

Ю.А. Киричек, д.т.н., профессор
А.В. Трегуб, с.н.с.

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ОСНОВАНИЙ

Предложена методика расчета фундаментов мелкого заложения с учетом нелинейных свойств оснований и коэффициентов безопасности.

Ключевые слова: расчетное сопротивление основания, нелинейный метод, надежность, коэффициент безопасности.

Ю.О. Кірічек, д.т.н., професор
А.В. Трегуб, с.н.с.

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ФУНДАМЕНТІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОСНОВ

Запропоновано методіку розрахунку фундаментів мілкового закладання з урахуванням нелінійних властивостей основ і коефіцієнтів безпеки.

Ключові слова: розрахунковий опір основи, нелінійний метод, надійність, коефіцієнт безпеки.

Yu. Kirichek, Prof., DrSc.
A. Tregub, scientist

Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture

ANALYSIS OF SHALLOW FOUNDATION WITH NONLINEAR PROPERTIES

Analysis of shallow foundations with nonlinear properties and coefficients of safety is offered.

Keywords: resistance of the bases, non-linear method, reliability, coefficient of safety.

Введение. Действующие строительные нормы [1] рекомендуют рассчитывать фундаменты по деформациям оснований на основе линейных или нелинейных расчетных моделей. Наиболее широко на практике применяются линейные модели с соблюдением критерия $P \leq R$, и хотя нормы допускают использование нелинейных расчетных моделей при $P \leq 1,3R$, в практике проектирования это не находит применения из-за отсутствия надежных методов расчета в нелинейной стадии зависимости осадок от давления. Поэтому усовершенствование методов расчета фундаментов мелкого заложения является актуальным.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Известны исследования [2], указывающие на перегрузку слабых грунтов и нерациональное использование несущей способности прочных оснований при принятии в качестве допускаемого давления величину расчетного сопротивления. Анализ опытных данных и результаты расчетов [3] позволяют сделать вывод о том, что расчетное сопротивление основания

не всегда целесообразно принимать в качестве допускаемого давления на грунт, как с точки зрения экономичности, так и надежности. В исследованиях [4] установлены резервы несущей способности оснований, которые можно использовать без снижения условий надежности, что позволит проектировать более экономичные конструкции фундаментов.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Ю.К. Зарецкий в работе [5] указывает на необходимость проектирования фундаментов по принципу недопущения предельных состояний, обеспечивающихся коэффициентами запаса, имеющими вероятностную природу или носящими детерминированный характер.

Постановка задания. Задачей исследований являлась разработка методики расчета фундаментов мелкого заложения, позволяющая не ограничивать давление на основание величиной расчетного сопротивления и в то же время обеспечивать надежность проектных решений. Другими словами, при превышении давлением величины расчетного сопротивления основания необходим запас прочности грунтов, исключающий возможность наступления предельных состояний, при котором несущая способность еще далеко не исчерпана и осадки не превышают предельных значений.

Основной материал и результаты. Выполненные исследования позволяют предложить методику расчета оснований фундаментов с использованием нелинейных методов, при этом допускаемое давление по первой группе предельных состояний определяется на основе предельного сопротивления и коэффициентов, учитывающих различные факторы геотехнического риска и тем создают достаточный запас прочности. В зарубежной литературе [6] подобный смысл вложен в коэффициенты безопасности, разработке которых посвящена настоящая статья. Требования второй группы удовлетворяются не превышением расчетными осадками предельной величины.

Допускаемым давлением P на грунтовое основание фундаментов мелкого заложения назначается меньшее из условий

$$P \leq P_b \text{ и } P \leq P_s, \quad (1)$$

где P_s – безопасное давление на грунт по прочности; P_b – давление на грунт, соответствующее предельному значению осадки S_u .

Безопасное давление на основание по первому предельному состоянию

$$P_s = P_u / \gamma_s, \quad (2)$$

где P_u – предельное сопротивление грунтов основания [1]; γ_s – коэффициент безопасности, назначаемый в зависимости от вида здания (сооружения), уровня его ответственности, чувствительности строительных конструкций к неравномерным деформациям, стабильности нагрузок, вида грунта (надежности определения характеристик и их неоднородности) и надежности расчетной модели.

