

УДК 624.15.001:622.833.5

к.т.н. Шаповал А.В.,

Нестерова Е.В., Шокарев Е.А., Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,  
Легенченко В.А., Днепропетровский национальный горный университет

## К УЧЕТУ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ НА ГРУНТОВОМ СЛОЕ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

*Исследованы закономерности проявления осадок угловых точек фундаментов с прямоугольной формой подошвы в рамках расчетной схемы упругого слоя конечной толщины. Сделан вывод о том, что принятая в нормативных документах методика учета влияния фундаментов друг на друга (в том числе и при реконструкции зданий и сооружений) нуждается в дополнении и уточнении.*

*Ключевые слова: фундамент, грунтовый слой, конечная толщина, нагрузка, схема.*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами.** При реконструкции (например, при увеличении зданий и сооружений) и новом строительстве в условиях тесной городской застройки имеет место проблема учета фундаментов друг на друга. В настоящей работе представлены материалы исследований, направленных на выявление закономерностей осадок угловых точек фундаментов, расположенных на грунтовом слое конечной толщины [1, 2]. Исследовались осадки угловых точек прямоугольной области, загруженной равномерной распределенной нагрузкой (этот вид деформаций важно знать при учете влияния отдельных фундаментов друг на друга).

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы.** Определению напряженно-деформированного состояния грунтового слоя конечной толщины посвящены работы авторов [2,...,6], анализ которых позволил нам сделать вывод о том, что толщина грунтового слоя оказывает существенное влияние на его напряженно – деформированное состояние и напряженно – деформированное состояние расположенных на нем зданий и сооружений. При этом вопрос количественной оценки влияния на напряженно – деформированное состояние основания его толщины, граничных условий на контакте с жестким подстилающим слоем и деформационных свойств слагающего основание грунта остается открытым.

**Выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена данная статья.** В этой связи целесообразно выполнить анализ

влияния на напряженно – деформированное состояние основания его толщины, граничных условий на контакте со скалой и деформационных свойств слагающего основание грунта. С практической точки зрения такой анализ позволит наметить пути решения проблемы, разработки методики учета влияния расположенных рядом фундаментов друг на друга.

**Цель работы** – качественный и количественный анализ закономерностей проявления осадок основания, находящегося под воздействием равномерной распределенной по площади прямоугольника нагрузки в рамках расчетной схемы в виде слоя конечной толщины при варьировании таких факторов:

- относительной толщины грунтового слоя  $H$ ;
- отношение длины подошвы фундамента  $L$  к его ширине  $b$ ;
- граничных условий на контакте раздробленного грунта со скалой;
- коэффициента Пуассона основания  $\nu$ .

Изложение основного материала исследования. Вначале найдем решение задачи об осадке слоя конечной толщины  $H$ , к верхней границе которого приложена равномерная распределенная нагрузка  $q$  (рис. 1). Нагрузка распределена по площади прямоугольника со сторонами  $L$  и  $b$ .

Условия на верхней границе основания примем в виде:

$$\sigma_{zz}(x, y, 0) = \begin{cases} q - \text{при} \left\{ x \in \left( -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \right) \text{ и } y \in \left( -\frac{b}{2}, \frac{b}{2} \right); \right. \\ 0 - \text{при} \left\{ x \notin \left( -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \right) \text{ и } y \notin \left( -\frac{b}{2}, \frac{b}{2} \right); \right. \\ \left. \tau_{xz}(x, y, 0) = 0; \tau_{yz}(x, y, 0) = 0. \right. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_{zz}(x, y, z)$  - вертикальное нормальное напряжение в точке с координатами  $(x, y, z)$ ;  $\tau_{xz}(x, y, H)$  и  $\tau_{yz}(x, y, H)$  - то же, касательные.

При этом на контакте раздробленного грунта и жесткого подстилающего слоя рассмотрим два вида граничных условий:

$$\tau_{xz}(x, y, H) = 0; \tau_{yz}(x, y, H) = 0; W(x, y, H) = 0. \quad (2)$$

$$\text{и } U(x, y, H) = 0; V(x, y, H) = 0; W(x, y, H) = 0. \quad (3)$$

Здесь  $U(x, y, z)$  - перемещение точки с координатами  $(x, y, z)$  в направлении оси  $Ox$ ;  $V(x, y, z)$  - то же, в направлении оси  $Oy$ ;  $W(x, y, z)$  - то же, в направлении оси  $Oz$ .

Условия (2) соответствуют случаю, когда на границе слоев имеет место тонкая прослойка из мягкого пластичного грунта (смазка). Эти условия использованы К.Е. Егоровым [10] для составления представленных в СНиП [1] таблиц, предназначенных для расчета средних осадок фундаментов на грунтовом слое конечной толщины.

Условия (3) соответствуют случаю, когда грунтовые слои не имеют возможности проскальзывать друг относительно друга.

