

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРУГЛОГО ФУНДАМЕНТА И ВЕРХНЕГО СЛОЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУХСЛОЙНОМ ОСНОВАНИИ\*

Ю.Ф. Суходоев

*Встановлені закономірності розподілу напружень в двошаровій основі. Наведені графіки для визначення напружень в двошаровій основі.*

*Установлены закономерности распределения напряжений в двухслойном основании. Представлены графики для определения напряжений в двухслойном основании.*

*Stress distribution regularities in the two-layer base are established. Diagrams for determining stresses in the two-layer base are presented.*

**Вступлення.** На решениях, базирующихся на теории упругости, основаны практические методы прогноза деформаций основания сооружений [1]. При этом уравнения теории упругости для определения напряжений в основании сооружений справедливы в пределах линейной зависимости между напряжениями и деформациями.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами.** При расчете напряжений и перемещений допускают, что основание сооружения является однородным и линейно-деформируемым телом. Однако, основания сооружений редко бывают однородными. В частности грунты, уплотненные короткими забивными сваями можно рассматривать при расчете как двухслойное основание [2].

**Цель работы.** Установить закономерности распределение напряжений в основании круглого фундамента с учетом соотношения модулей деформаций обоих слоев и толщины верхнего слоя.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решения данной проблемы.** Исследовано распределение напряжений и перемещений в упругом слое и предложен метод расчета осадки фундамента по схеме линейно-деформируемого слоя конечной толщины [3].

**Изложение основного материала исследования.** Рассмотрим случай, когда на поверхности первого слоя толщиной  $H$  действует осесимметричная нагрузка и этот слой лежит на втором слое, простирающемся в глубину до бесконечности (рисунок 1) [4]. Решение поставленной задачи можно получить способом, изложенным для основания конечной толщины К.Е. Егоровым [3, 5, 6].

Компоненты вертикальных напряжений имеют вид ( $H\alpha = \beta$ ) [4]:

Для первого слоя

$$\sigma_{1z} = \frac{Rp}{H} \int_0^{\infty} \left\{ (sh\beta + \beta ch\beta) \left( 1 - n \frac{Z}{H} \beta \right) ch \left( \frac{Z}{H} \beta \right) + [n (sh\beta + \beta ch\beta) - (1 - n\beta) \frac{Z}{H} \beta sh\beta] sh \left( \frac{Z}{H} \beta \right) \right\} \frac{I_1 \left( \frac{R}{H} \beta \right) I_0 \left( \frac{r}{H} \beta \right)}{\Delta} d\beta. \quad (1)$$

Для второго слоя

$$\sigma_{2z} = \frac{Rp}{H} \int_0^{\infty} (sh\beta + \beta ch\beta) \left( 1 - \frac{Z}{H} \beta \right) e^{\frac{Z}{H}\beta} \cdot \frac{I_1 \left( \frac{R}{H} \beta \right) I_0 \left( \frac{r}{H} \beta \right)}{\Delta} d\beta. \quad (2)$$

На контактной плоскости двух слоев при  $Z = 0$  имеем:

\* Работа выполнялась под руководством д.т.н., проф. Егорова К.Е.

$$\sigma_z = \sigma_{1z} = \sigma_{2z} = \frac{Rp}{H} \int_0^{\infty} (sh\beta + \beta ch\beta) \frac{I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right) I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)}{\Delta} d\beta. \quad (3)$$

