УДК 624.131

Л.В. Нуждин, М.Л. Нуждин, К.В. КозьминыхНовосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
Новосибирск, Россия**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ОСАДОК
ФУНДАМЕНТОВ ПО МЕТОДАМ СП 22.13330.2011**

Представлен анализ расчетных методов оценки деформаций оснований фундаментов согласно действующей нормативной документации – СП 22.13330.2011 (Актуализированной редакции СНиП 2.02.01–83*. Основания зданий и сооружений). Проведено сравнение результатов расчета осадок проектируемых фундаментов реальных зданий в различных грунтовых условиях при изменении расчетной схемы основания, в том числе с использованием подхода, ранее предложенного авторами на основе данных полевых исследований грунтов расклинивающим dilatометром. Сделан вывод о существенном разбросе получаемых значений и возможности повышения точности расчета корректировкой расчетной схемы основания.

Ключевые слова: осадки фундаментов, метод послойного суммирования, метод линейно-деформируемого слоя, полевые исследования грунтов, расклинивающий dilatометр РД-100.

L.V. Nuzhdin, M.L. Nuzhdin, K.V. KozminykhNovosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russian Federation**THE COMPARISON OF CALCULATION RESULTS
OF FOUNDATION SETTLEMENTS ON METHODS
SP 22.13330.2011**

This article gives an analysis of calculation method for assessing deformations of foundations under the current regulatory documents – SP 22.13330.2011 (Updated edition of SNiP 2.02.01–83*. Soil basements of buildings and structures). The calculation results precipitate projected real foundations of buildings in different soil conditions when the design basement scheme, including using the approach previously proposed by the authors based on data from field test of soils by wedge dilatometer. It is concluded that the significant variation of the obtained values and possibilities of improving the accuracy of calculation of the correction of the design basement scheme.

Keywords: foundation settlements, layer-stack design scheme, method linearly deformable layer, field test of soils, WD-100 wedge dilatometer.

Вопросам совершенствования теоретических моделей взаимодействия фундамента с грунтовым основанием, выбора наиболее адекват-

ных расчетных методов оценки осадок фундаментов, экспериментального исследования деформативности грунтов и назначения их расчетных деформационных характеристик посвящено большое количество исследований многих выдающихся геотехников. Результатом их исследований в России, в известном смысле, является Свод правил СП 22.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. Основания и фундаменты). Согласно указаниям данного нормативного документа стандартные расчеты деформаций грунтовых оснований фундаментов должны выполняться с применением расчетной схемы линейно-деформируемого полупространства методом послойного суммирования с условным ограничением глубины сжимаемой толщи H_c . В качестве границы сжимаемой толщи H_c рассматривается глубина z , где выполняется условие равенства $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$ или, для слабых грунтов (при $E \leq 7$ МПа), $\sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg}$. Глубина сжимаемой толщи при расчете осадки различных точек плитного фундамента принимается постоянной в пределах всего фундамента. Толщина расчетных слоев грунта для определения границы сжимаемой толщи и расчета осадок фундаментов может назначаться произвольно, но не более $0,4b$ ширины подошвы рассматриваемого фундамента.

Для предварительных расчетов деформаций основания фундаментов сооружений II и III уровней ответственности при среднем давлении под подошвой фундамента p , не превышающем расчетное сопротивление грунта R , допускается применять расчетную схему в виде линейно-деформируемого слоя, при соблюдении следующих условий: ширина (диаметр) фундамента $b \geq 10$ м; среднее давление под подошвой фундамента p изменяется в пределах от 150 до 500 кПа; глубина заложения фундамента от уровня планировки $d \leq 5$ м; в основании фундамента залегают грунты с модулем деформации $E \geq 10$ МПа.

