

**АНАЛІЗ СИСТЕМИ КОЕФІЦІЄНТІВ, ЩО
ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО
СЕЙСМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ В НОРМАТИВНИХ
ДОКУМЕНТАХ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ**

**ANALYSIS OF THE SYSTEM OF COEFFICIENTS USED TO
DETERMINE THE CALCULATED SEISMIC LOAD IN REGULATORY
DESIGN DOCUMENTS**

**Бондаренко О.В., к.т.н., доцент, Майстренко О.Ф., к.т.н., доцент
(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)**

**Bondarenko O.V., Ph.D., Associate Professor, Maistrenko O.F., Ph.D.,
Associate Professor (Odesa State Academy Civil Engineering and
Architecture, Odesa)**

Для сучасного етапу розвитку теорії сейсмостійкості характерна загальна тенденція уточнення постановки розрахункового завдання, отже, був проведений аналіз значень коефіцієнтів для визначення розрахункового сейсмічного навантаження, що застосовувались у нормативних документах різних років видання, оскільки на практиці виникає необхідність використання відповідних інструментів розрахунку та систематизації таких коефіцієнтів.

The current stage of development of the theory of seismic stability is characterized by a general tendency to refine the statement of the calculation problem. This implies a more complete and detailed description of the seismic effect and requires the use of more rigorous calculation methods. It is necessary to study the problem of the interaction of the structure with the soil in determining the influence of the nature of the soil and the conditions for laying structures in them on the dynamic characteristics. An important direction is the further improvement of the design schemes of buildings and structures that most fully reflect their physical properties, spatial functioning, torsion, and wave processes in soils and structures.

It is relevant to develop methods for calculating buildings and structures, taking into account the elastic-plastic properties of the material, which is important for assessing the actual bearing capacity of structures under seismic effects.

In the general case, when normalizing inertial seismic loads, the following coefficients can be used:

- K_B – coefficient of variability of maximum accelerations, determined for a given construction site, regardless of the properties of the building;
- K_O – coefficient of responsibility, which depends only on the class of responsibility of the building;
- $K_{\text{соч}}$ – coefficient of a combination of seismic and non-seismic loads;

- K_x – constructive coefficient, taking into account the features of the system, not reflected in the design scheme;
- K_1 – coefficient of limit states;
- K_ψ – coefficient taking into account energy absorption;
- K_L – coefficient of elongation, taking into account the difference between the average (over the area of the base) and maximum accelerations.

The above system of design coefficients, with the correct designation of the design scheme of the building, makes it possible to accurately assess its seismic resistance. However, in practice, due to the traditionally established calculation and design standards, the system of design coefficients turns out to be more confusing: some coefficients are missing in the calculation formulas, and the existing standard coefficients are changed taking into account the corresponding functions.

The article analyzes the system of coefficients used to determine the design seismic load in regulatory documents for design. It is known that the history of the development of domestic design standards in the section for determining seismic forces clearly shows some inconsistency in the application of the above coefficients, as well as the instability of their numerical values.

The performed analysis of seismic coefficients showed that the existing regulatory system of calculated coefficients is sufficiently balanced, but needs improvement, since the results of calculations do not always correspond to the data of damage to buildings during earthquakes. This must be taken into account when clarifying certain details of the calculation of engineering structures.

Ключові слова: сейсмостійкість споруд, сейсмічне навантаження, розрахункові коефіцієнти, нормативні документи.

Keywords: seismic resistance of buildings, seismic load, calculation coefficients, regulatory documents.

Вступ. Спектральна методика оцінки сейсмостійкості споруд є основою в нормативних документах багатьох країн. Така методика базується на спостереженнях та досвіді минулих землетрусів і забезпечує необхідну сейсмостійкість споруд шляхом застосування при розрахунку емпіричної системи розрахункових коефіцієнтів. Це дозволяє по-різному оцінювати як результати, так і вихідні передумови нормативної методики.

