

УДК 624.131.542

## **Investigation of the Influence of Penetration Slit at its Foundation Rainfall and the Stress State of Subgrade**

**Snezhana V. Platonova\***

*Siberian State Industrial University  
42 Kirova, Novokuznetsk, 654007, Russia*

Received 28.09.2014, received in revised form 14.10.2014, accepted 05.12.2014

---

*In article the is intense-deformed condition of the soil basis of the slot-hole bases is considered at their various depth заложения.*

*Keywords: the slot-hole bases, plasticity of a ground basis.*

---

## **Исследование влияния заглубления щелевого фундамента на его осадки и напряженное состояние грунтового основания**

**С.В. Платонова**

*Сибирский государственный индустриальный университет  
Россия, 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42*

---

*В статье рассматривается напряжённо-деформированное состояние грунтового основания щелевых фундаментов при различной глубине их заложения.*

*Ключевые слова: щелевые фундаменты, пластичность грунта основания.*

---

В расчетах использована модель упруго–идеальнопластической бездилатансионной среды [1]. Задача решена методом конечных элементов в перемещениях для условий плоской деформации. В расчетной схеме присутствовали 426 треугольных элементов, объединенных 240 узлами; использована симметрия формы ГП-образного фундамента при поступательном смещении его в вертикальном направлении. Смещения фундамента задавались ступенями; для каждой ступени получены необходимые сведения о полном напряженном состоянии каждого треугольного элемента и о смещениях узлов по вертикали и горизонтали. Построены графики осадок фундаментов на всем диапазоне возрастания внешней нагрузки до нагрузки, равной

или превышающей предельную для основания (по условию его устойчивости, принятому в соответствии с нормами [2]). III-образный фундамент имел ширину плиты  $b = 0.98$  м, толщину стен по 0.14 м; фундамент рассмотрен в трех вариантах его заглубления  $d_i = h_i = 0.6$  м ( $h_{\min}$ ), 1.2 м ( $h_{\text{CP}}$ ), 1.8 м ( $h_{\max}$ ).

Изучено напряженное состояние (н.с.) основания с характеристиками грунтовой среды  $E = 5$  и 10 МПа,  $\nu = 0,25 \div 0,40$ ,  $\varphi = 15 \div 40^\circ$ ,  $c = 0 \div 0,04$  МПа,  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup> (здесь  $E$ ,  $\nu$ ,  $\varphi$ ,  $c$  и  $\gamma$  – соответственно модуль деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление и удельный вес грунта).

Графики зависимости осадок от величины внешней нагрузки были повсеместно криволинейными (рис. 1). При малых нагрузках графики нарастания осадок при значениях  $E = 5$  МПа и 10 МПа и рассмотренных глубинах  $h_i$  заложения фундаментов квазилинейные; при больших нагрузках происходит искривление графиков осадок: наибольшее у грунтов с модулем деформации  $E = 5$  МПа, наименьшее – у грунтов с  $E = 10$  МПа.

Для грунтового основания со значениями  $E = 5 \div 10$  МПа,  $\nu = 0,4$ ,  $\gamma = 20$  кН/м<sup>3</sup>,  $c = 0,04$  МПа,  $\varphi = 15^\circ$  при минимальном заглублении  $h_{\min}$  проанализированы особенности н.с., соответствующие

«малым» нагрузкам  $P_{\min} = 103$  кН/м<sup>2</sup> и «большим» –  $P_{\max} = 292$  кН/м<sup>2</sup>. При значениях  $h_{\max}$  исследовано н.с. с нагрузками  $P_{\min} = 116$  кН/м<sup>2</sup>,  $P_{\max} = 286$  кН/м<sup>2</sup>. За малые нагрузки принимаются нагрузки, соответствующие начальному загрузению фундамента и отсутствию пластических деформаций в грунте, большим нагрузкам соответствует наличие существенных смещений подошвы фундамента и пластических деформаций в грунте.

На рис. 2 показаны эпюры распределения относительных напряжений  $\bar{\sigma}_1 = \sigma_z = \sigma_z / p_{\text{CP}}$  и  $\bar{\sigma}_3 = \sigma_x = \sigma_x / p_{\text{CP}}$  вдоль центральной вертикальной оси щелевых фундаментов, заглубленных на величину  $h_{\min}$  и  $h_{\max}$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – напряжения, вызванные смещениями фундамента без учета собственного веса грунта,  $p_{\text{CP}}$  – среднее давление на уровне подошвы щелевого фундамента. Для ориентировочного получения полных напряжений (от единичной нагрузки и собственного веса грунта) к напряжениям  $\bar{\sigma}_1$  следует добавлять значения  $\sigma_1^g = \gamma \cdot z$ , а к напряжениям  $\bar{\sigma}_3$  –  $\sigma_3^g = \gamma \cdot z \cdot \nu / (1 - \nu)$ .

