний вплив матеріального демпфування на напружено-деформований стан конструкції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: динамічний вплив, чисельне моделювання, комп'ютерне моделювання, матеріальне демпфування, ПК ЛІРА-САПР.

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ МАТЕРИАЛЬНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

БАРАБАШ М.С. Д-р технических наук, проф.,
Национальный авиационный университет, директор,
ООО «ЛИРА САПР»,



г. Киев, Украина,
e-mail: bmari.lira@gmail.com,
тел.: +38 (095) 286-39-90,
ORCID: 0000-0003-2157-521X

ПИКУЛЬ А.В. Ассистент, Киевский национальный университет строительства и архитектура, инженер, ООО «ЛИРА САПР»,

г. Киев, Украина,
e-mail: anatol.pikul@gmail.com,
тел.: +38(097)217-68-79,
ORCID: 0000-0002-1516-8266

ПИСАРЕВСКИЙ Б.Ю. Инженер-проектировщик ООО «ЛИРА САПР»,

г. Киев, Украина,
e-mail: mikst1234@gmail.com,
тел.: +38 (044) 590 58 85
ORCID: 0000-0002-1001-2879

АННОТАЦИЯ

Для оценки напряженно-деформированного состояния здания, необходимо с высокой точностью определить внешние воздействия и их характер. К числу характерных примеров внешних воздействий относятся много разновидностей динамической нагрузки. При динамических воздействиях на конструкцию всегда присутствует фактор демпфирования. Демпфирование может обеспечиваться конструктивными устройствами – демпферами (гасителями колебаний). Но даже в случае, если демпферы не устанавливаются, фактор демпфирования все равно присутствует и определяется материальным демпфированием.

Статья посвящена численному исследованию влияния материального демпфирования на несущие конструкции здания, при динамических воздействиях. Предложена методика моделирования работы конструкций, при динамическом воздействии, с учетом времени и при учете материального демпфирования. Приведено решение системы уравнений движения на основе метода Ньюмарка в матричном виде. Описан физический смысл материального демпфирования. Предложен методологический подход учета разноматериальности различных частей конструктивной системы.

Приведен пример расчета здания совместно с грунтовой основой при учете сейсмических воздействий. Расчет выполнен в программном комплексе (ПК) ЛИРА-САПР, в котором реализовано решение задачи на динамическое воздействие во времени на основе метода Ньюмарка. Для сейсмической защиты здания принята система сейсмической изоляции с использованием резино-металлических сейсмических опор.

Выполнен сравнительный анализ результатов расчета с учетом, и без учета, материального демпфирования. Подтверждено значительное влияние материального демпфирования на напряженно-деформированное состояние конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамическое воздействие, численное моделирование, компьютерное моде-

лирование, материальное демпфирование, ПК ЛИРА-САПР.

NUMERICAL-ANALYTICAL METHODOLOGICAL APPROACH TO THE MODELING OF MATERIAL DAMPING

BARABASH M.S. Dr., Prof., National Aviation University, the director, «LIRA SAPR» Ltd, Kyiv, Ukraine,

e-mail: bmari.lira@gmail.com,
tel.: +38 (095) 286-39-90,
ORCID: 0000-0003-2157-521X

PIKUL A.V. Ass., Kyiv National University of Construction and Architecture, software engineer, «LIRA SAPR» Ltd,

Kyiv, Ukraine,
e-mail: anatol.pikul@gmail.com,
tel.: +38(097)217-68-79,
ORCID: 0000-0002-1516-8266

PYSAREVSKIY B.Y. Engineer-designer, «LIRA SAPR» Ltd, Kyiv, Ukraine,

e-mail: mikst1234@gmail.com,
tel.: +38 (044) 590 58 85,
ORCID: 0000-0002-1001-2879

ABSTRACT

To assess the stress-strain state of the building, it is necessary with high accuracy to determine external influences and their nature. Among the typical examples of external influences are many varieties of dynamic loads. With dynamic effects on the structure there is always a damping factor. Structural devices - dampers (vibration dampers), can provide damping. But even if the dampers are not installed, the damping factor is still present and is determined by the material damping.

The paper deals with numerical research as to how material damping influences the load-bearing structures in dynamic loads. Certain technique is suggested for modelling behavior of structure in time history analysis with account of material damping. A set of motion equations is solved according to Newmark method as matrix. Physical meaning of material damping is described. The authors suggest the technique for account of different materials in parts of structure.