Сейсмічні спостереження у своїй найпростішій формі велися з найдавніших часів. Одночасно з вивченням землетрусів виникали і спроби захищати від них будівлі та споруди. Аналіз розміщених у сейсмічних районах пам'яток стародавньої архітектури показує, що будівельники враховували тоді небезпеку землетрусів та передбачали спеціальні заходи компонування та захисту конструкцій. Але антисейсмічні заходи давнини базувалися на емпіризмі та інженерній інтуїції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перша спроба створити теоретичні методи розрахунку та проектування сейсмостійких будівель і

споруд була зроблена в 1900 японським вченим Фусакачі Оморі [1]. На основі досліджень Ф. Оморі розробив методику визначення сейсмічних сил, що отримала назву статичної теорії сейсмостійкості. Ця теорія не враховувала деформації споруди, її коливання зводилися лише до переносного руху всіх точок споруди разом із основою, а сейсмічні сили визначалися за формулою:

$$S = K_c \cdot Q \quad (1)$$

де $K_c = w_0/g$ та w_0 – максимальне сейсмічне прискорення основи. Значення статичної теорії у розвитку теорії сейсмостійкості полягало у тому, що в її рамках вперше вдалося отримати кількісну, хоч і наближену, оцінку сейсмічних сил, тобто звести проектування сейсмостійких споруд до звичайного інженерного завдання.

Першу спробу створити динамічну теорію було зроблено японським вченим Н. Мононобе у 1920 році [2]. Він прийняв, що основа споруди здійснює коливання за гармонійним законом і розглянув вимушені коливання споруди у вигляді системи з одним ступенем свободи. Н. Мононобе була отримана формула для визначення сейсмічної сили:

$$S = K_c \cdot \beta \cdot Q \quad (2)$$

Вираз (2) відрізняється від формули Ф. Оморі (1) наявністю додаткового коефіцієнта динамічності β , який для системи з одним ступенем свободи має вигляд:

$$\beta = 1/(1 - T^2/T_0^2) \quad (3)$$

де T – період власних коливань споруди; T_0 – період коливань основи під час землетрусу.

Недоліком досліджень Н. Мононобе було ігнорування початкової фази сейсмічних коливань. У загальній формі основи динамічного методу розрахунку будівель та споруд на сейсмостійкість було закладено К.С. Заврієвим у 1927 році [4]. Він запропонував розглядати сейсмічні коливання ґрунту як гармонійні незатухаючі, що починаються за законом косинуса. Сейсмічна сила обчислювалася аналогічно Н. Мононобе, але коефіцієнт динамічності β визначався за формулою:

$$\beta = (\cos \omega_0 t - \cos \omega t)/(1 - \omega_0^2/\omega^2) \quad (4)$$

Роботи Н. Мононобе та К.С. Заврієва відіграли велику роль у становленні динамічного підходу до розрахунку споруд.

У 1934 р. американський вчений М. Біо розробив метод оцінки сейсмічних сил із використанням інструментальних записів коливань ґрунту під час землетрусу [3]. Роботи М. Біо стали дуже важливим етапом у розвитку теорії сейсмостійкості, оскільки у них вперше були використані інструментальні записи землетрусів.

Цілі і завдання. Виконати аналіз системи коефіцієнтів, що використовуються для визначення розрахункового сейсмічного

навантаження в нормативних документах для проектування.

Основна частина. Для сучасного етапу розвитку теорії сейсмостійкості характерна загальна тенденція уточнення постановки розрахункового завдання. Це передбачає повніший та докладніший опис сейсмічного впливу та вимагає залучення більш строгих методів розрахунку. Необхідне вивчення проблеми взаємодії споруди з ґрунтом при уточненні впливу характеру ґрунтів та умов закладення в них споруд на динамічні характеристики. Важливим напрямом є подальше вдосконалення розрахункових схем будівель і споруд, що найбільш повно відображають їх фізичні властивості, просторову роботу, кручення, хвильові процеси в ґрунтах та спорудах.

