УДК 624.151, 624.044
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-13-27

ВЫЯВЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ОГРАНИЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

CRITERIA DEFINITION FOR HIGH-RISE BUILDINGS FOUNDATIONS DEFORMATION LIMITATION

Р. Л. БАЛЕЗИН
О. А. ШУЛЯТЬЕВ, д-р. техн. наук
С. О. ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук
А. С. БУСЛОВ, д-р техн. наук, проф.

Дан обзор публикаций по определению предельных деформаций оснований фундаментов зданий и сооружений, приведена информация по основным исследованиям, отечественным и международным нормативным документам. С целью определения критериев ограничения деформаций оснований фундаментов высотных зданий выполнен анализ конструктивных и архитектурно-технологических требований, предъявляемых к деформациям высотных зданий, и дана оценка возможной случайной составляющей неравномерных деформаций, возникающей от статистической неоднородности основания. Статистическая неоднородность основания рассмотрена с использованием упрощенного детерминированного подхода. Выявленные критерии, определяющие ограничение деформаций оснований фундаментов высотных зданий, могут рассматриваться в качестве основы для дальнейших исследований.

The article presents an overview of the foundation deformation limitation for buildings and structures. Information from main research, domestic and international construction codes is given. For high-rise buildings foundations deformation limits evaluation was done by analyzing architectural, technological, and structural requirements for high-rise buildings deformations and an estimation of a probable stochastic component of a non-uniform deformation which is related to statistically non-uniform of base soil. Statistical non-uniformity of base soil was modelled by the use of a simplified deterministic method. Defined criteria for high-rise building foundation deformation limitation can be used in future research.

Ключевые слова:
Крен, неоднородность грунта, осадка, относительная разность осадок, предельные деформации, фундамент высотного здания

Key words:
Angular distortion, soil no uniformity, settlement, tilt, deformations limit, high-rise buildings foundations

Введение

Вопрос ограничения деформаций фундаментов широко изучался в 50-60-е годы прошлого века. Определенные в тот период пределы осадок, в дальнейшем актуализировались в соответствии с развитием строительной индустрии. Высотные здания, несмотря на их активное строительство в России и мире в последние десятилетия, в указанном аспекте исследованы не полностью.

Целью статьи является определение критериев для ограничения деформаций оснований фундаментов высотных зданий.

Критерии определяются посредством совместного рассмотрения архитектурно-технологических и конструктивных требований, предъявляемых к деформациям высотных зданий, и результатов оценки влияния возможной статистической неоднородности модуля деформации грунтов основания (детерминированный подход) на напряженно-деформированное состояние (НДС) фундаментов высотных зданий.

Под случайным креном следует понимать крен, возникающий в результате статистической пространственной неоднородности модуля деформации основания.

Основные исследования по вопросу предельных деформаций

Предельные величины деформаций оснований фундаментов определялись двумя основными методами. Первый заключался в обработке данных натурных наблюдений за зданиями (статистическим сопоставлением величин фактических осадок и состояния конструкций и эксплуатационной пригодности), а второй основывался на расчетно-теоретической оценке влияния деформаций основания на НДС конструкций. В результате исследований для жилых и общественных зданий определялись предельные величины осадки (средней, максимальной) и локальной неравномерности осадки (относительная разность осадок, относительный прогиб).

Использование первого метода в начальных исследованиях обусловлено сложностью выполнения комплексных расчетов системы «здание – фундамент – основание» с учетом множества факторов, влияющих на корректность результатов (совместные деформации системы «здание – фундамент – основание» во времени, статистическая неоднородность основания и т. д.) и расхождением теоретических и фактических величин напряжений в конструкциях (Meyerhof [33]). Метод реализовывался посредством сопоставления результатов наблюдений за осадками зданий различных конструктивных схем, типов фундаментов и грунтов основания (рассматривалось разделение на сильно- и слабосжимаемые грунты) с фактическим состоянием несущих конструкций и эксплуатационными проблемами. По результатам сопоставления определялись пределы неравномерных деформаций. За предел принималась минимальная величина, при которой здание переходило в ограничено работоспособное состояние (например, для гражданских зданий, см. рис. 1 – Skempton [37]). Несколько

иной подход применялся в работе Zang [39], где статистической обработкой материалов наблюдений за деформациями были получены параметры для логнормальной функции плотности вероятности отсутствия дефектов в зданиях при определённых значениях осадок. Используя указанную функцию и принимая допустимую вероятность возникновения дефектов $\alpha = 0{,}05$ (т. е. при полученных деформациях в 95% случаев дефекты не возникают) были определены предельные значения осадок.

Поскольку величина средней (или максимальной) осадки непосредственно не оказывает значительное влияние на работоспособность сооружения, в большинстве исследований ее допустимое значение принималось только исходя из эмпирически выявленной связи между величиной локальной неравномерности осадок ΔS и общей осадкой S. Такая связь, $\Delta S = 0{,}5 \ldots 0{,}75S$, указанная в работах Михеева [4], Токаря [12], Цытовича [14], Terzaghi [38] и др., свидетельствует, что неравномерная осадка прямо пропорциональная общей осадке.