An example of the calculation of the building in conjunction with the soil base, given the seismic effects. The calculation was performed in the LIRA-SAPR software package, which implements the solution of the problem of dynamic effects in time based on the Newmark method. For seismic protection of the building, a seismic isolation system was adopted using rubber-metal seismic supports.

Analysis results are compared (with and without account of material damping). Significant influence of damping on the stress-strain state of the structure is confirmed.



KEY WORDS: dynamic load, numerical modelling, computer modelling, material damping, LIRA-SAPR

ВСТУП

Для повної та достовірної оцінки напружено-деформованого стану конструкцій будь-якої будівлі необхідно не тільки врахувати абсолютно всі фактори, що впливають на реальний об'єкт, такі, як його геометричні характеристики, фізико-механічні властивості матеріалу, формування початкових напружень і деформацій під час зведення будівлі, але і з високою точністю визначити зовнішні впливи та їх характер. До числа характерних прикладів зовнішніх впливів відносяться багато різновидів динамічного навантаження.

Під час динамічних впливів на конструкції будівлі завжди присутній фактор демпфування. Демпфування може забезпечуватися конструктивними пристроями – демпферами (гасителями коливань). Але навіть у разі, якщо демпфери не встановлюються, фактор демпфування все одно присутній і обумовлюється матеріальним демпфуванням. Безпосередньо конструкційний матеріал будівлі вже має властивість гасіння коливань, особливо, якщо конструктивні елементи досить масивні. Потужним гасителем коливань є ґрунтовий масив, на якому зводиться конструкція. Демпфуючі властивості визначаються коефіцієнтами відносного демпфірування ξ (частка критичного затухання коливань), які визначаються, як правило, за результатами випробувань [1]. Визначення коефіцієнта демпфування ґрунту є дуже складним завданням. Цей параметр буде залежати від рівня зсувних циклічних деформацій. Є ряд залежностей, наведених в працях зарубіжних авторів [2], де також надані рекомендації, відповідно до яких значення коефіцієнта демпфірування приймається від 0,02 до 0,05 для геологічних матеріалів і від 0,02 до 0,1 для конструкцій і споруд.

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

Методологічний підхід, що пропонується, полягає в наступному. Для аналізу напружено-деформованого стану конструкції будівлі на динамічні (сейсміка, вимушені коливання та ін.) впливи рекомендується проводити її динамічний розрахунок у часі. Це дозволяє задати навантаження, залежне від часу, за допомогою акселерограми і простежити напружено-деформований стан несучих конструкцій в кожен момент часу, а також проаналізувати рух всієї системи в часі.

Врахування матеріального демпфування при моделюванні роботи конструкції дозволяє отримати більш адекватну картину напружено-деформованого стану у порівнянні з таким же розрахунком без урахування демпфування.

Диференціальне рівняння руху конструкції

записується у вигляді:

$$[K]\{U\} + [C]\{\dot{U}\} + [M]\{\ddot{U}\} = \{P(t)\}, \quad (1)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості системи; $[C]$ – матриця демпфування; $[M]$ – матриця мас; $\{U\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{\ddot{U}\}$ – невідомі вектору вузлових переміщень, швидкостей, прискорень; $\{P(t)\}$ – вектор вузлових навантажень.

Для вирішення диференціальних рівнянь руху системи існує ряд прямих і непрямих методів інтегрування в часі, наприклад, метод Рунге-Кутта, метод Ньюмарка, метод Вільсона, метод центральних різниць та ін.

Так, рішення системи рівнянь руху на основі методу Ньюмарка [3, 4, 5] у матричному вигляді виглядає наступним чином:

$$[A] = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}[M] + \frac{1}{\gamma\Delta t}[C] + [K], \quad (2)$$

$$\{B\}_{i+1} = F(t_{i+1}) + [M]\left(\frac{1}{\alpha\Delta t^2}\{U\}_i + \frac{1}{\alpha\Delta t}\{\dot{U}\}_i + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)\{\ddot{U}\}_i\right) + [C]\left(\frac{1}{\gamma\Delta}\{\dot{U}\}_i + \left(\frac{1}{\gamma} - 1\right)\{\ddot{U}\}_i + \left(\frac{1}{2\gamma} - 1\right)\Delta t\{\ddot{\ddot{U}}\}_i\right), \quad (3)$$

$$[A]\{U\}_{i+1} = \{B\}_{i+1} \quad (4)$$

де $[A]$ – ефективна матриця жорсткості, $\{B\}$ – ефективний вектор навантажень, а α , β , γ – коефіцієнти інтегрування.