Актуальною є розробка методів розрахунку будівель та споруд з урахуванням пружнопластичних властивостей матеріалу, що є важливим для оцінки дійсної несучої здатності конструкцій при сейсмічних впливах.

У загальному випадку при нормуванні інерційних сейсмічних навантажень можуть бути використані такі коефіцієнти:

- K_B – коефіцієнт варіабельності максимальних прискорень, що визначається для даного майданчика будівництва незалежно від властивостей споруди;
- K_0 – коефіцієнт відповідальності, що залежить тільки від ступеня відповідальності споруди;
- $K_{соч}$ – коефіцієнт поєднань сейсмічного і несейсмічного навантажень;
- K_K – конструктивний коефіцієнт, що враховує специфічні особливості системи, що невідображені в розрахунковій схемі;
- K_1 – коефіцієнт граничних станів;
- K_ψ – коефіцієнт, що враховує поглинання енергії;
- K_L – коефіцієнт протяжності, що враховує відмінність середніх (за площею фундаменту) прискорень від максимальних.

Наведена система розрахункових коефіцієнтів при коректному призначенні розрахункової схеми споруди дозволяє досить точно оцінити її сейсмостійкість. Однак на практиці, в силу традиційно сформованих нормативів розрахунку та проектування, система розрахункових коефіцієнтів виявляється більш заплутаною: частина коефіцієнтів відсутня в розрахункових формулах, а для обліку відповідних особливостей змінені наявні нормативні коефіцієнти.

Історія розвитку вітчизняних норм проектування у розділі визначення сейсмічних сил наочно показує деяку непослідовність застосування вище наведених коефіцієнтів та й нестабільність їх чисельних значень.

ПСП 101-51 [5]. Розрахункова величина сейсмічних сил інерції визначається за такою формулою:

$$S = \alpha \cdot K_c \cdot P \quad (5)$$

СН 8-57 [6]. Розрахункове сейсмічне навантаження у будь-якій точці, де, згідно з розрахунковою схемою споруди, зосереджена маса вагою Q_K , визначається за формулою:

$$S_k = Q_k \cdot k_c \cdot \beta \cdot \eta_k \quad (6)$$

СНиП II-A.12-62 [7]. Максимальне значення розрахункового сейсмічного навантаження, що відповідає якомусь одному i -му тону вільних коливань, визначається за формулою:

$$S_{ik} = Q_k \cdot k_c \cdot \beta_i \cdot \eta_{ik} \quad (7)$$

СНиП II-A.12-69 [8]. Розрахункове значення сейсмічного навантаження S_{ik} , що відповідає i -му тону власних коливань споруди, визначається за формулою:

$$S_{ik} = Q_k \cdot K_c \cdot \beta_i \cdot \eta_{ik} \quad (8)$$

де k_c – сейсмічний коефіцієнт;

α – коефіцієнт, що залежить від динамічних характеристик будівлі та споруди або їх елементів, а також від характеру сейсмічних впливів.

Q_K – навантаження, що викликає інерційну силу: вага елементів будівлі або споруди, корисне навантаження на перекриття, власна вага кранів, навантаження від снігу тощо;

β – коефіцієнт динамічності, що залежить від періоду вільних коливань споруди;

η_{ik} – коефіцієнт, який залежить від форми деформації споруди при її вільних коливаннях i -ї формі та від місця розташування навантаження Q_K ; $K_{ст}$ – коефіцієнт, що враховує поверховість (приймається як додатковий, безпосередньо у формулі не застосовується).