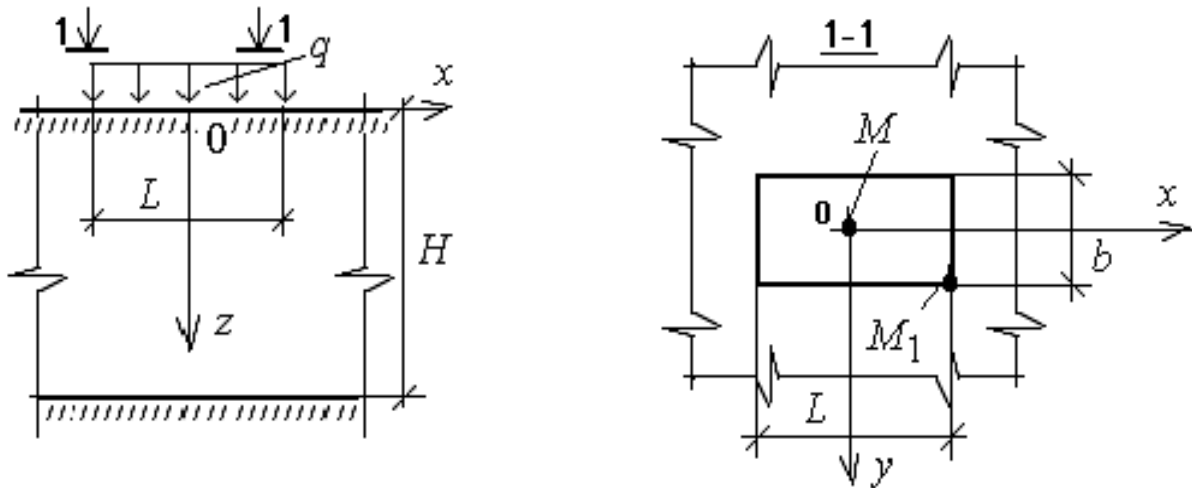


Рис.1 - К расчету осадок грунтового слоя.  $M$  - точка, в которой определялась осадка основания

Для решения задачи используем известные фундаментальные решения задачи о вертикальной сосредоточенной силе, приложенной к верхней границе грунтового слоя конечной толщины [6], а затем используем принцип суперпозиции так, как это было сделано авторами работ [7, 8].

Для граничных условий (2) решение задачи имеет вид:

$$S(r) = \frac{1-\nu}{\pi \cdot G \cdot H} \cdot P \cdot \int_0^{\infty} \frac{sh^2(\alpha)}{\alpha + sh(\alpha) \cdot ch(\alpha)} \cdot J_0\left(\alpha \cdot \frac{r}{H}\right) \cdot d\alpha, \quad (4)$$

а для граничных условий (3) –

$$S(r) = \frac{1-\nu}{\pi \cdot G \cdot H} \cdot P \cdot \int_0^{\infty} \frac{(3-4 \cdot \nu) \cdot sh(2 \cdot \alpha) - 2 \cdot \alpha}{\left[ (3-4 \cdot \nu) \cdot ch(2 \cdot \alpha) + \right.} \cdot J_0\left(\alpha \cdot \frac{r}{H}\right) \cdot d\alpha, \quad (5)$$

$$\left. + 2 \cdot \alpha^2 + 5 - 12 \cdot \nu + 8 \cdot \nu^2 \right]}{\left[ (3-4 \cdot \nu) \cdot ch(2 \cdot \alpha) + \right.}$$

Здесь  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;  $sh(x)$  и  $ch(x)$  - соответственно гиперболические синус и косинус; где  $J_0(x)$  - функция Бесселя первого рода с нулевым индексом [9];  $\nu$  -

коэффициент Пуассона;  $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$  - модуль сдвига;  $E$  - модуль общей деформации основания;  $P$  - величина сосредоточенной силы.

Равенства (5) содержат несобственные интегралы, вычисление которых в аналитическом виде проблематично. Поэтому нами была выполнена аппроксимация подынтегральных функций

$$F = sh^2(\alpha) / [\alpha + sh(\alpha) \cdot ch(\alpha)] \quad (6)$$

$$\text{и } F = (3 - 4 \cdot \nu) \cdot sh(2 \cdot \alpha) - 2 \cdot \alpha / [(3 - 4 \cdot \nu) \cdot ch(2 \cdot \alpha) + 2 \cdot \alpha^2 + 5 - 12 \cdot \nu + 8 \cdot \nu^2] \quad (7)$$

в виде

$$F \approx \sum_{i=1}^6 a_i \cdot exp[(i-1) \cdot \alpha], \quad (8)$$

где  $a_i$  - коэффициенты аппроксимации, а  $i$  - номер члена ряда. Результаты аппроксимации представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	$\nu$	Значения коэффициентов аппроксимации $a_i$ , д.ед.						
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
1	-	1	0,319	-9,708	31,532	46,521	33,465	9,449
2	0,1	1	-0,805	-7,258	26,728	-42,150	31,771	-9,287
3	0,2	1	-0,965	-7,188	28,249	-45,856	35,137	-10,377
4	0,3	1	-1,199	-7,132	30,308	-50,617	39,391	-11,751
5	0,4	1	-1,573	-6,919	32,661	-56,308	44,635	-13,496
6	0,5	1	-2,258	-5,931	34,129	-61,941	50,750	15,750

*Примечание.* В первой строке настоящей таблицы представлена аппроксимация выражения (6).