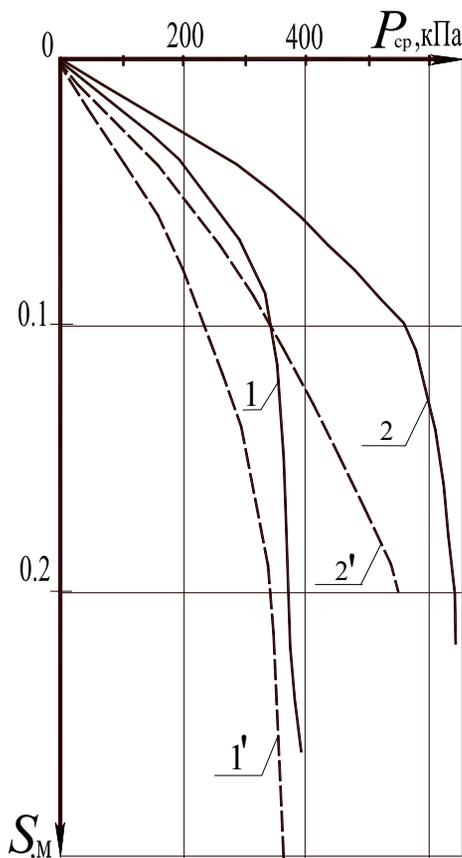


Рис. 1. Графики осадок щелевых фундаментов: 1 и 2 – фундаменты ( $h_{\max}$ ) на грунте I ( $E = 5$  МПа) и II ( $E = 10$  МПа) соответственно; 1' и 2' – фундаменты ( $h_{\min}$ ) на грунте I и II

Рассматривая распределение напряжений при заглублении фундамента на величину  $h_{\min}$ , можно отметить наличие локального максимума напряжений  $\bar{\sigma}_1$  на глубине  $z/b \gg 0.5$ . Эпюра напряжений  $\bar{\sigma}_3$  имеет вогнутое очертание. Очертания эпюр  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  в грунте II аналогичны описанным выше.

При больших нагрузках очертания эпюр практически совпадают (рис. 2, графики а; б', грунт I и II), также наблюдается уменьшение напряжений  $\bar{\sigma}_1$  по глубине, причем локальный максимум на глубине  $z/b \gg 0.5$  сохраняется. Очертание эпюры  $\bar{\sigma}_3$  имеет аналогичный эпюрам  $\bar{\sigma}_1$  характер с той лишь разницей, что с глубины  $z/b \gg 2$  наблюдается некоторое увеличение значений напряжений по глубине (за счет влияния неподвижной нижней границы расчетной области). Некоторое увеличение напряжений  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  на участке  $0.2 < z/b < 0.8$  объясняется влиянием давлений, действующих под подошвой крайних стен щелевого фундамента.

Сравнивая распределение напряжений  $\bar{\sigma}_1$  при малых и больших нагрузках (грунт I и II,  $h_{\min}$ ), можно отметить аналогию очертаний их эпюр с той лишь разницей, что при большем модуле деформации (грунт II,  $E = 10$  МПа) на глубине  $z/b \gg 0.5$  более четко выражен максимум напряжений, вызванный наложением напряжений от обеих крайних стенок фундамента. С глубины  $z/b \gg 1.8$  значения напряжений  $\bar{\sigma}_3$  в слабом грунте I больше, чем в грунте II, т.е. влияние дна лотка при наличии «слабого» грунта вызывает концентрацию напряжений, более заметную, чем в более жестком («прочном») грунте II.

Характер распределения напряжений  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  (грунты I и II) для фундаментов с другими заглублениями ( $h_{\max} = 1.2$  и  $1.8$  м) в качественном отношении такой же, как и для грунта  $h_{\min} = 0.6$  м.

В горизонтальном контактном слое даже при «малых» ступенях нагрузки из-за различной податливости грунтового сердечника и стенок фундамента напряжения  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  распределяются неравномерно: наблюдается концентрация напряжений под подошвами стенок и деконцентрация – под подошвой грунтового сердечника. На глубине  $z = b$  значения напряжений  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  плавно убывают по мере удаления от оси симметрии фундамента.

Оценивая особенности распределения относительных нормальных  $\bar{\sigma}_x/P_{\text{CP}}$ , ( $\bar{\sigma}'_x/P_{\text{CP}}$ ),  $\bar{\sigma}_z/P_{\text{CP}}$  ( $\bar{\sigma}'_z/P_{\text{CP}}$ ) и касательных  $\bar{\tau}_{xz}/P_{\text{CP}}$ , ( $\bar{\tau}'_{xz}/P_{\text{CP}}$ ) контактных напряже-