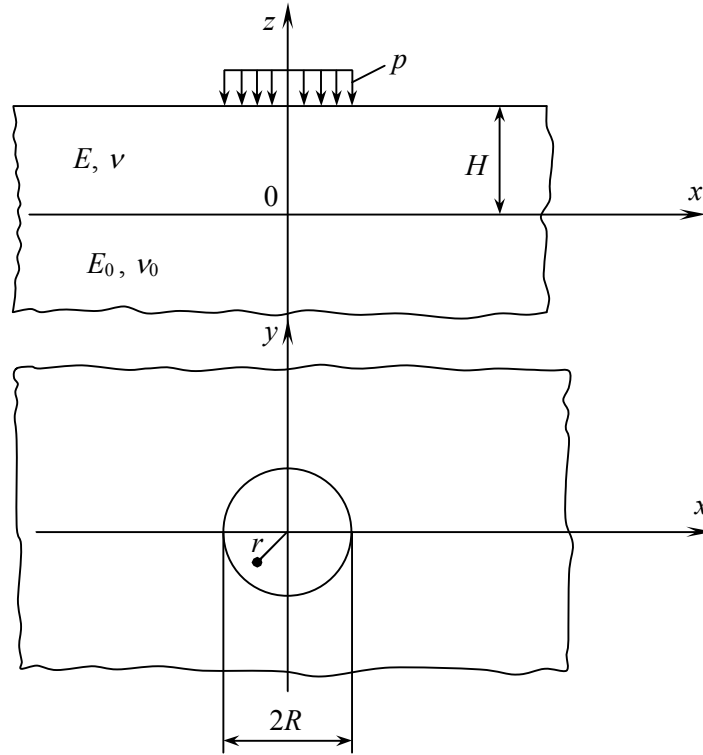


Рисунок 1 – Расчетная схема двухслойного основания

### Графики для определения напряжений в двухслойном основании круглого фундамента

Для вычисления формул (1, 2) при  $r = 0$  представим их в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{1z} = p \frac{R}{H} \int_0^{\infty} & \left\{ \left[ (sh\beta + \beta ch\beta) \left( 1 - n \frac{Z}{H} \beta \right) ch\left(\frac{Z}{H}\beta\right) + (n(sh\beta + \beta ch\beta) - \right. \right. \\ & \left. \left. - (1 - n\beta) \frac{Z}{H} \beta sh\beta \right) sh\left(\frac{Z}{H}\beta\right) \right] \cdot \frac{1}{\Delta} - \frac{2e^{-\beta}}{1+n} \left[ (1+\beta) \left( 1 - n \frac{Z}{H} \beta \right) ch\left(\frac{Z}{H}\beta\right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left( n(1+\beta) - (1 - n\beta) \left( \frac{Z}{H} \beta \right) \right) sh\left(\frac{Z}{H}\beta\right) \right] \right\} \cdot I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right) d\beta + \\ & + \frac{1}{1+n} \left\{ 2 - \frac{(1+n) \left( 1 - \frac{Z}{H} \right)}{\sqrt{\left( 1 - \frac{Z}{H} \right)^2 + \left( \frac{R}{H} \right)^2}} - \frac{(1+n) \left( 1 + \frac{Z}{H} \right)}{\sqrt{\left( 1 + \frac{Z}{H} \right)^2 + \left( \frac{R}{H} \right)^2}} + \left( \frac{R}{H} \right)^2 \frac{(1+n) \left( 1 - \frac{Z}{H} \right)}{\sqrt{\left[ \left( 1 - \frac{Z}{H} \right)^2 + \left( \frac{R}{H} \right)^2 \right]^3}} + \right. \\ & \left. + \frac{(1-n) \left( 1 + \frac{Z}{H} \right)}{\sqrt{\left[ \left( 1 + \frac{Z}{H} \right)^2 + \left( \frac{R}{H} \right)^2 \right]^3}} - \frac{6n \frac{Z}{H} \left( 1 + \frac{Z}{H} \right)}{\sqrt{\left[ \left( 1 + \frac{Z}{H} \right)^2 + \left( \frac{R}{H} \right)^2 \right]^3}} \right\}; \end{aligned} \quad (4)$$

**Таблица 1 – Значения напряжений в зависимости от соотношения модулей деформаций двух слоев и толщины верхнего слоя основания**