Существующие методы оценки деформационных свойств грунтов, к сожалению, в целом ряде случаев не позволяют получить достоверную информацию о поведении грунтового основания фундаментов, особенно с учетом возможной неравномерности его деформируемости. Определение модулей деформации грунта любым из существующих полевых и лабораторных методов производится дискретно в отдельных точках. Полученные частные значения модулей затем, часто – вне зависимости от точности определения, усредняются с учетом принятого разбиения грунтовой толщи на инженерно-геологические элементы. Каждому инженерно-геологическому элементу, включая неоднород-

ные грунты с мелкими прослойками, присваивается единое обобщенное значение модуля деформации. Далее для анализа осадок фундаментов грунтовое основание разбивается на расчетные слои с обобщенными характеристиками в пределах выделенного инженерно-геологического элемента. При этом в большинстве расчетных моделей и схем толщина расчетных слоев регламентируется только наибольшим допустимым значением.

Данный подход можно оправдать только относительно малым количеством экспериментальных определений модуля деформации грунта. Например, для полевых дилатометрических исследований грунтов [1, 2], когда мы имеем возможность определять модуль деформации практически непрерывно по глубине, логичность и обоснованность этого подхода вызывает большие сомнения.

Вполне очевидно, что одним из направлений повышения точности расчетов осадок фундаментов может быть совершенствование полевых методов определения модуля деформации грунтов и выбор наиболее адекватной расчетной схемы основания в методе послойного суммирования. Необходимо учитывать, что, помимо достоверности определения модуля деформации грунта, на точность прогнозирования деформаций сооружений может влиять подход к его назначению в расчетной модели грунтового основания.

Ранее авторами был предложен подход к расчету деформаций оснований фундаментов на основе прямых данных полевых исследований грунтов расклинивающим дилатометром [3–5]. В данной методике предполагается принимать толщину расчетных слоев 0,2 м, соответствующую интервалам стандартного определения модуля деформации дилатометром РД-100. Использование машинного счета существенно упрощает процесс вычислений, для этого был разработан пакет специализированных программ, адаптированных к материалам обработки результатов исследования грунтов расклинивающим дилатометром. Использование в расчете действительных значений модуля деформации $E_{рд}$ (рис. 1) позволяет учитывать фактическое сложение грунтового основания, что повышает точность расчета. Если для фундаментов с относительно небольшими размерами в плане это происходит за счет учета неравномерного изменения деформируемости грунтов по глубине активной зоны основания, то для фундаментных плит при расчете осадок рекомендуется выполнять оценку их возможной неравномерности в плане [4].

Сравнительный анализ результатов, получаемых при разных расчетных схемах основания, выполнялся при проектировании целого ряда жилых и общественных зданий в различных грунтовых условиях Новосибирска. В том числе были рассмотрены площадки с однородными и неоднородными основаниями, сложенными как слабыми, так и относительно малосжимаемыми грунтами. Сравнительные расчеты по СП 22.13330.2011 с использованием разной толщины расчетных слоев и модулей деформации грунтов, взятых непосредственно по результатам дилатометрических исследований и после их статистической обработки в пределах инженерно-геологических элементов, проводились для плитных фундаментов достаточно больших размеров, а также для столбчатых и ленточных фундаментов.

Расчет осадок основания фундаментов выполнялся с использованием прямых определений значений дилатометрического модуля деформации грунтов $E_{\text{дил}}$ при толщине расчетных слоев $h_i = 0,2$ м и осредненных расчетных модулей деформации $E_{\text{расч}}$, постоянных для каждого ИГЭ, при толщине $h_i = 0,2$ м, $0,1b$, $0,2b$, $0,3b$ и $0,4b$ – ширины подошвы проектируемых фундаментов. Также расчет деформаций основания был проведен методом линейно-деформируемого слоя, который применяется для предварительной оценки величины осадки фундамента. Ниже в таблице приведены результаты расчетов при изменении давления под подошвой от 25 до 100 % для плитных фундаментов с одинаковыми размерами подошвы $30,00 \times 30,00$ м ($29,8 \times 29,8$ м).