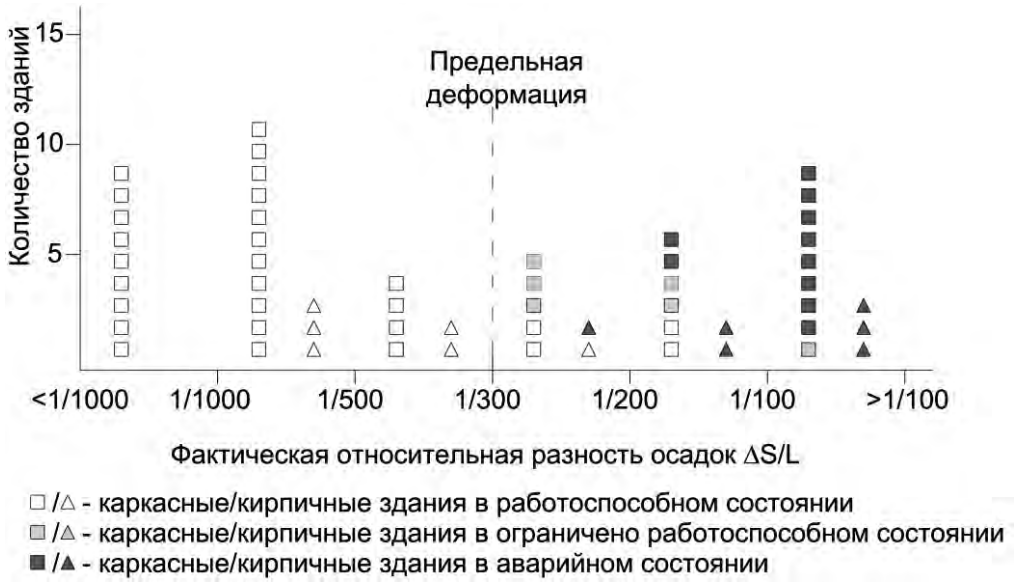


Рис. 1. Диаграмма по данным Skempton [37], категория технического состояния указана в соответствии с приложением Д СП22.13330.2016

Значения допустимых деформаций, полученные Skempton [37] и Zang [39], приведены в табл. 1 и 2. Из анализа указанных таблиц следует, что предельные значения осадок близки, однако допустимые значения относительной разности осадок имеют существенные отличия. Таким образом, первый подход не обладает универсальностью и может быть использован только для зданий, подобных рассматриваемым (с аналогичными конструктивными схемами, запроектированных с одинаковыми коэффициентами запаса и в схожих геологических условиях), а его применение возможно при наличии обширной базы наблюдений за осадками, с ее периодической актуализацией. Также для повышения точности обработки наблюдений необходим анализ причин возникновения дефектов, их связи с деформациями оснований и другими факторами.

Таблица 1

Предельные деформации зданий по рекомендациям Skempton [37]

Тип		Относительная разность осадок $\Delta S/L$*	S_{max},* мм
Глинистые грунты	Отдельно стоящие	1/500	63.5
	Плитные		64…102
Песчаные грунты	Отдельно стоящие		38
	Плитные		38…63
*Величины приведены с коэффициентом запаса 1,5			

Таблица 2

Предельные деформации оснований фундаментов по работе Zhang [39]

Тип	Относительная разность осадок ΔS/L	S_{max}, мм	Тип	Относительная разность осадок ΔS/L	S_{max}, мм
Глинистые грунты	1/1650	44	Плитный фундамент	1/830	49
Песчаные грунты	-	27	Свайный фундамент	1/3330	42

В исследованиях с использованием первого метода (Сотников [9], Токарь [12], Bjerrum [21], Grant [30], Skempton [37], Zang [39] и др.) высотные здания отдельно не рассматривались, их число в перечне обработанных данных незначительно. Отсутствие базы наблюдений за осадками высотных зданий (особенно с наличием повреждений) не позволяет применять рассмотренный метод для определения предельных величин деформаций оснований фундаментов высотных зданий.

С целью исключения недостатков первого метода был разработан второй – расчетно-теоретический, результаты натурных наблюдений использовались для верификации полученных значений. Постулаты метода были предложены Токарем [12]: предельные деформации оснований фундаментов определяются исходя из ограничения величины напряжений (нормальных растягивающих и касательных), возникающих в несущих конструкциях от деформаций основания, во избежание образования видимых дефектов – трещин (ограничение исходя из архитектурных требований, более жестких относительно прочностных). Схожий подход в своих исследованиях использовали Клепиков [3], Burland [24], Boscardin [23], Boone [23] и др.

