

УДК 699.841

**РОЗРАХУНОК БУДІВЕЛЬ НА СЕЙСМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ З
ВРАХУВАННЯМ ЗНАЧНИХ НЕРІВНОМІРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ
ОСНОВИ**

**РАСЧЕТ ЗДАНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ
ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
ОСНОВАНИЯ**

**SEISMIC ANALYSIS OF BUILDINGS WITH ALLOWANCE FOR
SUBSTANTIAL DIFFERENTIAL SETTLEMENTS OF BASE**

Хохлін Д.О., к.т.н., с.н.с. (Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ)

Хохлин Д.А., к.т.н., с.н.с. (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев)

Khokhlin D.O., Ph.D., senior researcher (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv)

Розглянуті засади розрахунку будівель на сумісний вплив сейсміки та значних нерівномірних деформацій основи з використанням нелінійного статичного розрахунку методом спектру несучої здатності.

Рассмотрены положения расчета зданий на совместное воздействие сейсмики и значительных неравномерных деформаций основания с использованием нелинейного статического расчета методом спектра несущей способности.

Regulations of buildings analysis on the combination of seismic effects and substantial differential settlements of base with non-linear static capacity spectrum method are considered

Ключові слова:

Сейсміка, нерівномірні деформації основи, спектр несучої здатності.

Сейсмика, неравномерные деформации основания, спектр несущей способности.

Seismic, differential settlements of base, capacity spectrum.

Значна частина України є сейсмонебезпечною, а для будівель класу відповідальності СС-3 згідно карт ОСР 2004-С, а також деяких нових

досліджень [1], сейсмонебезпечною (6 та більше балів) є вся територія країни. По всій Україні присутні й ті чи інші чинники значних нерівномірних деформацій основи (ЗНДО), багато з яких відносять до епізодичних (особливих) впливів.

На даний час відсутня детально розроблена та обґрунтована методика розрахунку сумісної дії сейсмічних навантажень і зусиль від просідання ґрунтів, можливість якого, наприклад, передбачена згідно ДБН [2]. Дану проблему можна пояснити заборонаю відповідно до ДБН [3] врахування у аварійних сполученнях навантажень більше одного епізодичного впливу. Хоча в статті [4] обґрунтовується можливість і необхідність використання не безпосередньо впливу особливих видів ЗНДО, а постзусиль від них, які за своєю сутністю є переднапруженням та постійним навантаженням.

Відомі спроби врахування одночасної дії сейсмічних навантажень та значних нерівномірних деформацій [5,6 та ін.] стосувалися дії просідання та спектрального методу розрахунку. В той же час зрозуміло [7], що чинників ЗНДО є велика кількість, й для них питання методики розрахунку будівель разом зі сейсмікою є на зачатковому рівні. Але й для наведених спроб розрахунків на сумісну дію сейсміки та просідання можна виділити ряд суттєвих недоліків навіть з врахуванням спрощеного підходу до розрахунку. Наприклад, це стосується використання статичних значень коефіцієнтів жорсткості основи для розрахункової динамічної моделі. Ряд обмежень і складностей накладає також й використання спектрального методу сейсмічного розрахунку, пов'язаних з неможливістю прямого врахування нелінійної роботи конструкцій, характерної для розглядуваних впливів. З іншого боку, виконання прямого динамічного нелінійного розрахунку просторових систем з врахуванням складних деформацій основи є занадто проблемним з причин значної трудомісткості та невизначеності щодо вихідних даних та властивостей складових моделей, а також складностей з контролем якості результатів розрахунку [8 та ін.]. Компромісним варіантом повинно стати використання відносно нового (для України) нелінійного статичного розрахунку методом спектру несучої здатності [9 та ін.], який й буде розглянуто.

Метою статті є розгляд засад розрахунку будівель на сумісний вплив сейсміки та значних нерівномірних деформацій основи з використанням нелінійного статичного розрахунку методом спектру несучої здатності.

Методи розрахунку будівель на сейсмостійкість в різний ступінь детальності розглянуті у відповідних нормативних документах (ДБН, Eurocode 8, АТС-40, СП, КМК тощо) та іншій спеціальній літературі та публікаціях. В новій редакції ДБН [10] введений новий (альтернативний прямому динамічному) варіант нелінійного статичного сейсмічного розрахунку на основі методу спектра несучої здатності (СНС), розробленого у різних варіантах в західних країнах. Спеціалісти НДІБК розробили модифікацію даного методу [9], найбільш наближену до варіанту у Eurocode

8 [11]. Розгляд відповідних основних положень і прикладів [9,10] показав, що в них відсутня повна деталізація щодо врахування всіх положень і підходів, передбачених до сейсмостійкого проектування у національних нормах ДБН [10] (не говорячи вже про вплив значних нерівномірних деформацій). Перші розрахунки методом СНС проведені автором [4] з використанням розповсюдженого в Україні програмного комплексу ЛІРА-САПР (версія 2012) показав певні особливості, які потребують окремих роз'яснень і обґрунтувань.