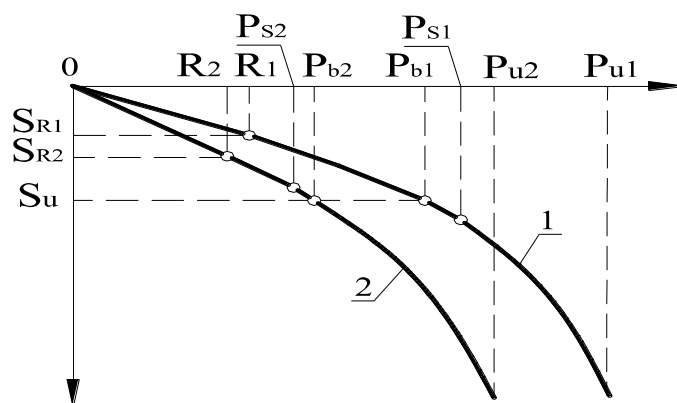


Рис. 1. Ограничение давления по подошве фундамента: по кривой осадок 1 – величиной предельной осадки S_u ; по кривой 2 – из условия обеспечения прочности основания с учетом коэффициента безопасности

Коэффициент безопасности γ_s предлагается определять по формуле

$$\gamma_s = \gamma_{s1} \cdot \gamma_{s2} \cdot \gamma_{s3} \cdot \gamma_{s4}, \quad (3)$$

где γ_{s1} – зависит от характеристик здания; γ_{s2} – коэффициент по нагрузке; γ_{s3} – коэффициент по грунту; γ_{s4} – коэффициент, учитывающий погрешности методов расчета.

Коэффициент безопасности γ_{s1} определяется по формуле

$$\gamma_{s1} = \gamma_{11} \cdot \gamma_{12}, \quad (4)$$

где γ_{11} – коэффициент в зависимости от ответственности здания; γ_{12} – коэффициент чувствительности здания к неравномерным деформациям.

Коэффициент безопасности по грунту

$$\gamma_{s3} = \gamma_{31} \cdot \gamma_{32} \cdot \gamma_{33}, \quad (5)$$

где γ_{31} – коэффициент условий работы основания; γ_{32} – коэффициент, который учитывает погрешность, вносимую методом определения характеристик грунтов; γ_{33} – учитывает неоднородность характеристик грунтов основания.

Далее приведем некоторые результаты исследований по определению коэффициентов безопасности к предлагаемой методике, в которой учитываются и коэффициенты действующих строительных норм. Коэффициент назначения зданий и сооружений γ_{11} по своему смыслу и значениям соответствует коэффициенту надежности γ_n норм [1], в котором предусмотрены три уровня ответственности. Коэффициент условий работы основания γ_{31} соответствует γ_c , согласно требованиям нормативного документа [1] $\gamma_{31} = 1/\gamma_c$. Коэффициент γ_{32} назначается в зависимости от методов определения характеристик грунтов и предложен по аналогии с коэффициентом k к формуле Е.1 норм [1].

Коэффициенты безопасности по нагрузке зависят от материалов конструкций и точности определения нагрузок в соответствии с рекомендациями нормативного документа [7] и должны учитывать предполагаемые изменения их в процессе эксплуатации. Изменчивость нагрузок в практике проектирования оснований характеризуется

коэффициентом перегрузки, который отражает вероятностно-статистическую природу их воздействия. Величина коэффициентов перегрузки колеблется в пределах 0,9 – 1,4 [8]. Согласно исследованиям [9], давление по подошве приближенно может моделироваться законом нормального распределения с коэффициентом вариации примерно $v_p=0,10$.

Коэффициенты безопасности, характеризующие неоднородность характеристик грунтов определены, согласно предложениям проф. Ю.К. Зарецкого [5] о возможности разработки коэффициентов запаса на основе вероятностного расчета, поскольку характеристики грунтов имеют вероятностную природу. Использование нормированных коэффициентов обеспечит недопущение предельных состояний [5]. С использованием методики статистических испытаний, предложенной А.К. Бугровым в работе [10], выполнены расчеты оснований по первой группе с использованием вероятностного подхода, что позволило исследовать работу оснований при неблагоприятных сочетаниях значений характеристик грунта. Неоднородность грунтов учитывалась коэффициентом безопасности $\gamma_{33}=P_u/P^*$ (табл. 1), где P_u – предельное сопротивление, согласно детерминированному расчету по нормативной методике [1], а P^* – допускаемое давление на основание, полученное на основе вероятностного расчета. Прочностные характеристики грунта моделировались приближенным распределением нормального закона, и проверялась достоверность полученных данных на наличие грубых ошибок и отклонений. В качестве критерия надежности принималось давление, при котором уровень надежности составлял $N \geq 0,9975$, что является оптимальным, согласно исследованиям [8]. Рассчитаны фундаменты с шириной подошвы $b=1...5$ м с глубиной заложения 2 м. Уровень надежности для песчаного основания при вариации прочностных характеристик $v(\varphi, c)=0,2$ изменялся от $N=0,72$ при $k=P_u/P=1,0$ до $N=1,0$ при $k=3,04$, а для суглинка от $N=0,84$ при $k=1,0$ до $N=1,0$ при $k=1,8$.