Швидкості і прискорення вузлів системи обчислюються за допомогою виразів:

$$\{\dot{U}\}_{i+1} = \frac{1}{\gamma\Delta t}(\{U\}_{i+1} - \{U\}_i) + \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)\{\dot{U}\}_i + \left(1 - \frac{1}{2\gamma}\right)\Delta t\{\ddot{U}\}_i, \quad (5)$$

$$\{\ddot{U}\}_{i+1} = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}(\{U\}_{i+1} - \{U\}_i) - \frac{1}{\alpha\Delta t}\{\dot{U}\}_i + \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right)\{\ddot{U}\}_i. \quad (6)$$

Різні матеріали мають різні властивості і дають різний внесок у гасіння коливань. Фізична суть матеріального демпфування обумовлюється переходом механічної енергії в теплову, що відбувається за рахунок мікропластичності, а не в'язкості, як в рідинах і газах.

Для врахування різноматеріальності частин конструкції будівлі для кожного елемента можна задати свої коефіцієнти Релея, і таким чином сформувати комбіновану матрицю дисипації:

$$[C] = \beta[K] + \alpha[M].$$

Для визначення коефіцієнтів Релея необхідно провести модальний аналіз конструкції будівлі (або її частини) та, задавши емпіричні коефіцієнти демпфування для матеріалу, при двох найменших власних частотах, визначити коефіцієнти за фор-



мулами:

$$\alpha = \frac{2\xi_i\xi_j\omega_i\omega_j}{\xi_i\omega_i + \xi_j\omega_j}, \beta = \frac{2\xi_i\xi_j}{\xi_i\omega_i + \xi_j\omega_j}$$

МАТЕРІАЛЬНЕ ДЕМПФУВАННЯ В ПК ЛІРА-САПР

Розглянемо приклад розрахунку будівлі спільно з ґрунтовою основою з врахуванням сейсмічних впливів у плоскій постановці (рис. 1). В якості

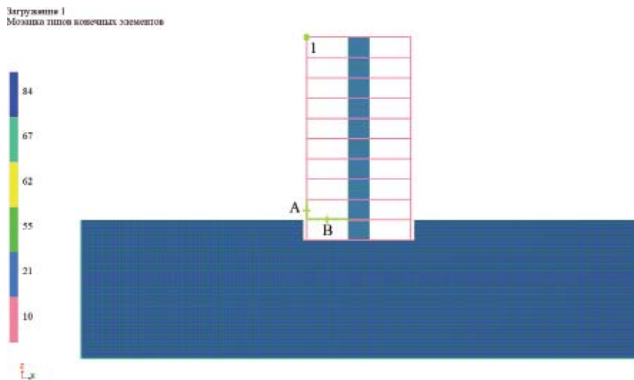


Рис. 1. Розрахункова схема тестової задачі.

тестової задачі було вирішено змоделювати конструктивну систему «наземна частина – фундамент – ґрунтова основа».

Як відзначалося в [4-6], конструктивна безпека будівель включає в себе просторове представлення системи «наземна частина – фундамент – ґрунтова основа». При цьому система повинна бути сконструйована таким чином, щоб мати здатність перерозподілу зусиль під час руйнування окремих конструктивних елементів і виведення з роботи деяких в'язей, тобто щоб локальні пошкодження не викликали глобального обвалення. В'язі даної системи з основою, тобто джерела сейсмічних впливів, не повинні передавати негативні впливи від основи на фундамент будівлі, або, принаймні, повинні їх зменшувати.

Для наочності впливу демпфування виконаємо порівняння амплітудних значень переміщень, швидкостей і прискорень останнього поверху (вузол 1), а також поздовжню силу в колоні А та згинальний момент в балці В. Розрахунок виконаний в програмному комплексі ЛІРА-САПР [6, 7], в якому реалізовано рішення задачі на динамічний вплив в часі на основі методу Ньюмарка [7].

