

## **ВОПРОСЫ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ОСНОВАНИЯ**

Хохлин Д.А.

Киевский национальный университет строительства и архитектуры  
г. Киев, Украина

**АНОТАЦІЯ:** В статті розглянутий ряд питань за темою вивчення особливостей напружено-деформованого стану будівель в умовах одночасної дії зусиль від сейсміки та значних нерівномірних деформацій основи різної природи.

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассмотрен ряд вопросов по теме изучения особенностей напряженно-деформированного состояния зданий в условиях одновременного действия усилий от сейсмики и значительных неравномерных деформаций основания различной природы.

**ABSTRACT:** The article deals with the several questions concerning research of the buildings stress-strain state features in conditions of combination of seismic effects and various substantial differential settlements of base.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сейсмика, неравномерные деформации, основание, напряжения, конструктивная система.

Широкое распространение на территории Украины различных сложных и особых инженерно-геологических условий приводит к их совмещению. В т.ч. это касается и сейсмоопасности и различных источников значительных неравномерных деформаций основания. Введение в действие новых норм по сейсмостойкому строительству ДБН [1] характеризуется повышением требований к расчету зданий и сооружений на действие сейсмических нагрузок. В частности, использование прямого динамического метода стало обязательным так же для зданий класса ответственности СС-2. Но, учитывая сложность, громоздкость и

значительную неопределенность исходных данных данного метода, особенно при учете нелинейности работы конструкций и основания, в ДБН [1] предусмотрена возможность применения альтернативного нелинейного статического расчета. Данный метод является более эффективным и пригодным для широкого спектра сейсмических расчетов при необходимости прямого учета нелинейности работы конструкций здания.

Вопросами защиты зданий в условиях совмещения сейсмоопасности и наличия тех или иных причин значительных неравномерных деформаций занимались КиевЗНИИЭП, НИИСК и др. организации, при участии которых был разработан ДБН [2]. Анализ данного ДБН и др. соответствующей литературы показывает, что за редким исключением, рассмотрение данного вопроса касается потенциального совмещения сейсмике и просадки. И даже некоторое имеющееся развитие темы в последнем варианте оставляет открытым множество вопросов, связанных с особенностями совмещения особых воздействий, вариантами и особенностями учета в расчетах основания деформированных конструкций, чувствительностью динамической реакции конструктивной системы к неравномерным деформациям основания и т.д.

**Целью** данной работы является рассмотрение ряда вопросов проводимых автором исследований по теме изучения особенностей напряженно-деформированного состояния зданий в условиях одновременного действия усилий от сейсмике и значительных неравномерных деформаций основания различной природы.

Как отмечено в [3], все особенные условия строительства тем или иным образом могут быть причиной возникновения значительных неравномерных деформаций основания. На территории Украины среди них можно выделить как наиболее опасные, характерные и распространенные: просадочные, насыпные и намывные грунты, подработку, карст, оползнеопасные и подтапливаемые территории, а также условия плотной застройки территории. Так же кроме случаев грунтов с особенными свойствами и др. особых условий и влияний, причиной значительных неравномерных деформаций так же может становиться существенная неоднородность инженерно-геологического строения основания.

Рассмотрим особенности и механизмы влияния значительных неравномерных деформаций основания на здания для разных видов их факторов возникновения на основании анализа имеющихся источников [2, 3 и др.]. Все рассмотренные причины значительных неравномерных деформаций могут генерировать два типа влияния на конструктивную систему здания с точки зрения учета в соответствующих расчетах. Первый тип отображает возникновение дополнительных деформаций основания под действием давления под подошвой фундамента по причине снижения жесткости части основания или ее просадки в процессе существования здания, а

также начального неравномерного распределения жесткости основания. Данное влияние в расчетах отображается через соответствующую коррекцию жесткости основания (коэффициентов жесткости или модулей деформаций конечных элементов (КЭ) грунта). Второй тип отображает неравномерное деформирование основания без непосредственного действия давления от фундамента под влиянием собственного веса грунтового массива и негативных явлений в нем. Такое влияние в расчетах учитывают прикладыванием к фундаменту соответствующих вынужденных перемещений, распределение и величину которых определяют по специальным формулам. Одним из удачных вариантов задания вынужденных перемещений основания в КЭ модели здания видится использование эквивалентных вертикальных нагрузок (подвесов) на уровне фундамента (при отсутствии моделирования основания в виде КЭ) или на уровне низа сжимаемой толщи грунта (при моделировании основания КЭ).