$\frac{Z}{H}$	$n = 1$				$n = 2$				$n = 3$				$n = 5$				$n = 10$			
	$\frac{H}{R} = 0,5$	$\frac{H}{R} = 1,0$	$\frac{H}{R} = 1,5$	$\frac{H}{R} = 2,0$	$\frac{H}{R} = 0,5$	$\frac{H}{R} = 1,0$	$\frac{H}{R} = 1,5$	$\frac{H}{R} = 2,0$	$\frac{H}{R} = 0,5$	$\frac{H}{R} = 1,0$	$\frac{H}{R} = 1,5$	$\frac{H}{R} = 2,0$	$\frac{H}{R} = 0,5$	$\frac{H}{R} = 1,0$	$\frac{H}{R} = 1,5$	$\frac{H}{R} = 2,0$	$\frac{H}{R} = 0,5$	$\frac{H}{R} = 1,0$	$\frac{H}{R} = 1,5$	$\frac{H}{R} = 2,0$
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,8	1,004	0,985	0,968	0,943	0,997	0,972	0,959	0,936	0,992	0,964	0,953	0,933	0,982	0,954	0,947	0,928	0,967	0,941	0,939	0,923
0,6	1,011	0,929	0,841	0,739	0,989	0,886	0,810	0,718	0,970	0,859	0,791	0,705	0,938	0,825	0,769	0,691	0,887	0,784	0,744	0,673
0,4	1,017	0,842	0,669	0,520	0,978	0,763	0,610	0,480	0,943	0,713	0,575	0,457	0,885	0,651	0,534	0,429	0,791	0,576	0,487	0,399
0,2	1,023	0,759	0,525	0,369	0,969	0,649	0,441	0,310	0,920	0,579	0,391	0,276	0,840	0,493	0,332	0,236	0,711	0,388	0,266	0,192
0	1,025	0,722	0,465	0,310	0,966	0,599	0,369	0,241	0,911	0,520	0,311	0,201	0,822	0,423	0,244	0,155	0,677	0,305	0,168	0,104
-0,2	1,018	0,697	0,437	0,286	0,959	0,579	0,348	0,223	0,904	0,504	0,295	0,188	0,815	0,411	0,233	0,146	0,672	0,292	0,161	0,099
-0,4	0,998	0,640	0,383	0,244	0,937	0,535	0,309	0,194	0,883	0,468	0,264	0,164	0,796	0,384	0,210	0,129	0,656	0,281	0,148	0,090
-0,6	0,964	0,571	0,327	0,204	0,903	0,482	0,268	0,165	0,850	0,424	0,231	0,141	0,767	0,351	0,186	0,113	0,634	0,260	0,134	0,080
-0,8	0,919	0,502	0,277	0,169	0,860	0,428	0,230	0,139	0,810	0,379	0,200	0,121	0,731	0,317	0,164	0,098	0,606	0,238	0,120	0,071
-1,0	0,868	0,438	0,234	0,141	0,811	0,377	0,197	0,118	0,764	0,337	0,174	0,103	0,692	0,285	0,144	0,085	0,576	0,217	0,107	0,063
-1,2	0,812	0,382	0,199	0,119	0,760	0,332	0,170	0,101	0,717	0,229	0,151	0,089	0,650	0,255	0,127	0,074	0,544	0,197	0,096	0,056
-1,4	0,756	0,333	0,170	0,100	0,709	0,293	0,147	0,086	0,669	0,266	0,132	0,077	0,608	0,229	0,112	0,065	0,512	0,179	0,086	0,050
-1,6	0,700	0,291	0,146	0,086	0,657	0,259	0,128	0,075	0,622	0,236	0,116	0,067	0,568	0,205	0,079	0,058	0,481	0,163	0,078	0,045
-1,8	0,646	0,256	0,126	0,074	0,608	0,229	0,112	0,065	0,577	0,211	0,102	0,059	0,528	0,185	0,089	0,051	0,450	0,149	0,070	0,040
-2,0	0,596	0,225	0,110	0,064	0,562	0,204	0,098	0,057	0,534	0,189	0,090	0,052	0,491	0,167	0,079	0,046	0,421	0,136	0,064	0,036