Для сейсмічного захисту будівлі прийня-

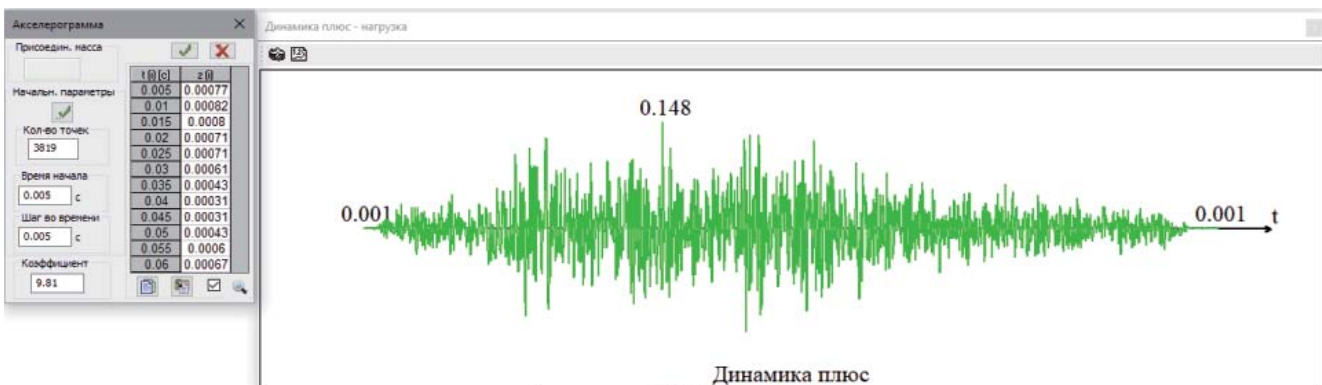


Рис. 2. Акселерограма коливань поверхні ґрунту.

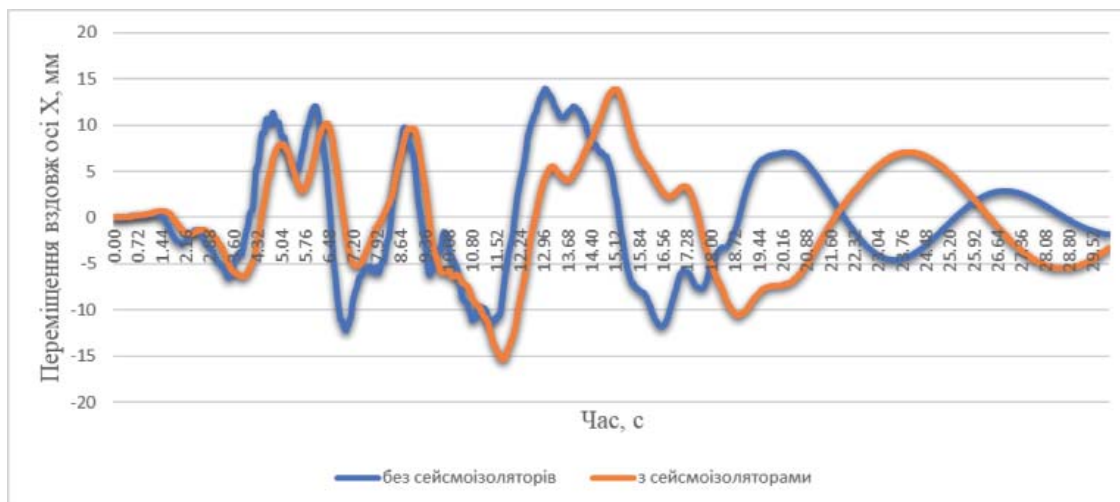


Рис. 3. Порівняння переміщень вздовж осі X у вузлі 1.