Расчетные значения осадок плитных фундаментов

$A = 30 \times 30$ м ($29,8 \times 29,8$ м)

Толщина расчетных слоев h_i	Осадки S , мм, при изменении давления p под фундаментом			
	25 %	50 %	75 %	100 %
Площадка по ул. Выборная, $p = 380$ кПа				
<i>метод линейно-деформируемого слоя</i>				
—	—	61,18	98,15	134,06
<i>метод послойного суммирования</i>				
0,2 м ($E_{\text{расч}}$)	2,71	37,17	80,96	129,39
$0,1b \leq 3$ м ($E_{\text{расч}}$)	6,16	43,99	91,25	143,10
$0,2b \leq 6$ м ($E_{\text{расч}}$)	8,99	49,63	99,66	154,33
$0,3b \leq 9$ м ($E_{\text{расч}}$)	—	49,55	99,47	154,10
$0,4b \leq 12$ м ($E_{\text{расч}}$)	—	—	99,19	153,60
0,2 м ($E_{\text{дил}}$)	2,30	34,79	75,63	122,50

Площадка по ул. Рихарда Зорге, $p = 280$ кПа				
метод линейно-деформируемого слоя				
—	—	—	206,19	220,00
метод послойного суммирования				
0,2 м ($E_{расч}$)	—	44,46	117,24	191,17
$0,1b \leq 3$ м ($E_{расч}$)	—	46,05	119,61	194,33
$0,2b \leq 6$ м ($E_{расч}$)	—	45,60	118,74	193,05
$0,3b \leq 9$ м ($E_{расч}$)	—	45,43	118,42	192,59
0,2 м ($E_{дил}$)	—	45,97	116,37	190,42
Площадка по ул. Залесского, $p = 390$ кПа				
метод линейно-деформируемого слоя				
—	—	77,53	128,58	193,00
метод послойного суммирования				
0,2 м ($E_{расч}$)	3,51	48,55	113,18	182,63
$0,1b \leq 3$ м ($E_{расч}$)	6,24	53,93	121,21	193,34
$0,2b \leq 6$ м ($E_{расч}$)	9,15	59,77	129,93	204,97
$0,3b \leq 9$ м ($E_{расч}$)	9,65	59,52	130,04	208,48
0,2 м ($E_{дил}$)	3,17	47,82	113,71	182,20

Грунтовые условия площадки строительства по ул. Выборной характеризовались наличием в активной зоне основания фундаментов до 28,0–35,0 м одного слоя грунта – супеси пылеватой твердой малой степени водонасыщения с прослоями песка. По данным полевых исследований деформируемости грунта расклинивающим дилатометром РД-100 в слое было выделено два инженерно-геологического элемента, различающихся только по модулю деформации. Верхняя толща супеси до глубины 7,1–9,2 м характеризовалась относительно низкими значениями модуля деформации $E = 4,8 \dots 13,5$ МПа ($E_{расч} = 11,8$ МПа). Нижняя толща – глубже 7,2–9,2 м – имела более высокие значения модуля деформации $E = 13,1 \dots 36,7$ МПа ($E_{расч} = 28,0$ МПа). В супеси прослеживались прослои песка с более высокими значениями модуля деформации ($E = 42,2 \dots 54,3$ МПа). Грунтовые воды отсутствовали.

Особенностью грунтовых условий строительной площадки по ул. Рихарда Зорге являлось наличие значительной мощности достаточно слабых водонасыщенных грунтов.