Исследования [12, 24, 23, 22] показали приемлемую сходимость результатов расчетов с данными натурных наблюдений и подтвердили корректность рассматриваемого подхода к определению допустимых деформаций основания. Следует отметить, что в большинстве исследований отсутствует оценка вклада статистической неоднородности грунтов основания в локальные неравномерности деформаций, что компенсируется коэффициентами запаса и ограничением средней осадки (учет связи между неравномерной и средней осадками). Глобальные неравномерности деформаций, приводящие к крену жилых и общественных зданий, не рассматриваются. При общей универсальности метода основной проблемой является необходимость оценки множества возможных форм неравномерных осадок основания. Применительно к высотным зданиям расчетно-теоретический метод определения

предельных осадок (реализуемый с помощью оценки влияния неравномерных деформаций на НДС конструкций, с верификаций полученных значений по данным наблюдений) является наиболее перспективным.

Нормы и требования, предъявляемые к предельным деформациям

Рассмотренные исследования послужили основой как для отечественных, так и для зарубежных нормативных документов в части определения предельных величин деформаций.

Соответствующий раздел отечественных норм, начиная с НиТУ 127-55 (первого отечественного документа, содержащего значения допустимых деформаций оснований), разработан на основе работы Токаря [12], и последующие актуализации норм в этой части (а также базирующиеся на них нормы стран ближнего зарубежья [19, 37]), не содержат указаний по допустимым деформациям высотных зданий. Данные по предельным средним осадкам высотных зданий, приведенные в п.10.28 СП 22.13330.2016 (до 20 см при высоте зданий до 200 м и до 10 см при высоте 300 м и более), сформированы на основе обобщения опыта проектирования высотных зданий (в том числе с выявленной связью между величиной средней осадки и креном фундамента) и применимы только для предварительных расчетов.

Большинство зарубежных нормативных документов (например, нормы США [26], Еврокоды [27]) основываются на работах Токаря [12], Burland [24], Skempton [37] и устанавливают схожие величины предельных деформаций, требования же к высотным зданиям в них отсутствуют.

Некоторые отличия имеют канадские нормы – Canadian Foundation Engineering Manual [25], предусматривающие два подхода к определению допустимых деформаций оснований. В первом подходе для зданий низкого уровня ответственности и для первоначальной оценки в случае зданий повышенного уровня ответственности, рекомендуется пользоваться таблицей, сформированной на основе работе Poulos H.G. [34], в которой обобщены результаты рассмотренных ранее в этой статье исследований. Во втором подходе – для зданий повышенного уровня ответственности – рекомендуется использовать метод, отраженный в работе Boone S.J. [22], т. е. определять допустимую величину деформаций расчетным путем, исходя из ограничения напряжений в конструкциях рассматриваемого здания.

И только в нормах КНР GB 5007-2011 [29] (табл. 3) указаны предельные величины деформаций оснований фундаментов высотных зданий. Важно отметить, что требования к крену и осадке ужесточаются с увеличением высоты зданий.

Таблица 3

Предельные значения деформаций фундаментов высотных зданий в соответствии с нормами КНР [29]

Высота здания H, м	$H \leq 20$	$20 < H \leq 50$	$50 < H \leq 100$	$100 < H \leq 150$	$150 < H \leq 200$	$200 < H \leq 250$
Предельный крен фундаментов высотных зданий	1/125	1/167	1/200	1/250	1/333	1/500
Предельная осадка фундаментов высотных зданий, см	40	30	20	-	-	-

В целом исследования и большинство нормативных документов (за исключением норм КНР) не содержат требования по ограничению деформаций оснований высотных зданий. Принятые в нормах предельные величины для зданий массовой застройки не имеют существенных различий и базируются на исследованиях, не рассматривающих высотные здания. Полученный результат показывает важность проведения исследований по определению предельных деформаций оснований фундаментов высотных зданий. На первоначальном этапе исследований необходимо выявить критерии, определяющие предельные деформации оснований высотных зданий, посредством совместного рассмотрения архитектурно-технологических и конструктивных требований, предъявляемых к деформациям высотных зданий, и результатов оценки влияния статистической неоднородности модуля деформации грунтов основания на НДС фундаментов высотных зданий.

Конструктивные и архитектурно-технологические требования, предъявляемые к деформациям высотных зданий

На основании рассмотрения работ Bjerrum [21], Poulos [34], Sholl [36] и др., а также некоторых нормативных документов [13] были обобщены требования, предъявляемые к деформациям высотных зданий (табл. 4).