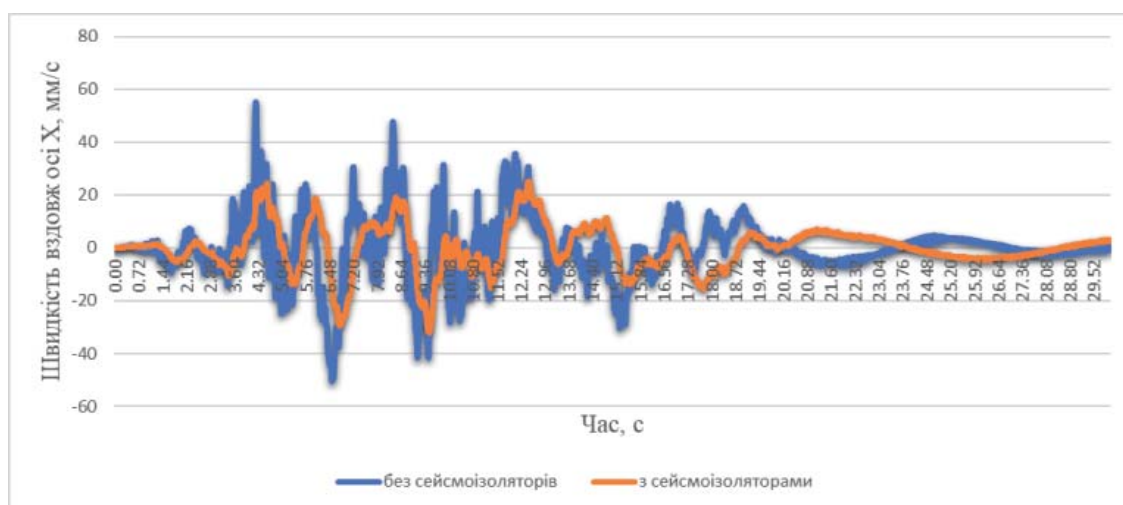


Рис. 4. Порівняння швидкостей вздовж осі X у вузлі 1.

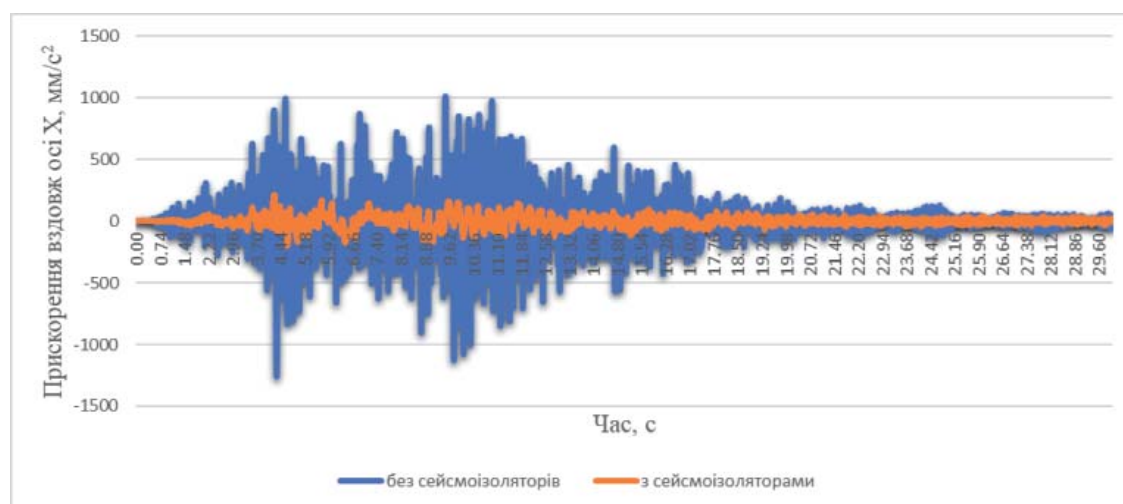


Рис. 5. Порівняння прискорень вздовж осі X у вузлі 1.