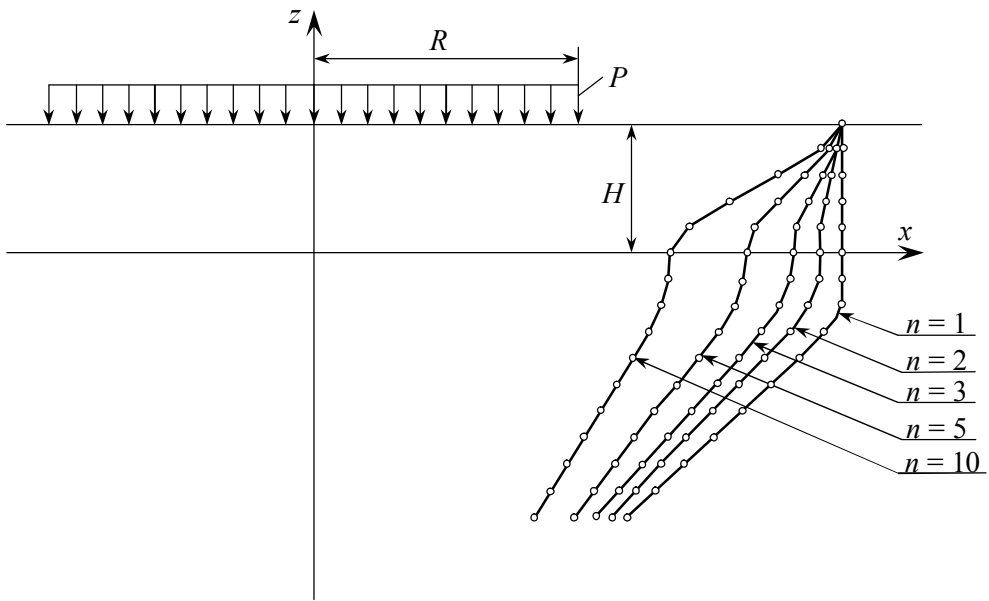


Рисунок 2 – Графики распределения напряжений в двухслойном основании при  $H/R = 0,5$