Одною з основних проблем є неможливість згідно ДБН [3] враховувати більше одного епізодичного впливу у аварійному сполученні навантажень. Ряд міркувань, описаних в дослідженнях автора (наприклад [4]), показує, що таке обмеження не повинно стосуватися напружено-деформованого стану, набутого після впливу тих чи інших варіантів ЗНДО (навіть якщо вони відносяться за офіційною класифікацією до епізодичних). При цьому поєднання впливів виконується на основі віднесення деформованого стану конструктивної системи будівлі після реалізації ЗНДО (постзусиль) до переднапруження, тобто постійного навантаження. Тоді в аварійному сполученні навантажень залишається лише один епізодичний вплив – сейсміка.

Важливою є послідовність дії впливів. В розглядуваному випадку передбачається дія спочатку ЗНДО, а потім сейсміки. Дія в іншій послідовності передбачає лише врахування пошкоджень і деформацій від сейсміки без накладання зусиль від різних впливів, тому не розглядається.

Визначальною особливістю розрахунку повинно бути врахування нелінійності роботи конструктивної системи (з граничними значеннями напружень і деформацій). Повзучість пропонується не враховувати з наступних міркувань:

- повзучість чинить незначний вплив на руйнування структури матеріалу та відповідне поглинання енергії;

- при роботі конструктивної системи на піддатливій основі, як правило, спостерігається взаємна компенсація зусиль: їх збільшення від розвитку повзучості в ґрунтах при ЗНДО компенсується зниженням при розвитку деформацій повзучості в матеріалах конструктивної системи [12];

- не врахування повзучості в матеріалах конструкцій, як правило, є «в запас» міцності, адже при цьому не враховується відповідний перерозподіл і зниження зусиль; крім цього враховується несприятливий варіант розвитку ЗНДО, який передбачає їх високу швидкість та незначний розвиток деформацій повзучості [12]

- чинні норми з розрахунку конструкцій передбачають врахування повзучості тільки, як правило, за II групою граничних станів, наприклад в [13];

- неврахування повзучості при сейсмічних розрахунках (в розповсюджених програмних комплексах не має можливості замінити SE зі

збереженням в них передісторії по напруженнях-деформаціях).

Повзучість має бути врахована прямо у випадку її суттєвого впливу на зміну розрахункової схеми конструктивної системи (впливи 2-го порядку) або може бути врахована непрямо шляхом відповідного збільшення отриманих без неї деформацій для оцінки фактичних значень переміщень системи.

Отримання напружено-деформованого стану від ЗНДО відбувається за методиками та правилами, визначеними у відповідних нормативних документах [2 та ін.]. При цьому, враховуючи нелінійність схеми та її чутливість до передісторії впливів, рекомендується моделювати послідовність виникнення навантажень: спочатку послідовно статичні постійні та тимчасові при звичайному розподілі жорсткості основи, потім через спеціальне завантаження (переміщеннями або еквівалентними навантаженнями) або шляхом зміни жорсткості основи (наприклад, через можливості систем типу МОНТАЖ в ПК ЛИРА-САПР) змоделювати вплив ЗНДО.

Для визначення розподілу горизонтальних сейсмічних навантажень (форм коливань) необхідно використати спектральний метод розрахунку. При цьому слід застосувати стабілізовану жорсткість основи (після завершення ЗНДО, характеристики основи можуть бути скоректовані) крім ділянок відриву підшви від основи, які слід визначати з врахуванням повзучості матеріалів конструктивної системи. Підвищена динамічна жорсткість основи повинна бути врахована через відповідні коефіцієнти жорсткості або шляхом створення масиву скінчених елементів основи ґрунту в межах стискаємої товщі по вертикалі та горизонталі з власною вагою (при цьому також враховується інерція основи). Динамічна жорсткість основи визначається на основі СНиП [14] та рекомендацій [15]. Форми коливань слід визначати з врахуванням зміни лінійних жорсткостей поверхів від ЗНДО (для горизонтальних поступальних складових коливань) у порівнянні з деякими початковими, які були б завдані до впливу ЗНДО.

Для гнучких конструктивних систем з періодом за 1-ю формою власних коливань (окремо – в кожному ортогональному напрямі) більше 1,0 секунди необхідно обов'язково враховувати вплив вищих форм коливань за формулами (Г.4, Г.5) ДБН [10]. Це може також стосуватися й крутильних форм коливань від відцентрування центрів жорсткості та мас в плані або від крутильних коливань ґрунта.

Розрахунок слід проводити для незалежних ортогональних горизонтальних осей будівель, в напрямках яких жорсткість і міцність конструктивної системи може суттєво відрізнятись.