Таблица 4

Критерии ограничения деформаций и их придельные величины

Критерий	Тип деформации	Предельная величина	Источник
Требования лифтового оборудования	Отклонение шахты лифта от вертикали	15 см	ТСН 50-302-96 [13]
Требования лифтового оборудования (крен определяется по деформациям основания, происходящим после монтажа лифтов)	Крен здания	1/1200-1/2000	Poulos [34]
Крен зданий, ощутимый зрительно	То же	1/300	
Крен высотных зданий, ощутимый зрительно	-«-	1/250	Bjerrum [21]
Повреждение ненесущих конструкций (отделка, перегородки и т. п.)	Относительная разность осадок	1/500	Bjerrum [21]
Повреждение несущих конструкций	То же	1/150	
Повреждение ненесущих конструкций (отделка, перегородки и т. п.)	Относительная разность осадок	1/500 … 1/1000-1/1400 (в крайних пролетах)	Poulos [34]
Повреждение несущих конструкций	-«-	1/150 - 1/250	
Повреждение ненесущих конструкций (отделка, перегородки и т. п.)	Перекос ячейки	1/1000	Scholl [36]
Повреждение несущих конструкций	То же	1/142	

Анализируя эти требования, можно сделать вывод, что наиболее жесткими являются архитектурно-технологические ограничения. В их числе можно особо выделить общий крен здания, ограничиваемый исходя из условий эксплуатации лифтового оборудования (что особенно важно для высотных зданий). Этот критерий определяет предельные значения крена как в абсолютных, так и в относительных значениях и является отличительной особенностью предельных деформаций высотных зданий относительно зданий массовой застройки. При этом на величину крена здания в процессе эксплуатации безусловно оказывает влияние крен фундамента, а в процессе возведения здания указанный крен может приводить к искривлению оси лифтовой шахты и к необходимости ее расширения.

Локальные неравномерные деформации (относительная разность осадок, перекос ячейки) в большей степени влияют на ненесущие элементы, соответственно, указанный критерий определяется только материалом отделки и конструкцией перегородок, фасадов и т. д.

Остальные типы деформаций оснований фундаментов (величины средней и абсолютной осадок, горизонтальные перемещения, относительный угол закручивания сооружения) в рассмотренных материалах конструктивными и архитектурно-технологическими требованиями не ограничиваются.

Влияние случайной неоднородности деформационных свойств основания на НДС фундаментов высотных зданий

В дополнении к анализу архитектурно-технологических и конструктивных требований была выполнена оценка влияния неоднородности модуля деформации применительно к семи различным конструктивным схемам численным методом. Рассмотрены гибкая (рис. 3*а*), промежуточные (рис. 3*б*…3*е*) и наиболее жесткая конструктивные схемы (рис. 3*ж*). Различная жесткость схем принята для определения ее влияния на величину крена и на относительную разность осадок. Варианты схем соответствуют характерным конструктивным решениям высотных зданий [8, 14, 20, 32].

Конструктивные схемы рассмотрены применительно к 40-этажному зданию размером 36×72 м с шагом несущих конструкций 6 м, толщиной фундаментной плиты 2,5 м, сечением колонн 0,7×0,7 м, стен и перекрытий – 0,2 м. Конструкции приняты железобетонные, класс бетона В40. Задачи решали в упругой постановке, с моделированием основания объемными конечными элементами КЭ). Пример рассматриваемой расчетной схемы представлен на рис. 2.

Основание принято с тремя различными вариантами базового модуля деформации E_i (i = 1, 2, 3 для задания различной величины средней осадки посредством уменьшения модуля деформации на 10 МПа на каждом шаге, начиная с 30 МПа). На основе величины базового модуля деформации, рассматриваются некоторые возможные детерминированные формы неоднородности, представленные на рис. 4 и принятые на основе коэффициента вариации V = 0,3 в соответствии с п. 5.5 ГОСТ 20522-2012. Эти формы позволяют оценить влияние статистической неоднородности модуля деформации грунта основания в плане на НДС фундаментов. При этом в соответствии с п. 5.5 ГОСТ 20522-2012 указанные неоднородности (неоднородности механических свойств ИГЭ с коэффициентом вариации до V = 0,3) допускается не учитывать и объединять грунт в единый ИГЭ с единым средним модулем деформации (вариант по форме №1 на рис. 4, без неоднородности, с базовым модулем E).