Подставим (8) в несобственные интегралы (4) и (5). Имеем:

$$S(x, y) = \frac{1 - \nu}{\pi \cdot G} \cdot P \cdot \sum_{i=1}^7 \frac{a_i}{\sqrt{x^2 + y^2 + (i-1)^2 \cdot H^2}}. \quad (9)$$

Далее положим  $dP = q \cdot dx_1 \cdot dy_1$ , и найдем дифференциал осадки основания в точке  $(x_1, y_1)$ . Имеем:

$$S(x, y) = \frac{1 - \nu}{\pi \cdot G} \cdot q \cdot dx_1 \cdot dy_1 \cdot \sum_{i=1}^7 \frac{a_i}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (i-1)^2 \cdot H^2}}. \quad (10)$$

Для определения осадки основания в точке с координатами  $(x, y)$  проинтегрируем (10) по площади. Имеем:

$$S(x, y) = \frac{1 - \nu}{\pi \cdot G \cdot H} \cdot q \cdot \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sum_{i=1}^7 \frac{dx_1 \cdot dy_1 \cdot a_i}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (i-1)^2 \cdot H^2}}. \quad (10)$$

Для удобства анализа полученного таким образом решения задачи с использованием формул

$$\left. \begin{aligned} x &= b \cdot \xi; \quad x_1 = b \cdot \xi_1; \quad y = L \cdot \eta; \quad y_1 = L \cdot \eta_1; \quad L = n \cdot b; \\ H &= \frac{m \cdot b}{2}; \quad \bar{S}(\xi, \eta) = \frac{\pi \cdot G \cdot H \cdot b}{q \cdot (1 - \nu)} \cdot S(\xi, \eta) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

выполним нормировку (10). Для осадки угловой точки с координатами

$$M\left(\frac{b}{2}, \frac{L}{2}\right).$$

Имеем:

$$\bar{S}(\xi, \eta) = \int_{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^7 \frac{d\xi_1 \cdot d\eta_1 \cdot a_i}{\sqrt{\left(\frac{1}{2} - \xi_1\right)^2 + n^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \eta_1\right)^2 + \frac{m^2 \cdot (i-1)^2}{4}}}. \quad (12)$$

Определенный интеграл (12) вычислялся численным методом Симпсона. При этом рассматривались центр (точка  $M$ , рис. 1) и угловая точка загруженной области (точка  $M_1$ , рис. 1).

После этого по формуле

$$\Delta = \left| \frac{\bar{S}_e - \bar{S}_v}{\bar{S}_e} \right| \cdot 100\% \quad (13)$$

определялись относительные погрешности между осадками, рассчитанными для граничных условий (2) и граничных условий (3). При этом варьировались значения коэффициента Пуассона  $\nu$ . Здесь  $\bar{S}_e$  - осадка, установленная для граничных условий (2);  $\bar{S}_v$  - то же, для граничных условий (3).

Результаты расчетов для угловой точки загруженной области представлены на рисунке 2.

Анализ представленных на рис. 2 кривых, в частности, позволил нам сделать вывод о том, что при различных условиях на контакте слоя раздробленного грунта и подстилающим его жестким основанием и прочих равных условиях относительное расхождение между средними осадками угловых точек расположенных вблизи друг от друга фундаментов может приближаться к 100%.