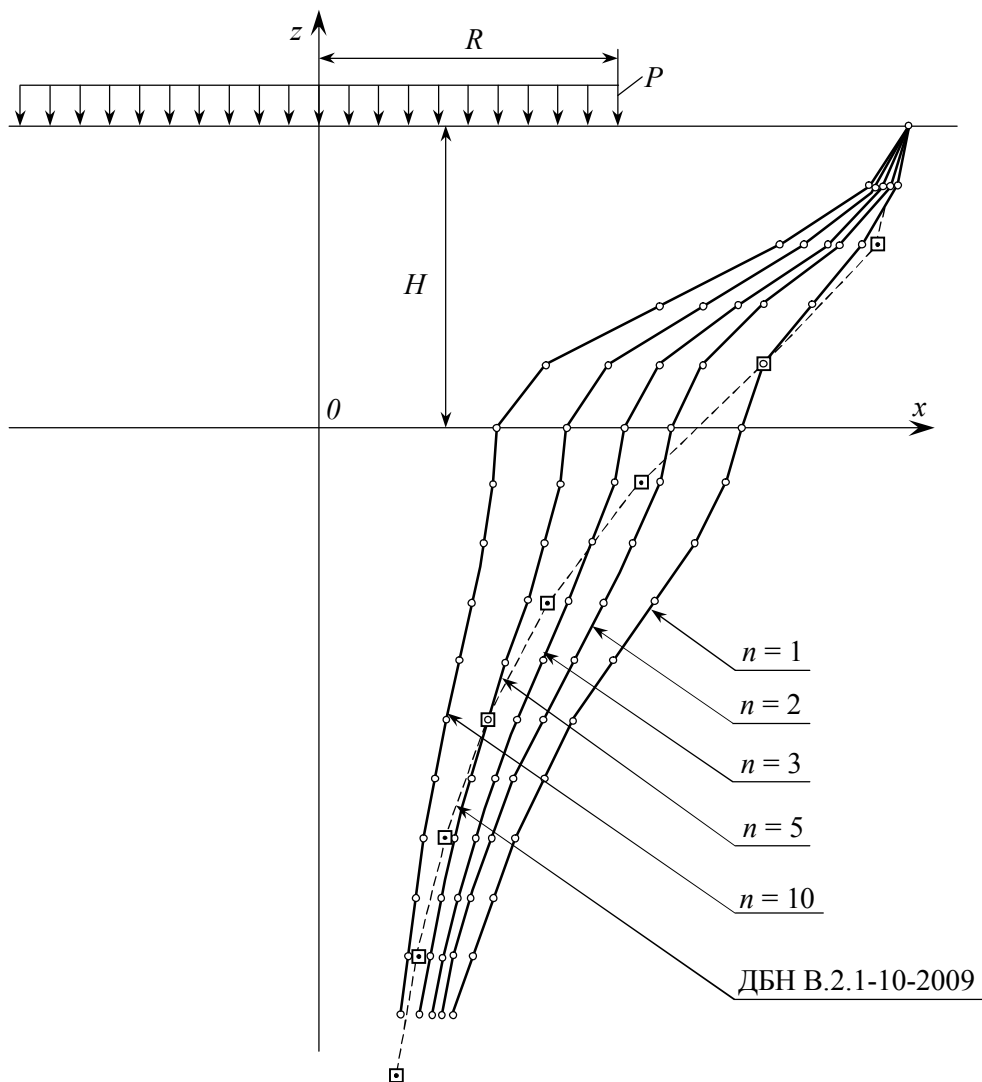


Рисунок 3 – Графики распределения напряжений в двухслойном основании при  $H/R = 1,0$