Рис. 1. Результаты испытаний грунтов расклинивающим dilatометром РД-100 на строительных площадках по ул. Выборная (а) и ул. Залесского (б)

В основании фундаментной плиты были выделены следующие инженерно-геологические элементы (сверху – вниз):

ИГЭ-3. Суглинок тяжелый пылеватый водонасыщенный тугопластичный тугопластичный, мощностью 0,8 м, $E_{расч} = 7,8 \text{ МПа}$;

ИГЭ-4. Суглинок тяжелый пылеватый водонасыщенный текучепластичный, мощностью 2,2 м, $E_{расч} = 9,0 \text{ МПа}$;

ИГЭ-5. Суглинок легкий пылеватый водонасыщенный текучий, мощностью 7,2 м, $E_{расч} = 7,1 \text{ МПа}$;

ИГЭ-6. Суглинок легкий пылеватый водонасыщенный тугопластичный, мощностью 5,4 м, $E_{расч} = 8,9 \text{ МПа}$;

ИГЭ-7. Супесь песчанистая водонасыщенная, мощностью 2,6 м, $E_{расч} = 15,4 \text{ МПа}$;

ИГЭ-8. Песок средней крупности водонасыщенный плотный, вскрытой мощностью 12,5 м, $E_{расч} = 25,5 \text{ МПа}$.

Грунтовые воды находились практически на уровне подошвы плиты. Верхняя часть геологического разреза под фундаментами до глубины более 15 м была сложена слабыми грунтами, $E_{расч} < 10 \text{ МПа}$.

Грунтовое основание фундаментов на площадке по ул. Залесского было представлено относительно малосжимаемыми грунтами. По материалам изысканий ниже фундаментов были выделены следующие инженерно-геологические элементы:

ИГЭ-2. Супесь песчанистая малой степени водонасыщения твердая с прослоями песка, мощностью 6,6 м, $E_{\text{расч}} = 15,0$ МПа;

ИГЭ-3. Суглинок легкий пылеватый насыщенный водой тугопластичный с прослоями полутвердого и супеси, мощностью 1,6 м, $E_{\text{расч}} = 13,2$ МПа;

ИГЭ-4. Суглинок легкий пылеватый насыщенный водой текучепластичный с прослоями мягкопластичной супеси, мощностью 5,4 м, $E_{\text{расч}} = 12,8$ МПа;

ИГЭ-5. Супесь пылеватая насыщенная водой пластичная с прослоями текучей и суглинка, мощностью 2,4 м, $E_{\text{расч}} = 15,3$ МПа;

ИГЭ-6. Суглинок легкий пылеватый насыщенный водой мягкопластичный с прослоями тугопластичного, мощностью 2,2 м, $E_{\text{расч}} = 13,4$ МПа;

ИГЭ-7. Супесь пылеватая, насыщенная водой, пластичная с прослоями текучей и суглинка, вскрытой мощностью 14,2 м, $E_{\text{расч}} = 18,4$ МПа.

Установившийся уровень грунтовых вод был зафиксирован на глубине приблизительно 9,3 м. Грунтовые условия площадок по ул. Залесского (а также по ул. Рихарда Зорге) не позволяли задаваться толщиной расчетных слоев более 9,0 м (0,3b).

Полученные материалы показывают, что учет реального распределения деформационных свойств грунта может существенно (до 20–26 % – на площадке по ул. Выборная) сказываться на результатах вычислений. При малых нагрузках на фундаментные плиты $p \ll R$ (на начальных этапах нагружения) формальное назначение толщины расчетных слоев может приводить к завышению расчетных осадок до 2–3 раз. Для основания, сложенного слабыми водонасыщенными суглинками (на площадке по ул. Рихарда Зорге), использование частных значений модуля деформации грунта по глубине $E_{\text{рд}}$, а также выбор толщины расчетных слоев не оказали ощутимого значения на получаемые результаты (2–3 %).

Рис. 2. Расчетные осадки фундаментов зданий на ул. Выборная (а) и на ул. Залесского (б) по данным полевых испытаний грунтов при толщине расчетных слоев $h_i = 0,2$ м: 1 – столбчатый фундамент $A = 3 \times 3$ м² ($E_{рд}$); 2 – столбчатый фундамент $A = 3 \times 3$ м² ($E_{расч}$); 3 – ленточный фундамент $b = 3$ м ($E_{рд}$); 4 – ленточный фундамент $b = 3$ м ($E_{расч}$)

Наряду с плитными фундаментами достаточно больших размеров в тех же грунтовых условиях были проанализированы результаты расчета столбчатых квадратных в плане и ленточных фундаментов с шириной подошвы до 3,0–3,6 м. Глубина заложения фундаментов составляла 1,80–2,40 м. Расчет осадок проводился аналогично расчету для плитных фундаментов.