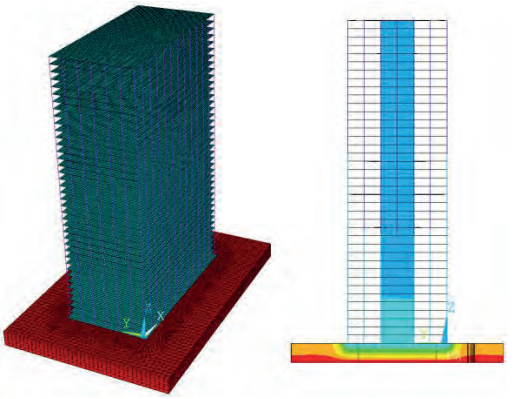


Рис. 2. Пример рассматриваемой расчетной схемы

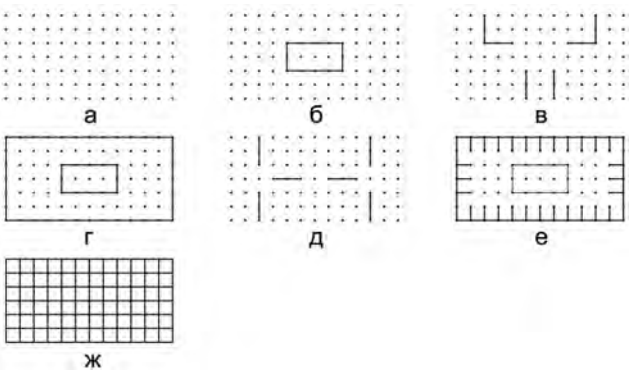


Рис. 3. Рассматриваемые конструктивные схемы высотных зданий



Рис. 4. Рассматриваемые формы неоднородности основания

В соответствии с ранее сформулированными выводами, анализу подвергаются только два параметра: крен и относительная разность осадок.

Значения параметров определяются в соответствии с рис. 5.

Крен фундамента, т. е. глобальная неравномерность деформаций, приводящая к отклонению вертикальной оси здания от вертикали, вообще является средней величиной поворота фундаментной плиты относительно центральной оси.

В данном случае крен T определялся в двух ортогональных направлениях в соответствии с формулой $|(S_1 - S_7)| / D$.

Относительная разность осадок, т. е. локальная неравномерность деформаций, не приводящая к отклонению вертикальной оси здания от вертикали, по нашему мнению, должна определяться без учета вклада крена, поскольку эта глобальная деформация плитного фундамента не может приводить к повреждениям, характерным для локальных деформаций в соответствии с табл. 4.

Величина относительной разности осадок $\Delta S/L$) определялась по значениям осадок в точках расположения вертикальных конструкций в соответствии с формулой $\Delta S/Dx \pm T$.

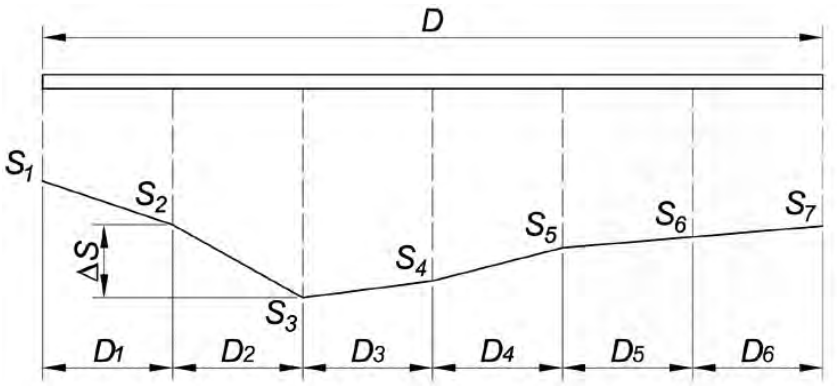


Рис. 5. Схема осадок основания

Все результаты указаны в приведенных величинах, определяемых в соответствии с зависимостью

$$\xi = X_i / X_I, \quad (1)$$

где X_1 – максимальное значение рассматриваемого параметра при модуле деформации E_1 (выделены красным в табл. 5 и 6), X_i – значение при различных модулях деформации E_i (i = 1, 2, 3) и формах неравномерности (по рис.4).

Приведенные величины средней осадки определяются в соответствии с зависимостью

$$\eta = S_i/S_1, \quad (2)$$

где S_1 – величина средней осадки при модуле деформации E_1 и форме №1 (по рис. 3); S_i – значение при различных модулях деформации E_i (i = 1, 2, 3) и форме №1 (по рис. 4).

Результаты выполненных 147 расчетов обобщены в табл. 5 и 6. В табл. 5 помещены данные по изменению приведенной относительной разности осадки $(\Delta S/L)_i/(\Delta S/L)_1$ (по формуле (1)) при учете различных форм статистической неоднородности основания и в зависимости от величины приведенной средней осадки S_i/S_1 (по формуле (2)).

Таблица 5

Данные по изменению приведенной относительной разности осадок $(\Delta S/L)_i/(\Delta S/L)_1$ в зависимости от изменения приведенной средней осадки (S_i/S_1)

		Схема "а"			Схема "б"			Схема "в"			Схема "г"			Схема "д"			Схема "е"			Схема "ж"		
		E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3
S_i/S_1		1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3
T_i/T_1	Формы неоднородности 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,45	0,72	1,52	0,46	0,72	1,54	0,44	0,70	1,49	0,53	0,80	1,62	0,45	0,71	1,52	0,53	0,80	1,61	0,54	0,81	1,62
	5	1,00	1,52	3,07	1,00	1,52	3,08	1,00	1,52	3,06	1,00	1,51	3,03	1,00	1,51	3,05	1,00	1,50	3,01	1,00	1,50	3,01
	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Максимальные значения, выделенные красным в табл. 5, представлены на рис. 6. График иллюстрирует нарастание относительной разности осадок с увеличением средней осадки для всех конструктивных схем. Очевидно, что чем гибче конструктивная схема, тем значительнее нарастает относительная разность осадок. Эти результаты подтверждает необходимость учета увеличения разности осадок при нарастании средней осадки и соответствует выводам Михеева [4], Токаря [12], Цытовича [15], Terzaghi [38] (основанным, в том числе, на материалах наблюдений) о зависимости величины локальных неравномерных деформаций от средней осадки.