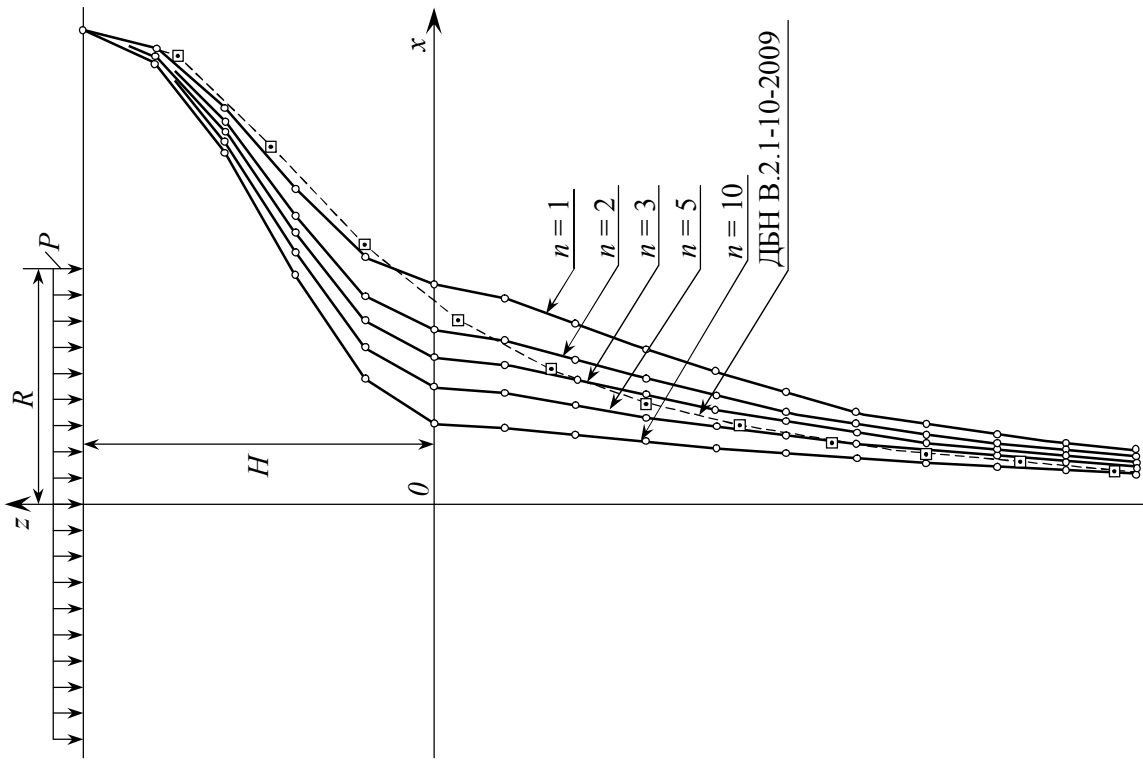


Рисунок 4 – Графики распределения напряжений в двухслойном основании при  $H/R = 1,5$

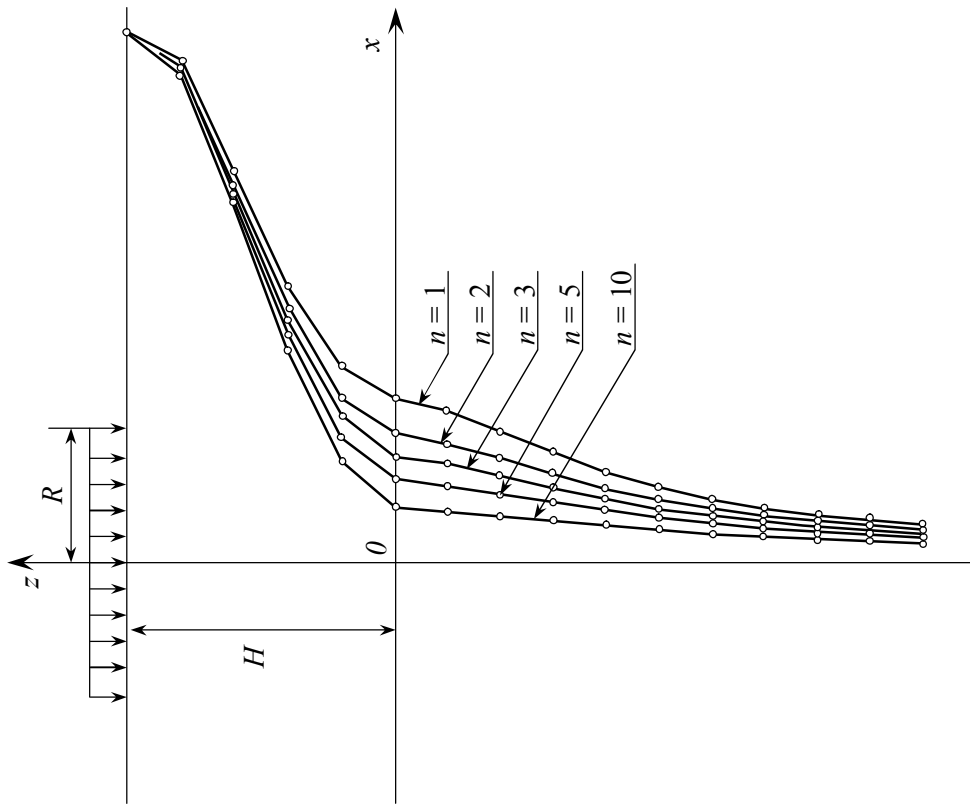


Рисунок 5 – Графики распределения напряжений в двухслойном основании при  $H/R = 2,0$