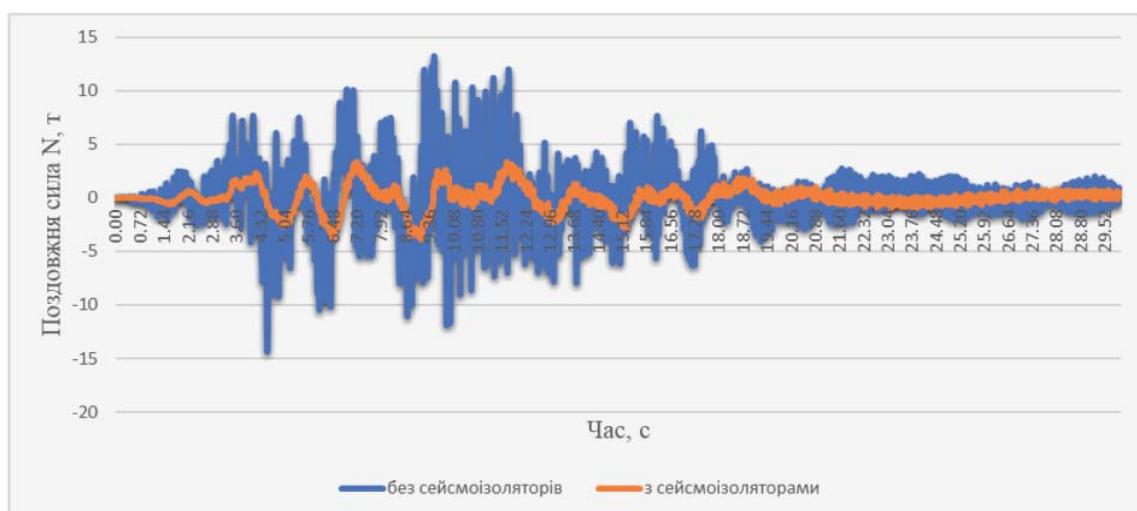


Рис. 6. Порівняння поздовжньої сили N в елементі А.

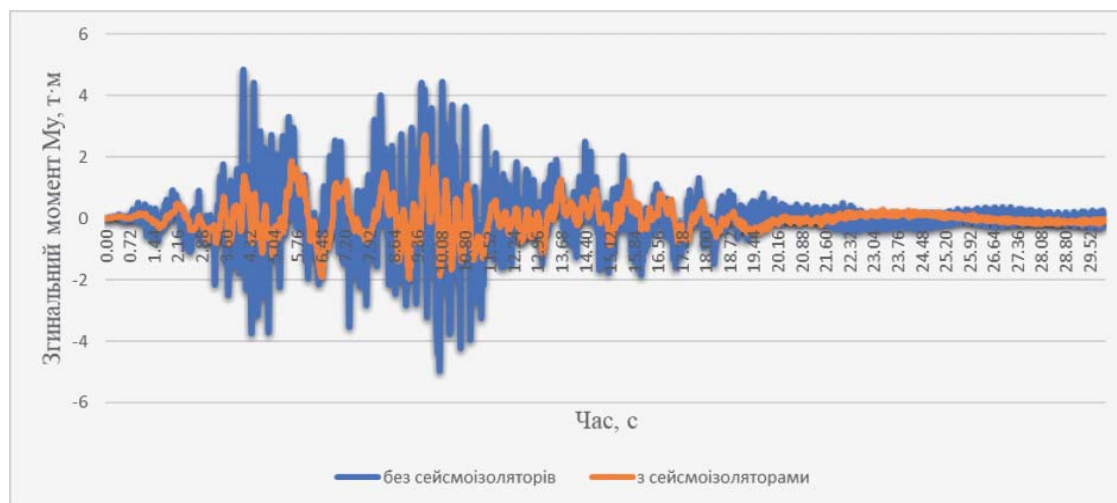


Рис. 7. Порівняння згинального моменту M_u в елементі В.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз результатів розрахунку

Без сейсмоізоляторів			З сейсмоізоляторами		
Максимальне переміщення вздовж осі X, мм (вузол І)	Максимальна поздовжня сила N, т (елемент А)	Максимальний згинальний момент M_u , т.м (елемент В)	Максимальне переміщення вздовж осі X, мм (вузол І)	Максимальна поздовжня сила N, т (елемент А)	Максимальний згинальний момент M_u , т (елемент В)
13.84	13.20	4.83	13.94	3.41	2.71

то систему сейсмічної ізоляції з використанням гумово-металевих сейсмічних опор, що встановлюються на колони та стіни підземного поверху під плити перекриття. Таким чином, конструкції будівлі умовно розділяються на неізольовані конструкції підземної частини та сейсмо-ізольовані конструкції надземної частини.

Характеристики жорсткості сейсмічних опор (SI-S 450/54) прийняті на основі каталогу фірми-виробника FIP INDUSTRIALE.

В розрахунковій схемі будівлі сейсмо-опори змодельовано з використанням скінчених елементів (СЕ) типу 55 – пружного зв'язку між вузлами (у вертикальному напрямку) і СЕ 62 двовузловий скінчений елемент, призначений для моделювання роботи лінійного елемента в'язкого демпфера.

У табл. 1 наведено результати розрахунку з урахуванням і без урахування демпфування.

Аналіз результатів свідчить про значний вплив сейсмоізоляції на напружено-деформаційні стани (НДС) конструкції. Поздовжня сила у колоні знизилась у 3,87 рази, а також згинальний момент в

балці у 1,78 рази. В цьому випадку спостерігається зменшення швидкості у 1,71 рази та прискорення у 5 разів.