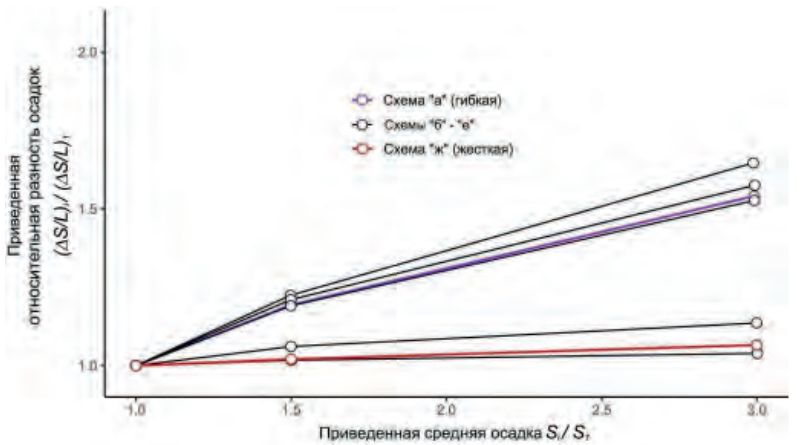


Рис. 6. Зависимость величины относительной разности осадок от средней осадки

Влияние относительной разности осадок на напряженное состояние конструкций фундаментов высотных зданий может быть достаточно корректно учтено в процессе проектирования, рассматривая возможные варианты статистических неоднородностей основания и распределений нагрузок.

Отдельно по рассмотренным формам неоднородности 4 и 5 (поскольку для схем «а», «б», «г», «д», «е», «ж» при формах неоднородности 1-3, 6, 7 крен отсутствует, для схемы «в»

крен незначителен) была исследована зависимость крена фундамента T_i/T_1 (по формуле (1)) от величины приведенной средней осадки S_i/S_1 (по формуле (2)) – см. табл. 6.

Таблица 6

Данные по изменению приведенного крена (T_i/T_1) в зависимости от изменения приведенной средней осадки (S_i/S_1)

		Схема "а"			Схема "б"			Схема "в"			Схема "г"			Схема "д"			Схема "е"			Схема "ж"		
		E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3	E_1	E_2	E_3
S_i/S_1		1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3	1	1,5	3
T_i/T_1	Формы неоднородности 4	0,45	0,72	1,52	0,46	0,72	1,54	0,44	0,70	1,49	0,53	0,80	1,62	0,45	0,71	1,52	0,53	0,80	1,61	0,54	0,81	1,62
	Формы неоднородности 5	1,00	1,52	3,07	1,00	1,52	3,08	1,00	1,52	3,06	1,00	1,51	3,03	1,00	1,51	3,05	1,00	1,50	3,01	1,00	1,50	3,01

Максимальные значения приведенных кренов, выделенные в табл. 6 красным, представлены также в виде графика (рис. 7), который иллюстрирует линейную зависимость крена, в т. ч. случайного крена, вызванного неоднородностью основания, от осадки для всех конструктивных схем. Показанные результаты свидетельствуют о необходимость учета увеличивающегося вклада случайного крена фундамента в общий крен здания при нарастании средней осадки. Полученные значения дополняют выводы Михеева [4], Токаря [12], Цытовича [15], Terzaghi [38] и отражают зависимость величины не только локальных, но и глобальных неравномерных деформаций от средней осадки.

Величина крена не оказывает влияние на напряженное состояние конструкций.

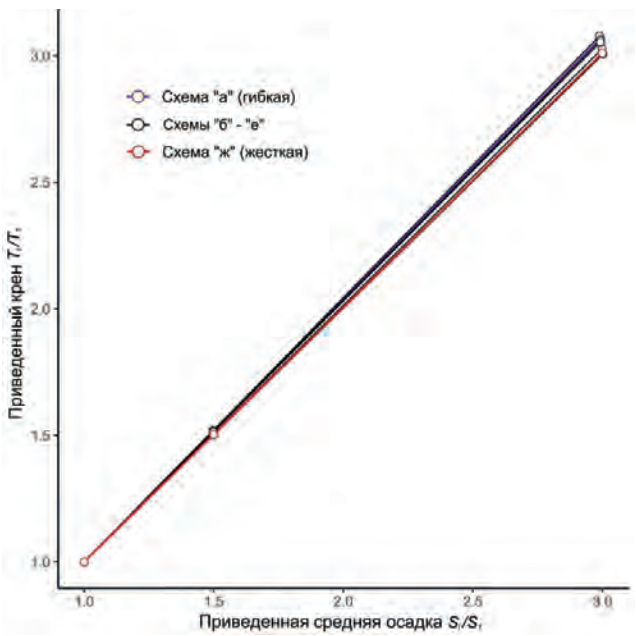


Рис. 7. Зависимость величины крена от средней осадки

Влияние величины средней осадки на напряженное состояние конструкций фундаментов (другими словами, влияние величины жесткости основания на значения усилий в фундаменте) высотных зданий также может быть достаточно корректно учтено в процессе проектирования. Соответственно, предельную осадку, не имеющую архитектурно-технологических ограничений, необходимо определять исходя из условия нарастания относительной разности осадок и крена с увеличением средней осадки.