Для последующего рассмотрения вопроса следует оговорить проблему требования [4], касающегося возможности учета в особых сочетаниях нагрузок только одной эпизодической нагрузки, к которым относят сейсмические и основные влияния, приводящие к значительным неравномерным деформациям основания (просадка, подработка, карст и т. д.). Учитывая то, что в [2] есть несовпадающие положения, которые предусматривают в некоторых случаях использование особых сочетаний нагрузок с одновременным действием сеймики и просадки основания, следует выработать некий компромиссный вариант. Т.к. игнорирование сложного как деформированного, так и напряженного состояния здания после возникновения значительных неравномерных деформаций при расчете на сейсмические нагрузки является ошибочным [2, 3 и др.]. Действительно, время землетрясения является незначительным. В период его действия степень возможных активных деформаций основания, например, от просадки, является несущественной, кроме случаев общего разрушения грунтового массива. Но предварительно приобретенное конструктивной системой от деформаций напряженно-деформированное состояние становится устоявшимся (постоянным), а не эпизодическим (аварийным), и совмещается в дальнейшем с сейсмическими нагрузками. Данное состояние по сути является предварительным напряжением конструкций с учетом соответствующих релаксационных процессов, деформаций и повреждений и относится к категории постоянных нагрузок (п. 4.11 [4]). Таким образом, в расчетах на сеймику следует учитывать именно постусилие (а не действие) и уже приобретенное деформированное состояние от различных перемещений основания. Это является приемлемым и принципиально не противоречит положениям как [4], так и [2].

С учетом вышеприведенного на данный момент автором предлагается представленные далее правила расчета при наличии как сейсмической опасности, так и просадочных грунтов, как характерного случая фактора значительных неравномерных деформаций основания. Расчет конструкций зданий и сооружений, проверка их прочности, устойчивости и эксплуатационной пригодности при проектировании на просадочных грунтах в сейсмических районах следует выполнять на группы сочетаний нагрузок, представленные в табл. 1. Приведенные правила расчета могут быть применены и для других случаев учета значительных неравномерных деформаций, причинами которых являются эпизодические влияния от основания (карст, подработка и др.).

Таблица 1

Группы сочетаний нагрузок при наличии сейсмической опасности и просадочных грунтов

№ группы	Описание	Примечания
I	Основные по ДБН В.1.2-2	-
II	Особые по ДБН В.1.1-12	Для зданий класса ответственности СС-2 и СС-3 следует разрабатывать 2 подгруппы расчетных моделей – с и без учета возможных деформированных схем от просадки и уменьшения жесткости основания при увлажнении просадочного грунта
III	Особые с учетом только действия просадки по ДБН В.1.1-5	Без сеймики
IV	Особые для зданий класса ответственности СС-3 (кроме имеющих податливую конструктивную схему) с учетом объединения усилий от сеймики и постусилий от просадки	Как и для II группы при определении усилий и перемещений в здании от сеймики следует разрабатывать 2 подгруппы расчетных моделей – с и без учета возможных деформированных схем от просадки и уменьшения жесткости основания при увлажнении просадочного грунта
V	Особые для проверки несущей способности основания зданий от опрокидывающего момента, вызываемого совместным действием горизонтальной сейсмической и вертикальной нагрузок (собственный вес), прикладываемые к деформированной схеме	При этом учитывают: постоянные, длительные временные, кратковременные (кроме ветровых) и сейсмические нагрузки, крен здания от неравномерной просадки основания и его деформации по основной форме колебаний

По тематике статьи на данный момент автором также проводятся следующие сопутствующие исследования:

- изучение особенностей принятия эффективных уменьшенных жесткостей каменных и железобетонных конструкций с учетом их повреждений для спектрального метода расчета (данный метод аналогичен методу секущих жесткостей, например, в американских нормах по сейсмостойкому строительству АТС-40 и др. источниках);

- изучение чувствительности динамических характеристик и напряженно-деформированного состояния зданий с распространенными конструктивными решениями при сейсмических воздействиях к степени изменения жесткости основания и неравномерных деформаций (для спектрального метода расчета);

- применение метода спектра несущей способности для сейсмического расчета с учетом деградации жесткости и прочности от значительных неравномерных деформаций основания.

На последнем исследовании хотелось бы остановиться более подробно. Необходимо отметить, что многие положения и принципы современных сейсмических расчетов с учетом нелинейности работы конструкций построены на использовании энергетических и деформационных критериях их разрушения. В частности, это касается определения коэффициентов редукции  $R_\mu$  ( $k_1$ ) и применения различных вариантов метода спектра несущей способности СНС (ДБН [1], Еврокод 8, АТС-40 и др.).

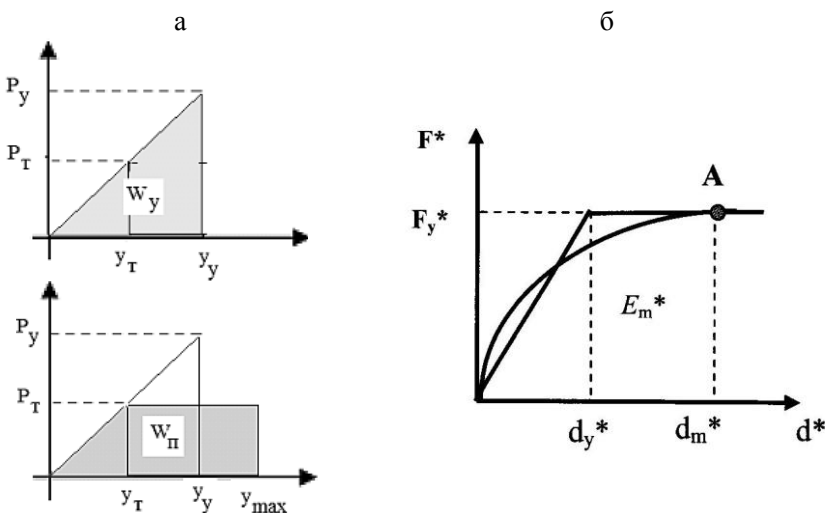


Рис. 1. Энергия при: эквивалентных упругом (а) и упруго-пластичном поведении системы ( $W_y=W_\Pi$ ); построении графика СНС (б)