Полученные различия в результатах расчета в грунтовых условиях на ул. Выборной достаточно велики как для столбчатых (до 35 %), так и для ленточных (до 23 %) фундаментов. Они показаны на рис. 2, а. Здесь приведены результаты расчета осадок для одинаковой мощности сжимаемой толщи при толщине расчетных слоев $h_i = 0,2$ м. Для грунтовых условий на ул. Залесского результаты расчета осадок фундаментов приведены на рис. 2, б. На данной площадке также наблюдается существенное влияние на результаты вычислений: 19–20 % – для столбчатого фундамента и 8–17 % – для ленточного фундамента. Различия в результатах расчета осадок столбчатых и ленточных фундаментов при $b = 3,0 \dots 3,6$ м на слабых водонасыщенных грунтах достигают 7–8 %.

Необходимо отметить, что в приведенных выше результатах расчета мощность активной зоны основания для каждой ступени нагружения фундаментов принималась постоянной (при разной толщине расчетных слоев грунта), а повышение точности расчета деформаций оснований возможно также за счет корректировки глубины сжимаемой

толщи. Использование в расчетах предложенной методики с разбиением грунтовой толщи на расчетные слои толщиной 0,2 м позволяет наиболее точно подходить к назначению глубины сжимаемой толщи основания фундаментов.

Приведенные выше примеры проектных решений фундаментов жилых и общественных зданий в Новосибирске в настоящее время полностью или частично реализованы в натуре (рис. 3). За осадками фундаментов всех зданий на стадии строительства и первого периода эксплуатации проводится геодезическое наблюдение.

Рис. 3. Возведенный 26-этажный жилой дом по ул. Залесского; строящиеся 28-этажный дом по ул. Выборной и 18-этажный дом по Р. Зорге

Как показывают результаты сравнения расчетных и регистрируемых осадок, в случае применения полевых дилатометрических испытаний грунтов, позволяющих получать достоверные значения модуля деформации грунтов практически непрерывно по глубине сжимаемого массива, прямое использование этих значений способно существенно повлиять на точность вычислений. Интересно, что для различных грунтовых условий получаемые данные по фактическому изменению модуля деформации с глубиной имеют свои закономерности, и заранее спрогнозировать величину, а в отдельных случаях даже направление тенденции в уточнении результатов расчета практически невозможно.

Особенно важно заметить, что предложенный подход к расчету осадок позволяет достаточно точно спрогнозировать и оценить возможную неравномерность осадок здания, обусловленную имеющейся неоднородностью сложения грунтового основания. С этой целью для плитных фундаментов полевые дилатометрические исследования модуля деформации грунтов и расчет осадок целесообразно проводить как минимум в пяти точках (под центром и углами плиты).

Следует отметить, что статистическая обработка данных определения модуля деформации после выделения инженерно-геологических элементов и последующее использование обобщенных усредненных по видам грунтов значений в ряде случаев вообще не позволяют достоверно оценить процесс деформирования. Например, это имеет место для неоднородных грунтов с мелкими прослойками, отличающимися по деформационным свойствам от основного массива. Разброс в прогнозных значениях деформаций зависит от характера распределения действующих напряжений, степени неоднородности деформационных свойств и особенностей залегания грунтов в активной зоне основания.

Полученные материалы исследований показывают, что для повышения точности прогнозирования деформаций грунтовых оснований и осадок фундаментов сооружений необходимо не только увеличивать достоверность экспериментальных исследований грунтов и совершенствовать теоретические модели оснований, но и рационально подходить к выбору расчетной схемы совместно с анализом особенностей определения деформационных характеристик грунта.