СНиП II-7-81 [9]. Розрахункове сейсмічне навантаження S_{ik} у вибраному напрямку, прикладене до точки k і відповідно i -му тону власних коливань споруд чи будівель (окрім гідротехнічних споруд), обчислюється за формулою:

$$S_{ik} = K_1 \cdot K_2 \cdot S_{0ik} \quad (9)$$

де S_{0ik} – значення сейсмічного навантаження для i -го тону власних коливань споруди або будівлі, що визначається припущенням пружного деформування конструкцій за формулою:

$$S_{0ik} = Q_k \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_{\psi} \cdot \eta_{ik} \quad (10)$$

СНиП II-7-81* [10]. Розрахункове сейсмічне навантаження S_{ik} у вибраному напрямку, прикладено до точки k і відповідно i -му тону власних коливань споруд або будівель (окрім гідротехнічних споруд), визначається за формулою:

$$S_{ik} = K_1 \cdot S_{0ik} \quad (11)$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує допустимі пошкодження будівель й споруд;

K_2 – коефіцієнт, що враховує конструктивні рішення будівель та споруд;
 Q_k – вага будівлі або споруди, віднесена до точки k , яка обчислюється з урахуванням розрахункових навантажень на конструкції;

A – коефіцієнт, значення якого треба приймати рівними 0,1; 0,2; 0,4 відповідно для розрахункової сейсмічності 7, 8, 9 балів;

β_i – коефіцієнт динамічності, що відповідає i -му тону власних коливань будівель чи споруд;

K_ψ – коефіцієнт, що враховує вплив знижених дисипативних властивостей деяких матеріалів;

η_{ik} – коефіцієнт, який залежить від форми деформації споруди або будівлі при його власних коливаннях по i -му тону, та від місця розташування навантаження.

ДБН В.1.1-12:2006 [11]. Розрахункове значення горизонтального сейсмічного навантаження S_{ik} , прикладеного до точки k , яке відповідає i -тій формі власних коливань будівлі чи споруди, необхідно визначати за формулою:

$$S_{ki} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot S_{0ki} \quad (12)$$

де k_1 – коефіцієнт, який враховує непружні деформації та локальні пошкодження елементів будівлі;

k_2 – коефіцієнт відповідальності споруди;

k_3 – коефіцієнт, що враховує поверховість будівлі, що складає більше 5 поверхів, та може бути визначений за формулою: $k_3 = 1 + 0,06 \cdot (n - 5)$, де n – кількість поверхів в будівлі. Максимальне значення k_3 слід приймати не більше 2,0 (включаючи рамні, рамно-в'язеві та в'язеві системи), а для стінових та каркасно-стінових конструктивних систем слід приймати не більше 1,8;

S_{0ki} – горизонтальне сейсмічне навантаження за i -тою формою власних коливань споруди або будівлі, що має визначатися у припущенні пружного деформування конструкцій за формулою:

$$S_{0ki} = Q_k \cdot a_0 \cdot k_{гр} \cdot \beta_i \cdot \eta_{ik} \quad (13)$$

де Q_k – навантаження, яке відповідає масі, прийнятій у якості зосередженої у точці k та визначається з урахуванням коефіцієнтів;

a_0 – відносне прискорення ґрунту, це значення приймається рівним 0,05; 0,1; 0,2 і 0,4 відповідно для районів сейсмічністю 6, 7, 8 і 9 балів;

$k_{гр}$ – коефіцієнт, що враховує нелінійне деформування ґрунтів, він вводиться, якщо визначення сейсмічності майданчика проведено на базі матеріалів інженерно-геологічних випробувань;

β_i – спектральний коефіцієнт динамічності, який відповідає i -тій формі власних коливань споруди чи будівлі;

η_{ik} – коефіцієнт, що залежить від форми власних коливань будівлі чи споруди, а також від місця прикладання навантаження.

ДБН В.1.1-12:2014 [12]. Розрахункове значення горизонтального сейсмічного навантаження S_{ki} визначається за формулою (12), але тут k_3 – коефіцієнт, що враховує поверховість будівлі заввишки понад 5 поверхів, та визначається за формулою: $k_3 = 1 + 0,04 \cdot (n - 5)$, де n – кількість поверхів будівлі. Максимальне значення коефіцієнта k_3 рекомендовано приймати не більше 1,6 (включаючи рамні, рамно-в'язеві та в'язеві системи), а для стінових та каркасно-стінових конструктивних систем слід приймати не більше 1,5.