$$\sigma_{2z} = p \frac{R}{H} \int_0^{\infty} \left[ (sh\beta + \beta ch\beta) \frac{1}{\Delta} - \frac{2(1+\beta)}{1+n} e^{-\beta} \right] \cdot \left( 1 + \frac{Z}{H} \beta \right) \cdot e^{-\frac{Z}{H}\beta} \cdot I_1 \left( \frac{R}{H} \beta \right) d\beta +$$

$$+ \frac{2}{1+n} \left\{ 1 - \frac{1 + \frac{Z}{H}}{\sqrt{\left(1 + \frac{Z}{H}\right)^2 + \left(\frac{R}{H}\right)^2}} + \left(\frac{R}{H}\right)^2 \left[ \frac{1 + \frac{Z}{H}}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{Z}{H}\right)^2 + \left(\frac{R}{H}\right)^2\right]^3}} + \frac{3 \frac{Z}{H} \left(1 + \frac{Z}{H}\right)}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{Z}{H}\right)^2 + \left(\frac{R}{H}\right)^2\right]^5}} \right] \right\} \quad (5)$$

где

$$\Delta = \beta + sh\beta ch\beta + n (sh^2\beta - \beta^2)$$

В равенствах (4) и (5) второй член несобственного интеграла является асимптотическим выражением первого члена, где гиперболические синус и косинус заменены значением  $\frac{1}{2}e^\beta$  при больших значениях  $Z$ . Несобственный интеграл асимптотического выражения берется в конечном виде, который представлен последними выражениями. Такое представление позволяет с помощью правила Симпсона вычислить несобственные интегралы и составить таблицы для определения напряжения  $\sigma_z$  в зависимости от величины  $H$  и  $n = \frac{E}{E_0}$ . Результаты вычислений сведем в таблицу 1.

В формулах (4) и (5) начало координат  $Z$  принято на плоскости, разделяющей два слоя. Трение между этими слоями отсутствует. Такое предположение лучше отражает действительную деформацию грунтов под фундаментами.

В таблице 1  $Z/H = 1$  соответствует поверхности, разделяющей два слоя с различными модулями деформаций. По значениям, приведенным в таблице 1, построены графики распределения напряжений в двухслойном основании (рисунки 2...5).

### Выводы

– Соотношение модулей деформаций двух слоев является главным параметром двухслойного основания.

– Полученные закономерности распределения напряжений в двухслойном основании жесткого круглого штампа учитывают его радиус, соотношение модулей деформаций двух слоев, а также толщину верхнего слоя.

### Список литературы

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування – Київ.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
2. Суходоев Ю.Ф. Деформации основания фундаментов из коротких забивных свай / Ю.Ф. Суходоев // Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Баку, 1987, – 22 с.
3. Егоров К.Е. Распределение напряжений и перемещений в основании конечной толщины / К.Е. Егоров // Механика грунтов. Вып. 43. – М.: Госстройиздат, 1961. – С. 13 – 31.
4. Суходоев Ю.Ф. Определение напряжений и перемещений в двухслойном основании круглого фундамента / Ю.Ф. Суходоев // 3б. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – Вип. 3 (28). – С. 241 – 248.
5. Егоров К.Е. Распределение напряжений и перемещений в двухслойном основании ленточного фундамента / К.Е. Егоров // Свайные и естественные основания. – 1939. Вып. 10. – М. – Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1939. – С. 99 – 114.
6. Егоров К.Е. К вопросу деформаций основания конечной толщины / К.Е. Егоров // Механика грунтов. Вып. 34. – М.: Госстройиздат, 1958. – С. 12 – 29.

**Суходоев Юрий Филиппович** – к.т.н., доцент кафедры оснований и фундаментов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. 65029, г. Одесса, ул. Дидрихсона, 4, т. 7206-455, м.т. 050-392-00-23, E-mail: novsky\_a\_v@hotmail.com.