Після визначення розподілу горизонтальних сейсмічних навантажень вони прикладаються в нелінійній моделі слідом за впливом ЗНДО. Сумарну величину сейсмічних навантажень слід прийняти «з запасом» для досягнення руйнування конструктивної системи (виникнення геометрично-змінюваної

системи (ГЗС)). В результаті покрокового прикладання сейсмічних навантажень слід визначити поповерхові переміщення з їх подальшим переведенням в загальне еквівалентне спектральне переміщення S_d (для еквівалентної одномасової системи) з використанням поповерхових мас і сейсмічних сил за формулою (Г.2) ДБН [10]. На основі тих же даних за формулою (Г.1) ДБН [10] визначають відповідні спектральні прискорення S_a . Ітоговий результат має бути сформований у вигляді графіку СНС S_a - S_d .

Слід звертати увагу на зміну форми епюри горизонтальних деформацій (коливань) від сейсміки при розвитку нелінійних деформацій. При суттєвій зміні форми (більше 10% у співвідношеннях коефіцієнту η_{ki} [10] для різних рівнів) слід оцінити зміну жорсткості поверхів і визначити спектральним методом оновлену форму. У нелінійному розрахунку зміна форми враховується шляхом створення нового сейсмічного завантаження зі скоректованим розподілом, яке починає прикладатися з кроку перевищення межі суттєвої зміни форми. Дане явище характерне для будівель з гнучкими поверхами.

Однією з найбільших проблем при побудові графіку СНС в програмному комплексі є межі визначення (чутливості) до отримання ГЗС, яка визначає умовний момент руйнування. Ряд розрахунків, проведених автором у ПК ЛИРА-САПР 2012, показав, що значення руйнуючого навантаження (зусилля) у фізично-нелінійній постановці можна визначити ще більш-менш адекватно (у порівнянні з аналогічними фізичними експериментами). Але перехід до горизонтальної (повністю або частково) пластичної гілки графіку деформацій є проблемним, адже, по-перше, горизонтальна гілка графіку деформацій не може бути задана у властивостях нелінійних СЕ, а, по друге, ПК занадто занижений рівень приросту деформацій при збільшенні навантаження сприймає за утворення ГЗС. Навіть зміна межі чутливості до переходу системи до стану ГЗС у нових версіях ПК залишає проблему її адекватності у порівнянні з фізичними значеннями для різних типів конструктивних систем. У зв'язку з цим пропонується добудовувати горизонтальну гілку пластичних деформацій на основі експериментальних даних. Перед цим важливо перевести попередній графік СНС у двогілковий варіант (за наявності відчутного викривлення графіку) та визначити границю текучості a_r .

Орієнтирами для розміру горизонтальної гілки повинні бути: коефіцієнт пластичності (податливості) μ , визначений за формулою (Г.14) [10] на основі коефіцієнту $k_1 = 1/R_u$ з таблиці 6.3 ДБН [10] або на основі спеціальних експериментальних даних; граничних значеннях нелінійних перекосів поверхів з табл. 6.8 ДБН [10]. Найбільші контрольовані перекоси поверхів слід визначати на основі епюри форми коливань (для найбільших кутів нахилу епюри) за формулою (в позначеннях ДБН [10]):

$$\Delta_{k,max} = \frac{\Delta U_{max}}{H_L} = \frac{\Delta \eta_{max} S_d}{H_L} \leq \Delta_{k,ut} \quad (1)$$

Для пошуку точки перетину графіку СНС з графіком спектру (найбільшого в балах) сейсмічного впливу в координатах S_a - S_d необхідно вибрати найбільш ймовірний до передбачуваної сейсмостійкості будівлі максимальний спектр сейсмічного впливу за балом сейсмонебезпеки з врахуванням коректуючих коефіцієнтів з ДБН [10]: γ_s (табл. 6.12), k_2 (табл. 6.4), k_3 (формула (6.2)), $k_{гр}$ (табл. 6.6). Для кожного графіку (значень) спектру впливу для відповідного балу сейсмонебезпеки слід застосувати ітоговий коректуючий коефіцієнт:

$$k_x = (k_2 k_3 k_{gp}) / \gamma_s. \quad (2)$$

Після уточнення коефіцієнту редуції R_μ за формулою (2) слід визначити відповідний коефіцієнт пластичності μ (формула (Г.14) [10]), який не повинен перевищувати визначене раніше максимальне значення.

$$R_\mu = a_0 \beta / a_T, \quad (3)$$

де a_0 – прискорення основи відповідно до балу землетрусу;

β – коефіцієнт динамічності відповідний до пружного періоду еквівалентної одно масової системи T_1 (формула (Г.15) [10]);

a_T – границя (прискорення) текучості графіку СНС.