Указанные выше архитектурно-технологические требования и полученные результаты расчетов подтверждают известный факт, что крен фундамента является ключевым критерием, ограничивающим деформации фундаментов высотных зданий, так как к этому параметру предъявляться наиболее жесткие требования (исходя из ограничения общего крена здания). Среднюю осадку необходимо ограничивать исходя из условия нарастания относительной разности осадок и крена (в том числе случайного). Для более точной оценки зависимости неравномерных деформаций от средней осадки требуется выполнить комплекс дополнительных расчетов, с более детальными методами учета неоднородности свойств основания, позволяющим оценить возможную величину случайной составляющей неравномерной осадки с определенной доверительной вероятностью. Основываться такие расчеты могут на методе Монте-Карло и на коррелированных случайных полях для моделирования реалистичных распределений деформационных характеристик грунта основания в пространстве. Расчетные предпосылки для указанных расчетов необходимо принимать с учетом работ Ермолаева [2], Соболева [6, 7], Шейнина [16, 17], Шитовой [18], Griffiths [28, 31], Shepard [35] и др.

Заключение

Существующие исследования и нормативные документы в части определения предельных деформаций зданий и сооружений, за исключением норм КНР, не рассматривают высотные здания.

Отсутствие базы результатов наблюдений за осадками фундаментов высотных зданий обуславливает наибольшую перспективность использования расчетно-теоретического метода для определения величин предельных деформаций оснований фундаментов, с верификацией полученных результатов путем сопоставления с материалами наблюдений.

Совместный анализ архитектурно-технологических требований, предъявляемых к деформациям высотных зданий, и влияния некоторых принятых форм неоднородности грунтов основания на НДС фундаментов высотных зданий показал, что ключевым критерием, ограничивающим деформации фундаментов высотных зданий, является крен фундаментов. Величину его необходимо определять с учетом случайной составляющей, зависящей от неоднородности основания и от величины средней осадки. Для этого при проведении инженерно-геологических изысканий важны не только абсолютное значение модуля деформации, но и его пространственная неоднородность. Повышение требований к оценке неоднородности грунта, в частности, к коэффициентам вариации при разделении на инженерно-геологические элементы, позволит повысить надежность и снизить стоимость фундаментов.

Для дальнейшей работы в данном направлении необходимо провести расчетно-теоретические исследования с более детальными методами учета статистической неоднородности оснований, обобщить перечень конструктивных схем высотных зданий, требующих рассмотрения, выполнить верификацию полученных результатов на основании имеющихся материалов наблюдений за осадками высотных зданий.

Библиографический список

1. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статической обработки результатов испытаний.

2. *Ермолаев Н.Н., Михеев В.В.* Надежность оснований сооружений. – Л.: Стройиздат, 1976.

3. *Клепиков С.Н.* Расчет сооружений на деформируемом основании. – Киев: НИИСК, 1996.

4. *Михеев В.В.* Исследование вопросов расчета оснований гражданских зданий по деформациям : дисс. … канд. техн. наук. – М.: НИИОСП, 1957.

5. НиТУ 127-55 Нормы и технические условия проектирования естественных оснований зданий и промышленных сооружений.

6. *Соболев Д.Н.* К расчету конструкций, лежащих на статистически неоднородном основании // Строительная механика и расчет сооружений. 1965. № 1. С. 1-4.

7. *Соболев Д.Н., Фаянс Б.Л., Шейнин В.И.* К расчету плит на статистически неоднородном основании // Строительная механика и расчет сооружений. 1968. № 3. С. 24-26.

8. Современное высотное строительство. Монография. – М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007.

9. *Сотников С.Н.* Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах : дисс. … д-ра техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1986.

10. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.

11. СНиП РК 5.01-01-2002 Основания зданий и сооружений.

12. *Токарь Р.А.* О расчете оснований по деформациям / Тр. ин-та НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. 1956. Вып. 30. С. 5-38.

13. ТСН 50-302-96 Устройство фундаментов гражданских зданий и сооружений в Санкт-Петербурге и на территориях, административно подчиненных Санкт-Петербургу. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 1997.

14. *Ханджи В.В.* Расчет многоэтажных зданий со связевым каркасом. – М.: Стройиздат, 1977.