Библиографический список

1. Лавров С.М., Нуждін Л.В., Писаненко В.П. Розклинюючий дилатометр для дослідження деформаційних властивостей ґрунтів // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2001. – Вип. 4. – С. 316–319.
2. Nuzhdin L.V. Field testing of the soil deformation properties for calculation foundation with static and dynamic load // From Research to Design in European Practice: Proceedings of full papers of the XIV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering. – Bratislava: SUT, 2010. – 6 p.
3. Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Козьминых К.В. Методика полевых исследований деформируемости грунтов расклинивающим дила-

тометром и расчета осадок фундамента по СП 22.13330.2011 // Современные геотехнологии в конф. / СПбГАСУ. – СПб., 2014. – Ч. 2. – С. 122–130.

4. Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Козьминих К.В. Підвищення точності прогнозування осідань фундаментів на основі польових досліджень деформованості ґрунтів розкльонивальним дилатометром // Збірник наукових прац. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38), т. 2. – С. 258–273.

5. Evaluation of deformation properties of soils using a wedge dilatometer and improvement of forecast accuracy of buildings settlement / L. Nuzhdin, M. Nuzhdin, X. Kozminykh [et al.] // Challenges and innovations in Geotechnics: Proc. of ATC7 Workshop, 18ICSMGE. – Paris: Presses des Ponts, 2013. – P. 68–75.

References

1. Lavrov S.N., Nuzhdin L.V., Pisanenko V.P. Wedge dilatometer for soils deformation properties evaluation. *Bulletin of Odessa State Academy of Architecture and Civil Engineering*, 2001, no. 4, pp. 316-319.

2. Nuzhdin L.V. Field testing of the soil deformation properties for calculation foundation with static and dynamic load. From Research to Design in European Practice: Proceedings of full papers of the XIV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 2010, Bratislava, SUT (on CD-ROM insert. 6 p.)

3. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozminykh K.V. Metodika polevykh issledovaniy deformiruемости gruntov rasklinivayushchim dilatometrom i rascheta osadok fundamenta po SP 22.13330.2011 [Methods of field research of soil deformability by wedging dilatometer and calculation of precipitation according SP 22.13330.2011]. *Modern Geotechnology for Construction and It Scientific and Technical Support: Proceedings of International Scientific and Technical Conference*. St.-Petersburg, 2014, vol. 2, pp. 122-130.

4. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozminykh K.V. Improvement of forecast accuracy of foundations based on field research deformability of the soil wedge dilatometer. *Scientific works: edition: Industrial Engineering & Construction*. Poltava, 2013, no. 3 (38), vol. 2, pp. 258-273.

5. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Kozminykh K.V. [et al.]. Evaluation of deformation properties of soils using a wedge dilatometer and

improvement of forecast accuracy of buildings settlement. *Proceedings. of ATC7 Workshop, 18ICSMGE “Challenges and innovations in Geotechnics”*. Paris: Presses des Ponts, 2013, pp. 68-75.

Об авторах

Нуждин Леонид Викторович (Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru).

Нуждин Матвей Леонидович (Новосибирск, Россия) – начальник НИВЦ «Геотехника» Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (e-mail: 89139059520@mail.ru).

Козьминых Ксения Вячеславовна (Новосибирск, Россия) – магистрант Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (e-mail: xenia0822@mail.ru).

About the authors

Nuzhdin Leonid Viktorovich (Novosibirsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Head of Department EGBF, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (e-mail: nuzhdin_ml@mail.ru).

Nuzhdin Matvey Leonidovich (Novosibirsk, Russian Federation) – Head of RVC “Geotechnics”, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (e-mail: 89139059520@mail.ru).

Kozminykh Kseniya Vyacheslavovna (Novosibirsk, Russian Federation) – Undergraduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (e-mail: xenia0822@mail.ru).

Получено 08.04.2014