Смысл энергетического критерия разрушения заключается в постоянном значении необходимой работы действующих сил (площадь под графиком усилие-перемещение) для разрушения конструктивной системы при развитии соответствующих нелинейных пластических деформаций в независимости от последовательности их приложения. Применение данного критерия для определения коэффициента редукции (экспериментально подтверждено, что он хорошо срабатывает для жестких зданий с периодом основной формы колебаний  $0,1 \dots 0,5$  с [1]) наглядно представлено на рис. 1, а. Он используется и при построении упрощенных идеализированных кривых при расчетах методом спектра несущей способности (главный принцип – сохранение площади под графиком, рис. 1, б).

Срабатывание энергетического критерия для бетонных и железобетонных конструкций отдельно подтверждено автором при анализе многочисленных результатов их испытаний с промежуточными разгрузками, приведенных в работе [5]. При этом важным условием является невключение в работу разрушения материала деформаций ползучести, при которых не происходит существенных процессов разрушения его структуры.

При возникновении значительных неравномерных деформаций основания зданий с жесткой конструктивной системой (условная балка-стенка на упруго-пластичном основании) существенные дополнительные усилия вызывают развитие и накоплений деформаций разрушения конструкций, в первую очередь, трещинообразования. В дальнейшем, при приложении сейсмических нагрузок и построении соответствующего графика спектра несущей способности полученные до этого деформации разрушения (предварительная работа разрушения) приводят к коррекции такого графика с уменьшением площади под ним по сравнению начальными условиями. При этом должны наблюдаться явления деградации и прочности, и жесткости конструктивной системы. Для оценки степени развития разрушений и потери прочности и жесткости при неравномерных деформациях автором предлагается построение аналогичного сейсмическому графика спектра несущей способности, но по вертикальному действию деформаций и сил. Приведение такого графика к билинейному упруго-пластическому виду позволяет разделить стадии работы конструктивной системы и опасность действия рассматриваемых значительных неравномерных деформаций на ее сейсмостойкость.

В целом, следует отметить, что строительство сейсмостойких зданий при наличии опасности возникновения значительных неравномерных деформаций основание включает множество не рассмотренных или слабо рассмотренных вопросов, часть из которых в разной степени рассмотрена или упомянута данной статье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2014. – [На заміну ДБН В.1.1-12:2006; Чинні від 2014-10-01]. – К.: Укрархбудінформ: Мінрегіон України, 2014. – 110 с. – (Будівельні норми України).
2. Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих ґрунтах: ДБН В.1.1-5-2000. – [На заміну СНиП 2.01.09-91; Чинні від 2000-07-01]. – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2000. – 87 с. – (Будівельні норми України).
3. Хохлін Д.О. Особливості напружено-деформованого стану будівель при суміщенні сейсмічних впливів та значних нерівномірних деформацій основи / Д.О. Хохлін // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2012. – Вип. 76. – С. 269-277.
4. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-2:2006. – [На заміну СНиП 2.01.07-85\*; Чинні від 2007-01-01]. – К.: Укрархбудінформ: Мінбуд України, 2006. – 75с. – (Будівельні норми України).
5. Байда Д.М. Залишкова несуча здатність залізобетонних балок після їх часткового руйнування : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Байда Денис Миколайович. – К. , 2005. – 185 с.

## REFERENCES

1. Construction in seismic regions of Ukraine: State building codes V.1.1-12:2014. – [Valid from 2014-10-01]. – K.: Minrehion of Ukraine, 2014. - 110 p. - (Building codes of Ukraine).
2. Buildings and structures on undermined territories and slumping soils: State building codes V.1.1-5-2000. - [Valid from 2000-07-01]. – K.: State committee of building, architecture and housing policy of Ukraine, 2000. – 87 p. - (Building codes of Ukraine).
3. Khokhlin, D.O. (2012). Features of the stress-strain state of the buildings in a combination of seismic effects and substantial non-uniform deformation of the base: Building constructions: col. of scient. articles. – K.: NDIBK, 2012. - Vol.76, - P. 269-277.
4. Loads & actions. (2006). State building codes V.1.2-2:2006. –[Valid from 2007-01-01]. – K.: Ukrarkhbuildinform, Minbud of Ukraine, 2006. – 75 p. - (Building codes of Ukraine).
5. Bayda, D.M. (2005). Residual load-carrying capacity of reinforced concrete beams after their partial failure. Candidate's thesis: 05.23.01 / Bayda Denis Mukolajovitsh. – K., 2005. – 185 p.

Стаття постуила в редакцію 03.08.2015 г.