ВИСНОВКИ

Розвиток і застосування методів конструктивної сейсмобезпеки диктується сучасною об'єктивною необхідністю і пояснюється вимогами підвищення безпеки (живучості) споруд, з

метою обійти складності моделювання сейсмічних впливів і недосконалості теорії і методів розрахунку. Розробка нових методологічних підходів до чисельного моделювання з урахуванням перспективних розробок методів розрахунку на динамічні дії, таких як врахування нелінійних властивостей матеріалів, врахування матеріального демпфування дозволяє коректно провести чисельні експерименти і розробити ряд конструктивних заходів щодо сейсмобезпеки будівель і споруд.

Отримані результати чисельних розрахунків дозволяють зробити висновок, що сейсмічні хвилі, що розповсюджуються у ґрунтовому середовищі поступово затухають, навіть без застосування спеціальних демпфуючих пристроїв. Застосування в розрахунках на динамічні впливи розроблених спеціальних скінчених елементів дасть змогу врахувати демпфуючі властивості ґрунту. Аналіз отриманих параметрів НДС показує, що постійно діючі динамічні впливи можуть призвести до осідань фундаменту, крену споруди та іншим деформаціям, що порушують конструктивні та



експлуатаційні параметри будівлі та підвищують безпеку її руйнування.

Розроблена модель дозволяє отримати результати, що відповідають реальним значенням параметрів від впливу динамічних навантажень. Застосування таких моделей дасть змогу на стадії проектування нового будівництва або при реконструкції існуючих будівель враховувати впливи динамічних навантажень різного характеру.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Сорочан Е. А. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Ред. Е. А. Сорочана, Ю. Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 479 с
2. Pakbaz M. S. Numerical Prediction of Subway Induced Vibrations: Case Study in Iran-Ahwas City / M. S. Pakbaz, R. Mehdizadeh, M. Vafaian, K. Bagherinia // *Jornal of Applied Sciences*. – 2009. – № 9 (11). – P. 2001-2015.
3. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Пер. с англ. А.С. Алексеева и др.; Под ред. А.Ф.Смирнова. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
4. Назаров Ю. П. Расчетные модели сейсмических воздействий / Назаров. Ю. П. – М.: Наука, 2012. – 414 с.
5. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов стр-ва: Монография. – Киев: Сталь, 2014. – 301 с.
6. Городецкий А.С., Пикуль А.В., Писаревский Б.Ю. Моделирование работы грунтовых массивов на динамическое воздействие // *International J. for Computational Civil and Structural Engineering*, Vol. 17, Iss. 3, 2017. – С. 34-41.
7. Барабаш М. С. Пикуль А.В., Писаревский Б.Ю. Моделирование демпфирования при расчете конструкций на динамические воздействия в программном комплексе ЛИРА-САПР // *Стр-во, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Днепр: ПГАСА, 2017. – Вып. 100. – С. 42-48.*

REFERENCES

1. Sorochan E.A.(1985) Bases, foundations and underground structures. Sorochan E.A. and Trofimenkov Yu.G. (Ed) Moscow: Stroyizdat [in Russian]
2. Pakbaz M. S.(2009) Numerical Prediction of Subway Induced Vibrations: Case Study

in Iran-Ahwas City. M. S. Pakbaz, R. Mehdizadeh, M. Vafaian, K. Bagherinia // *Jornal of Applied Sciences*, 9 (11), 2001-2015. [in English]

3. Bate K., Wilson E. (1982) Numerical methods of analysis and finite elements method. Translated from English by A. S. Alekseev et.al. A.F.Smirnov (Ed). Moskow: Stroyizdat [in Russian]
4. Nazarov Yu.P. (2012) Calculation models of seismic actions. Nazarov Yu.P. (Ed). Moskow: Nauka. [in Russian]
5. Barabash M.S. (2014) Computer modeling of life cycle of structures. Monography. Kyiv: Stal. [in Russian]
6. Barabash M.S. , Pikul A.V., Pisarevskiy B.Yu. (2017) Damping modeling in calculating dynamic effects of structures in the SW LIRA-SAPR. Construction, material science, mechanic engineering, 100, 42-48. Dnepr: PGASA [in Russian]
7. Gorodetskiy A.S., Pikul A.V., Pisarevskiy B.Yu. (2017) Behavior modeling of soil masses in dynamic effect. *International J. for Computational Civil and Structural Engineering*, Vol. 17, Iss. 3, 34-41. [in Russian]

Стаття надійшла до редакції 06.05.2019 року.