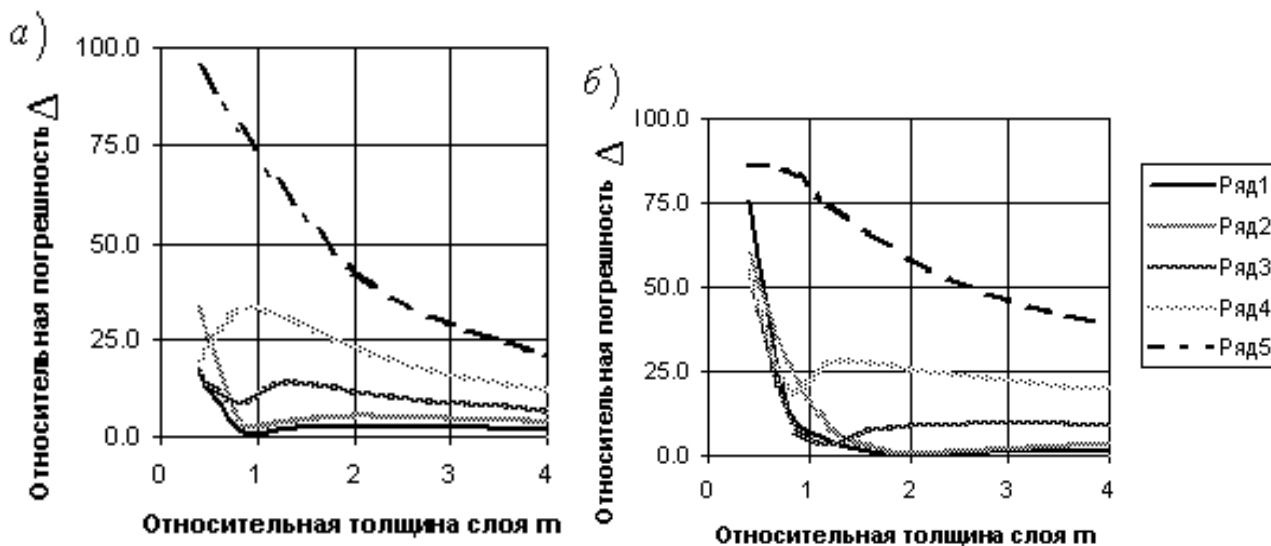


Рис. 2. Расхождение между осадками угловых точек загруженной области. а -  $L/b = 1$ ; б -  $L/b = 5$ . коэффициент Пуассона  $\nu = 0,1$ ; 2 - то же,  $\nu = 0,2$ ; 3 - то же,  $\nu = 0,3$ ; 4 - то же,  $\nu = 0,4$ ; 5- то же,  $\nu = 0,5$ .

В целом были сделаны такие **выводы**.

1. Чем выше значение Пуассона основания, тем больше граничные условия влияют на значения осадок расположенных на грунтовом слое конечной толщины фундаментов. Это различие тем больше, чем меньше относительная толщина слоя  $m = 2 \cdot H/b$  и чем больше относительная длина подошвы фундамента  $n = L/b$ .

2. Для адекватного учета взаимного влияния фундаментов на грунтовом слое конечной толщины друг на друга обязательно следует учитывать значение коэффициента Пуассона основания.

3. Область полученных в работе результатов - учет взаимного влияния друг на друга фундаментов на грунтовом слое конечной толщины в условиях тесной городской застройки. При этом возможны такие варианты:

3.1. Возрастание нагрузки на основание при увеличении в ходе реконструкции этажности существующих зданий.

3.2. Увеличение в ходе реконструкции площади подошвы существующих фундаментов и нагрузки на них.

3.3. Новое строительство вблизи существующих зданий

### Литература

1. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений.
2. Горбунов-Посадов М.И. Осадки фундаментов на слое грунта, подстилаемом скальным основанием. - М.: Госстройиздат, 1946. - 60 с.
3. Бабич П.В. Особливості розвитку крена прямокутних фундаментів на водонасиченій основі для шару кінцевої товщини. Автореферат на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дніпропетровськ: ПГАСиА, 2006. - 21 с.
4. Титякова К. С. Напружено-деформований стан системи «грунтовий шар кінцевої товщини – фундамент – надфундаментна будівля». Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2010 – 24 с.
5. Головка О.С. Крени фундаментів з кільцевою формою підошви на водонасиченому ґрунтовому шарі кінцевої товщини. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дніпропетровськ 2010 – 24 с.
6. Кушнер С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. – Запорожье, 2008 – 496 с.
7. Тимошенко С.П., Гудьир Дж. Теория упругости. - М: Наука, 1975. - 576 с.
8. Шаповал А.В., Шаповал В.Г. Теория взаимосвязанной фильтрационной консолидации: Монография. - Днепропетровск: Пороги, 2009. - 311 с.
9. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1974. - 840 с.
10. Егоров К. Е. К расчету деформаций оснований (сборник статей). – М.: ФГУП «ВНИИТПИ», 2002. – 400 с.

### Анотація

Досліджені закономірності прояву осідань кутових точок фундаментів з прямокутною формою підошви в рамках розрахункової схеми пружного шару кінцевої товщини. Зроблений вивід про те, що прийнята в нормативних документах методика обліку впливу фундаментів один на одного (у тому числі і при реконструкції будівель і споруд) потребує доповнення і уточнення.

### Annotation

Conformities to the law of display of sinking of angular points of foundations are investigational with the rectangular form of sole within the framework of calculation chart of resilient layer of eventual thickness. A conclusion is done that the method of account of influence of foundations accepted in normative documents on each other needs addition and clarification.