Коефіцієнтом передбачається збільшення запасів міцності конструкцій будівлі у міру зростання числа їх поверхів вище п'яти. Цим враховується, що зі зростанням вертикальних навантажень, що є наслідком збільшення числа поверхів, підвищується небезпека крихкого руйнування конструкцій. У таблиці 1 представлені чисельні значення вищенаведених коефіцієнтів, що застосовувались у формулах 5...13 у нормативних документах, які видавались у різні роки [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Таблиця 1. Значення сейсмічних коефіцієнтів у нормативних документах різних років видання

Будинки та споруди або їх елементи під час розрахункової сейсмічності у балах:		α	K_c
ПСП 101-51	7	1	0,025
	8	1	0,05
	9	1	0,1
СН 8-57	7	-	0,025
	8	-	0,05
	9	-	0,1
СНиП II-A.12-62	7	-	0,025
	8	-	0,05
	9	-	0,1

СНиП II-A.12-69*	Будівлі та споруди або їх елементи з числом поверхів $n > 5$ при розрахунковій сейсмічності в балах:	K_c	$K_{зт}$
	7	0,025	1+0,1·(n-5) але не більше 1,4
	8	0,05	
	9	0,1	
	Великопанельні будівлі та будівлі зі стінами з монолітного залізобетону з числом поверхів $n > 5$ при розрахунковій сейсмічності в балах:		
	7	0,025	1+0,06·(n-5) але не більше 1,3
	8	0,05	
9	0,1		

Продовження таблиці 1

СНІП II-7-81	Будинки каркасні числом n поверхів понад 5 при розрахунковій сейсмічності в балах (у конструкціях в яких можуть бути допущені залишкові деформації, тріщини, пошкодження окремих елементів тощо, що ускладнюють нормальну експлуатацію):	K_1	K_2	K_w	A
	7	0,25	$1+0,1 \cdot (n-5)$	1,5	0,1
	8	0,25	але не	1,5	0,2
	9	0,25	більше 1,5	1,5	0,4
	Будинки великопанельні або зі стінами з монолітного залізобетону та числом n поверхів понад 5 розрахункової сейсмічності в балах (в конструкціях в яких можуть бути допущені залишкові деформації, тріщини, пошкодження окремих елементів тощо, що ускладнюють нормальну експлуатацію):				
	7	0,25	$0,9+0,075 \cdot (n-5)$	1,0	0,1
	8	0,25	але не	1,0	0,2
	9	0,25	більше 1,5	1,0	0,4

СНІП II-7-81*	Будинки каркасні (з діафрагмами або в'язями) при розрахунковій сейсмічності в балах (в конструкціях в яких можуть бути допущені залишкові деформації та пошкодження, що ускладнюють нормальну експлуатацію):	K_1	K_2	K_w	A
	7	0,25	-	1,3	0,1
	8	0,25	-	1,3	0,2
	9	0,25	-	1,3	0,4
	Будинки із залізобетонних великопанельних або монолітних конструкцій при розрахунковій сейсмічності в балах (в конструкціях в яких можуть бути допущені залишкові деформації та пошкодження, що ускладнюють нормальну експлуатацію):				
	7	0,22	-	1,0	0,1
	8	0,22	-	1,0	0,2
	9	0,22	-	1,0	0,4

Продовження таблиці 1

ДБН В.1.1-12:2006		K_1	K_2	K_3	$K_{гр}$	
	Будівлі та споруди в яких застосований залізобетонний каркас з вертикальними діафрагмами або ядрами жорсткості (стінове заповнення яких не впливає на їх деформативність, при відношенні висоти стояків h до їх поперечного розміру b в напрямку дії сейсмічного навантаження, що дорівнює або менше 15) при розрахунковій сейсмічності в балах (в конструкціях в яких можуть бути допущені залишкові деформації та пошкодження, що ускладнюють нормальну експлуатацію):				1+0,06·(n-5) але не більше: 2,0 - для рамних, рамно-в'язевих та в'язевих систем; 1,8 - для стінових та каркасно-стінових конструктивних систем	
	7	0,3	1,0		0,8-1,2	
	8	0,3	1,0		0,75-1,3	
9	0,4	1,0		0,7-1,4		