Далі будується відповідний до μ зменшений графік спектру сейсмічного впливу (з врахуванням коректуючого коефіцієнту за формулою (1)), з яким й визначається точка перетину графіків СНС та спектру сейсмічного впливу (СВ). Якщо перетин в межах допустимого значення μ не досягається, відповідний аналіз проводиться з графіком спектру СВ на один бал нижче (або на 0,5 при застосуванні проміжних значень впливу та розрахункових коефіцієнтів). При явному значному запасі сейсмостійкості до обраного спектру СВ слід провести розрахунок з врахуванням більшого сейсмічного впливу.

За необхідності, вертикальну складову коливань слід визначати за спектральним методом згідно [10] з врахуванням зміни жорсткостей у вертикальному напрямі від ЗНДО та можливим відривом підшви фундаменту від основи (ділянка відриву повинна визначатися з врахуванням повзучості матеріалу конструктивної системи). Для будівель жорсткої конструктивної системи при аналізі напружено-деформованого стану стін (або аналогічних до них зв'язкових систем) в їх площині допускається спрощене врахування простим додаванням та/або відніманням відсотку від вертикальних статичних навантажень (15% від статичних на момент землетрусу – для 7 та 8 балів і 30% при 9 балів, для 6 – можна не враховувати). Вертикальна складова задається окремим завантаженням, яке спрощено прикладається перед горизонтальним сейсмічним, або (більш точно) поетапно з розривом горизонтального.

Таким чином, на основі проведених відповідних досліджень розроблені та обґрунтовані положення з розрахунку будівель на сейсмічні навантаження з врахуванням значних нерівномірних деформацій основи. Визначено, що найбільш прийнятним для такого розрахунку є використання методу спектру

несучої здатності.

1. Кендзера А.В. О необходимости сейсмического микрорайонирования строительных площадок высотных зданий и ответственных сооружений в низко- и высокосейсмических районах Украины / А.В. Кендзера, В.К. Егупов, О.С. Вербицкая, Ю.В. Семенова, Ю.В. Лесовой, К.В. Егупов, Н.Г. Марьенков, К.Н. Бабик // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2015. – Вип. 82. – С. 44-66. **2.** Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих ґрунтах: ДБН В.1.1-5-2000. – Офіц. вид. – [На заміну СНиП 2.01.09-91; Чинні від 2000-07-01] – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2000. – 87 с. **3.** Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-2:2006. – Офіц. вид. – [На заміну СНиП 2.01.07-85*; Чинні від 2007-01-01]. – К.: Укрархбудінформ: Мінбуд України, 2006. – 75 с. **4.** Хохлін Д.А. Вопросы сейсмостойкости зданий при значительных неравномерных деформациях основания / Д.А. Хохлин // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2015. – Вип. 82. – С. 289-295. **5.** Хохлін Д. О. Конструктивний захист житлових будинків масових серій, що експлуатуються в умовах просідаючих ґрунтів сейсмонезбезпечних територій : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01 / Хохлін Денис Олександрович. – К. , 2009. – 204 с. **6.** Матвеев И.В. Сочетание воздействий просадки оснований и сеймики в расчетах зданий / И.В. Матвеев, В.И. Кравченко // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: Стройиздат, 1990. – №4/1990. – С. 28-32. **7.** Хохлін Д.О. Особливості напружено-деформованого стану будівель при суміщенні сейсмічних впливів та значних нерівномірних деформацій основи / Д.О. Хохлін // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2012. – Вип. 76. – С. 269-277. **8.** Банах В.А. Розвиток статико-динамічних розрахункових моделей будівель і споруд у складних інженерно-геологічних умовах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / В.А.Банах. – Дніпропетровськ, 2013. – 38 с. **9.** Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости : монография / Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, А.К. Хавкин, К.Н. Бабик. – К.: Гудименко С.В., 2012. – 384 с. **10.** Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2014. – Офіц. вид. – [На заміну ДБН В.1.1-12:2006; Чинні від 2014-10-01]. – К.: Укрархбудінформ: Мінрегіон України, 2014. – 110 с. **11.** Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. **12.** Метелюк Н.С. Совершенствование расчета сооружений, возводимых в сложных грунтовых условиях / Метелюк Н.С. – К.: Будівельник, 1980. – 144 с. **13.** Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – Офіц. вид. – [На заміну СНиП 2.03.01-84*; Чинні від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. **14.** Фундаменты машин с динамическими нагрузками: СНиП 2.02.05-87. – [Взамен СНиП II-19-79; Введ. 01.07.88]. – М.: Стройиздат, 1987. – 48 с. **15.** Мар'єнков М.Г. Врахування ґрунтової основи, що нерівномірно деформується, при розрахунку сейсмостійкості будівель / М.Г. Мар'єнков // Будівельні конструкції. – К.: НДІБК, 2015. – Вип. 82. – С. 335-345.