Таблица 1. Коэффициенты безопасности γ_{33} , учитывающие неоднородность грунтов

Грунт	Коэф. вариации $v(\varphi, c)$	Коэффициенты γ_{33} при ширине фундамента в метрах	
		1	5
Песок мелкий средней плотности	0,1	1,38	1,41
	0,2	2,76	3,04
Супесь пластичная	0,1	1,19	1,25
	0,2	1,93	2,0
Суглинок мягкопластичный	0,1	1,12	1,13
	0,2	1,50	1,81
Глина мягкопластичная	0,1	1,09	1,11
	0,2	1,15	1,40

Использование значений коэффициентов безопасности, приведенных выше в табл. 2, нецелесообразно, поскольку уровень надежности в

расчетах с их увеличением сохранялся на высоком уровне и составлял $H=0,998...1,0$.

В работе [11] расчеты нелинейных осадок и учет их неравномерностей рекомендуется проводить на вероятностной основе. Для учета возможных неравномерностей осадок фундаментов за счет неоднородности грунтов выполнено моделирование характеристик грунтов основания как случайных величин с заданными коэффициентами вариации.

Смоделированные характеристики грунтов основания использованы для расчета осадок линейными и нелинейными методами, после чего выполнена оценка вероятных неравномерностей осадок в зависимости от величины средней осадки (рис. 2). С увеличением разброса характеристик грунтов диапазон возможных осадок существенно изменялся. При варьировании характеристик грунтов $v(\varphi, C, E) = 0,2$ коэффициенты вариации осадок при давлении, равном R , составили $v(S_R) = 0,2$, расчетного сопротивления $v(R) = 0,42...0,44$, предельного сопротивления $v(P_u) = 0,56...0,88$. С.Г. Кушнер отмечает [12], что доля разности осадок от максимальной колеблется от 33 до 75 %. Неравномерность осадок, согласно проведенным вероятностным расчетам, может составить примерно 60 % от величины средней осадки, т.е. $\Delta S_{вер} \approx 0,6 S_u$ (рис. 2). Предполагается, что снижение давления на основание в диапазоне $P_1 \div P_2$ (рис. 3), соответствующих значениям осадок S_u и $S_{доп}$, позволит уменьшить вероятность влияния неравномерных осадок на состояние строительных конструкций, уменьшить трещинообразование и т.п.