ДБН В.1.1-12:2014 (зміна №1)		K_1	K_2	K_3	$K_{гр}$	
	Будівлі та споруди в яких застосований залізобетонний каркас з вертикальними діафрагмами або ядрами жорсткості (стінове заповнення яких не впливає на їх деформативність, при відношенні висоти стояків h до їх поперечного розміру b в напрямку дії сейсмічного навантаження, що дорівнює або менше 15) при розрахунковій сейсмічності в балах (в конструкціях в яких можуть бути допущені залишкові деформації та пошкодження, що ускладнюють нормальну експлуатацію):				1+0,04·(n-5) але не більше: 1,6 - для рамних, рамно-в'язевих та в'язевих систем; 1,5 - для стінових і каркасно-стінових конструктивних систем	
	7	0,3	1,0		0,8-1,2	
	8	0,3	1,0		0,75-1,3	
9	0,4	1,0		0,7-1,4		

Висновки. Виконаний аналіз сейсмічних коефіцієнтів показав, що існуюча нормативна система розрахункових коефіцієнтів виявляється достатньо збалансованою, але потребує вдосконалення, оскільки результати

розрахунків не завжди відповідають даним ушкоджень споруд при землетрусах. Цей факт необхідно враховувати при уточненні тих чи інших деталей розрахунку інженерних споруд.

References

1. Omori F. Seismic experiment on the fracturing and overturning of columns / F. Omori. – Tokyo, 1900.
2. Mononobe N. On the determination of earth pressures during earthquakes / N. Mononobe, H. Matsuo // Proc. World Eng. Conf., 9, 1929. – P. 177-185.
3. Biot M.A. Tansient oscillations in elastic systems / M.A. Biot // Transactions of the American Society of Civil Engineers – Vol. 108, No. 1, January 1943. – P. 365-385.
4. Zavriev K.S. Raschet inzhenernyih sooruzheniy na seysmostoykost / K.S. Zavriev // «Izvestiya Tiflisskogo politehnicheskogo instituta» – Tiflis, 1928.
5. PSP 101-51. Polozhenie po stroitelstvu v seysmicheskikh rayonah.
6. CN 8-57. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonah.
7. SNiP II-A.12-62. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonah.
8. SNiP II-A.12-69*. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonah.
9. SNiP II-7-81. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonah.
10. SNiP II-7-81*. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonah.
11. DBN V.1.1-12:2006. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy.
12. DBN V.1.1-12:2014. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy.

Література

1. Omori F. Seismic experiment on the fracturing and overturning of columns / F. Omori. –Tokyo, 1900.
2. Mononobe N. On the determination of earth pressures during earthquakes / N. Mononobe, H. Matsuo // Proc. World Eng. Conf., 9, 1929. – P. 177-185.
3. Biot M.A. Tansient oscillations in elastic systems / M.A. Biot // Transactions of the American Society of Civil Engineers – Vol. 108, No. 1, January 1943. – P. 365-385.
4. Завриев К.С. Расчет инженерных сооружений на сейсмостойкость / К.С. Завриев // «Известия Тифлисского политехнического института» – Тифлис, 1928.
5. ПСП 101-51. Положение по строительству в сейсмических районах.
6. СН 8-57. Строительство в сейсмических районах.
7. СНиП II-A.12-62. Строительство в сейсмических районах.
8. СНиП II-A.12-69*. Строительство в сейсмических районах.
9. СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах.
10. СНиП II-7-81. *Строительство в сейсмических районах.
11. ДБН В.1.1-12:2006. Будівництво у сейсмічних районах України.
12. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України.