15. *Цытович Н.А.* Механика грунтов / 3-е изд., перераб. и доп. – М. – Л.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1957.

16. *Шейнин В.И. [и др.]* Алгоритм и программа инженерного расчета фундаментных плит с учетом неравномерности нагрузки на основание и неоднородности массива // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2006. № 5. С. 2-7.

17. *Шейнин В.И. [и др.]* Вероятностный расчет основания под отдельным фундаментом по второй группе предельных состояний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1991. № 2. С. 18-21.

18. *Шитова И.В.* Об оценке надежности расчета деформаций оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1980. № 2. С. 17-20.

19. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і будівел. Основні положення. – Київ, 2018.

20. *Binder G.* Tall Buildings of China. – Victoria: CTBUH, 2015.

21. *Bjerrum L.* Allowable settlements of structures – contribution to the discussion // Proc. 3rd European Conf. On Soil Mech. and Found. Eng'g. 1963. Vol. 2. – P. 135-137.

22. *Boone S.J.* Ground movement related building damage // J. of Geotech. Eng. 1996. № 122(11). P. 886-896.

23. *Boscardin M.D., Cording E.J.* Building response to excavation-induced settlement // J.l of Geotech. Eng. 1989. № 115(1). P. 1-21.

24. *Burland J.B., Wroth C.P.* Settlement of buildings and associated damage // Proc. of a Conf. on Settlement of Structures. 1974. P. 611-654.

25. Canadian foundation engineering manual. 4th edition. – Canadian Geotechnical Society, 2006.

26. Engineer Manual 1110-1-1904 Settlement Analysis. – Washington: Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, 1990.

27. EN 1997-1:2004 Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1 : General rules. – 2004.

28. *Fenton G.A., Griffiths D.V.* Risk assessment in geotechnical engineering . New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

29. GB 5007-2011 Code for the design of buildings foundations. Beijing: Ministry of construction, 2011.

30. *Grant R., Christian J.T., Vanmarcke E.H.* Differential Settlement of Buildings // J. of the Geotech. Eng. Div. 1974. № 100(9). P. 973-991.

31. *Griffiths D.V., Fenton G.A.* Probabilistic Settlement Analysis by Stochastic and Random Finite-Element Methods // J. of Geotech. and Geoenviron. Eng. 2009. № 135(11). P. 1629-1637.

32. *Henry S., Wood A.* Tall Buildings + Urban Habitat. Vol.1. CTBUH, 2018.

33. *Meyerhof G.G.* The settlement analysis of building frames // The Structural Engineer. 1947. № 25. P. 369-409.

34. *Poulos H.G., Carter G.P., Small J.C.* Foundation and retaining structures – research and practice / Proc. of the 15th Int. Conf. on Soil Mech. and Foun. Engr. 2001. Vol. 1. P. 2527-2606.

35. *Shepard D.* A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data / Proc. 23rd Nat. Conf. ACM. New York. 1968. P. 517-524.

36. *Scholl R.E.* Brace dampers: An alternative structural system for improving the earthquake performance of buildings / Proc. of the 8th World Conf. on Earthquake Eng. – San Francisco, 1984. Vol. 5. P. 1015-1022.

37. *Skempton A.W., MacDonald D.H.* The allowable settlement of Buildings / Proc. of the Inst. of Civ. Engineers. 1956. Vol. 5. Iss. 6. P. 727-768.

38. *Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G.* Soil Mechanics in Engineering Practice. New York: John Wiley & Sons, 1996.

39. *Zhang L.*, *A.M.Y. Ng.* Limiting Tolerable Settlement and Angular Distortion for Building Foundations / Geotechnical Special Publication No. 170, Probabilistic applications in geotechnical engineering. – Denver: ASCE, 2007.

Авторы:

Роман Леонидович БАЛЕЗИН, научный сотрудник лаборатории освоения подземного пространства городов, НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Roman BALEZIN, researcher of Laboratory of development of underground space of the cities, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: rbalezin@gmail.com

Олег Александрович ШУЛЯТЬЕВ, д-р техн. наук, заместитель директора НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Oleg SHULYATYEV, D. Sci. (Engineering), Deputy Director of NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: niiosp35@yandex.ru
тел.: +7 (499) 170-27-62

Станислав Олегович ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории освоения подземного пространства городов, НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва
Stanislav SHULYATYEV, Ph. D. (Engineering), leading researcher of Laboratory of development of underground space of the cities, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: niiosp35@yandex.ru
тел.: +7 (499) 170-27-62

Анатолий Семенович БУСЛОВ, д-р техн. наук, проф., советник РААСН, главный научный сотрудник лаборатории оснований и фундаментов на слабых грунтах НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва
Anatoly BUSLOV, D. Sci. (Engineering), Prof., Adviser of RAASN, leading researcher, Laboratory of bases and foundations on the soft soils, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: a.buslov@yandex.ru