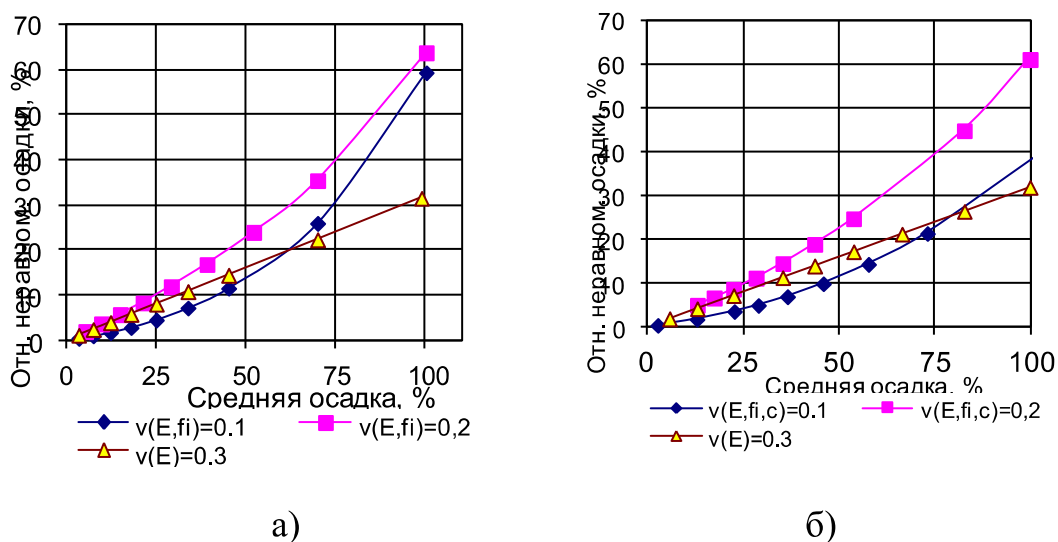


Рис. 2. Зависимость неравномерности осадок ΔS от средней осадки S :
а) песчаного основания; б) основания из супеси

Допустимая осадка из условия непревышения величины предельной относительной её разности составит

$$S_{доп} = S_u - \Delta S_{вер} + \left(\frac{\Delta S}{L} \right)_u \cdot L. \quad (6)$$

Коэффициент безопасности определен как отношение давлений $\gamma_{12}=P_1/P_2$ (рис. 3).

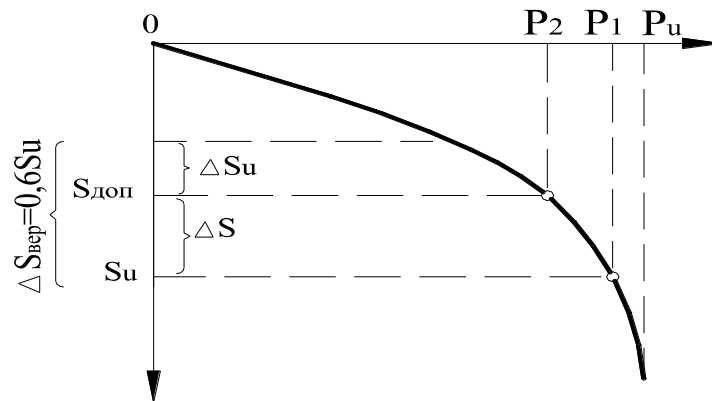


Рис. 3. Схема к определению коэффициента γ_{12} по графику осадок

Данный параметр зависит от характеристик грунтов, размеров фундаментов и конструктивной схемы сооружения, поскольку нормы [1] регламентируют различные предельные величины относительной разности осадок $(\Delta S/L)_u$. Выполнены расчеты фундаментов с шириной подошвы $b = 1 \dots 10$ м и глубиной $d = 1 \dots 5$ м на плотных и средней плотности песках и глинистых основаниях различной консистенции (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты γ_{12} , учитывающие чувствительность здания к неравномерным деформациям

Грунт	Коэффициенты γ_{12} при конструктивной схеме здания				
	кирпичные здания при шаге несущих стен 6 м	с полным ж/б каркасом и шагом колонн 6 м	с полным ж/б каркасом и шагом колонн 12 м	с полным стальным каркасом и шагом колонн 6 м	с полным стальным каркасом и шагом колонн 12 м
Песок мелкий и пылеватый плотный	$\frac{1,14-1,53}{1,32-1,57}$	$\frac{1,14-1,49}{1,31-1,51}$	$\frac{1,07-1,23}{1,14-1,24}$	$\frac{1,08-1,37}{1,20-1,40}$	$\frac{1,02-1,1}{1,05-1,10}$
Песок мелкий и пылеватый средней плотности	$\frac{1,09-1,48}{1,25-1,54}$	$\frac{1,09-1,45}{1,25-1,50}$	$\frac{1,04-1,21}{1,12-1,23}$	$\frac{1,05-1,33}{1,16-1,38}$	$\frac{1,01-1,09}{1,04-1,10}$
Супесь пластичная	$\frac{1,08-1,45}{1,20-1,52}$	$\frac{1,09-1,42}{1,21-1,48}$	$\frac{1,04-1,20}{1,10-1,22}$	$\frac{1,05-1,30}{1,13-1,36}$	$\frac{1,01-1,08}{1,03-1,09}$
Суглинок туго- и мягкопластичный	$\frac{1,07-1,41}{1,16-1,49}$	$\frac{1,08-1,39}{1,17-1,46}$	$\frac{1,04-1,18}{1,08-1,21}$	$\frac{1,04-1,27}{1,10-1,34}$	$\frac{1,01-1,07}{1,03-1,09}$
Глина туго- и мягкопластичная	$\frac{1,07-1,39}{1,14-1,47}$	$\frac{1,08-1,37}{1,15-1,44}$	$\frac{1,04-1,17}{1,07-1,20}$	$\frac{1,04-1,25}{1,09-1,32}$	$\frac{1,01-1,07}{1,02-1,08}$

* в числителе приведены данные для фундаментов с шириной подошвы $b=1 \div 10$ м и глубиной $d=1$ м, в знаменателе – для $b=1 \div 10$ м и $d=5$ м.

Предполагается, что коэффициенты безопасности γ_{s4} будут учитывать погрешности, вносимые методами расчета и должны устанавливаться на основе сравнительного анализа вычисленных и опытных данных. Достоверность методов расчета осадок в нелинейной стадии оценена на основании вычисленных отклонений расчетных осадок от экспериментальных в контролируемых точках графика (использованы данные 11 штампо-опытов на песчаных и глинистых основаниях). Коэффициент безопасности определен как отношение давлений в интервале равных осадок. В случае сходимости опытных и расчетных осадок $\gamma = P_1/P_2 = 1$.

Таблица 3. Коэффициенты, учитывающие погрешности расчета осадок

Метод	Интервал нагрузок		
	$R < P \leq 1,2R$	$1,2R < P \leq 1,5R$	$1,5R < P \leq 2R$
Клепиков С.Н.	1,0...1,35	1,35 ...1,6	1,6...1,51
Малышев М.В.	1,0...1,3	1,3...1,7	1,7...1,24
Кушнер С.Г.	1,0...1,2	1,2...1,38	1,38...1,17
Попов Б.П.	1,0...1,15	1,15...1,41	1,41...1,42
Нормы [1]	1,0...1,37	–	–

Выводы. Предложена методика расчета фундаментов мелкого заложения, не ограничивающая допустимое давление на основание величиной расчетного сопротивления. Надежность проектных решений достигается применением коэффициентов безопасности, позволяющих учитывать различные факторы геотехнического риска и исключить возможность достижения основанием предельных состояний.

Литература

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основания и фундаменты сооружений: Минрегионстрой Украины. – К.: НИИСК. – 78 с.
2. Трофименков, Ю.Г. О расчете фундаментов мелкого заложения по различным нормам / Ю.Г. Трофименков, В.В. Михеев / Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1999. – №2. – С. 18 – 21.
3. Киричек, Ю.А. Оценка несущей способности оснований фундаментов мелкого заложения / Ю.А. Киричек, А.В. Трегуб // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. Вып. 48 ч. 3. – Д.: ПГАСА, 2009. – С. 213 – 218.
4. Киричек, Ю.А. Методика расчета фундаментов мелкого заложения с использованием нелинейных методов / Ю.А. Киричек, А.В. Трегуб // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. (будівництво). – Вип. 75. – Кн. 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 95 – 102.
5. Зарецкий, Ю.К. Расчеты сооружений и оснований по предельным состояниям / Ю.К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2003. – № 3. – С. 2 – 9.
6. Manjriker, A. Foundation Engineering / A. Manjriker, I. Gunarante//New York: Taylor and Francis, 2006. – 608 p.
7. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия: Минрегионстрой Украины. – К.: НИИСК. – 78 с.

8. Ермолаев, Н.Н. Надежность оснований сооружений / Н.Н. Ермолаев, В.В. Михеев. – Л.: Стройиздат. Ленинградское отд-ние, 1976. – 152 с.

9. Харченко, М.О. Імовірнісне оцінювання напружено-деформованого стану штучних основ фундаментів / М.О. Харченко, Ю.Л. Винников // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. (будівництво). – Вип. 75. – Кн. 1 – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 157–164.

10. Бугров, А.К. Расчет надежности по осадке упругопластического основания методом статистических испытаний / А.К. Бугров, В.Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – №3. – СПб, 2000. – С. 17–25.

11. Далматов, Б.И. К вопросу о расчете оснований зданий / Б.И. Далматов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1992. – № 1. – С. 6–7.

12. Кушнер, С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений / С.Г. Кушнер. –З.: ООО «ИПО Запорожье», 2008. – 496 с.

Надійшла до редакції 25.09.2013

© Ю.О. Кірічек, А.В. Трегуб