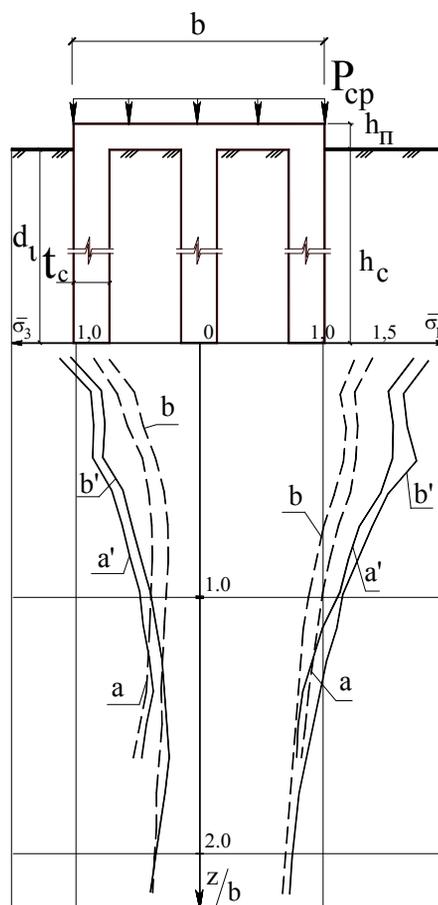


Рис. 2. Распределение напряжений  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  вдоль центральной вертикали щелевых фундаментов при их заглублении  $h_{\min}$  (а) и  $h_{\max}$  (б): : грунт I; : грунт II

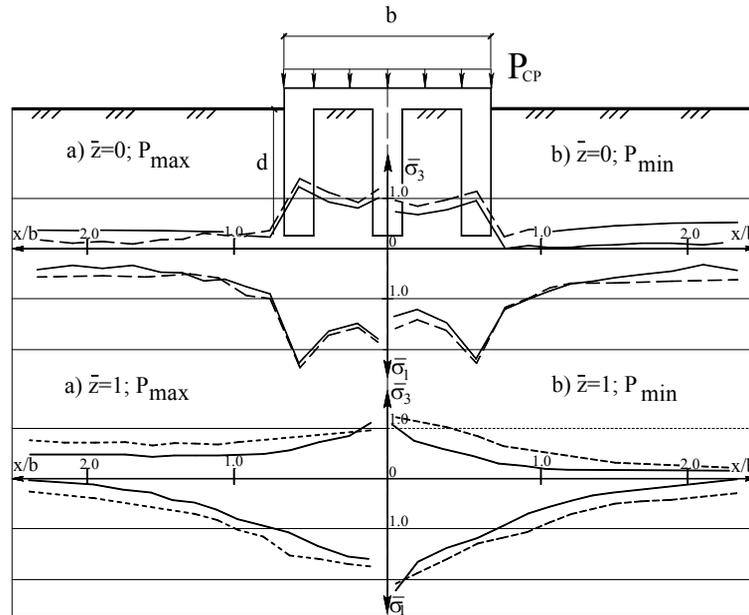


Рис. 3. Распределение напряжений  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_3$  на глубинах  $\bar{z} = z/b = 0$  и  $\bar{z} = 0.5$  при заглублении фундаментов  $h_{\min}$  (а) и  $h_{\max}$  (б): : грунт I, : грунт II

ний по поверхности щелевого фундамента при «малых» и «больших» нагрузках  $p_{cp}$ , принятых в расчете (рис. 4), можно отметить одинаковую качественную закономерность распределения контактных напряжений в грунтах I и II.

Как видно из рис. 4 (грунт I, «малая» нагрузка), относительные значения напряжений  $\sigma'_z / P_{cp}$  под подошвой крайних стен фундамента несколько больше, чем под подошвой внутренней стенки, что говорит о возможности появления пластических деформаций под крайними стенами со стороны их наружных граней раньше, чем под внутренней стенкой, уже при малых нагрузках. Распределение напряжений  $\sigma_z / P_{cp}$  под подошвой плитной части фундамента имеет неравномерное очертание, значения  $\sigma_z / P_{cp}$  несколько уменьшаются по мере удаления от оси симметрии. Напряжения  $\sigma_x / P_{cp}$  на наружных гранях крайних стенок с глубиной сначала уменьшаются, а затем увеличиваются по всей высоте стенки. Такой характер их изменения объясняется принятыми в расчете условиями полного «слипания» грунта с фундаментом. Распределение напряжений  $\sigma_x / P_{cp}$  внутри грунтового сердечника также неравномерно, ординаты эпюр увеличиваются по глубине; аналогично распределение напряжений  $\sigma'_x / P_{cp}$ . Касательные напряжения на наружных гранях стенок  $\tau_{xz} / P_{cp}$  по глубине уменьшаются, что также можно объяснить условиями «слипания» грунта с фундаментом. Внутри грунтового сердечника вдоль наружных стенок фундамента касательные напряжения  $\tau'_{xz} / P_{cp}$  практически отсутствуют, а вдоль внутренней стенки фундамента  $\tau''_{xz} / P_{cp}$  с глубиной увеличиваются, что логически вполне объяснимо (они компенсируют уменьшение по глубине напряжений  $\sigma_z$  ниже подошвы стенки).

Распределение напряжений в грунте I при «больших» нагрузках (рис. 4) аналогично описанному выше с той лишь разницей, что значения  $\sigma_x / P_{cp}$  на наружных гранях стенок по глубине

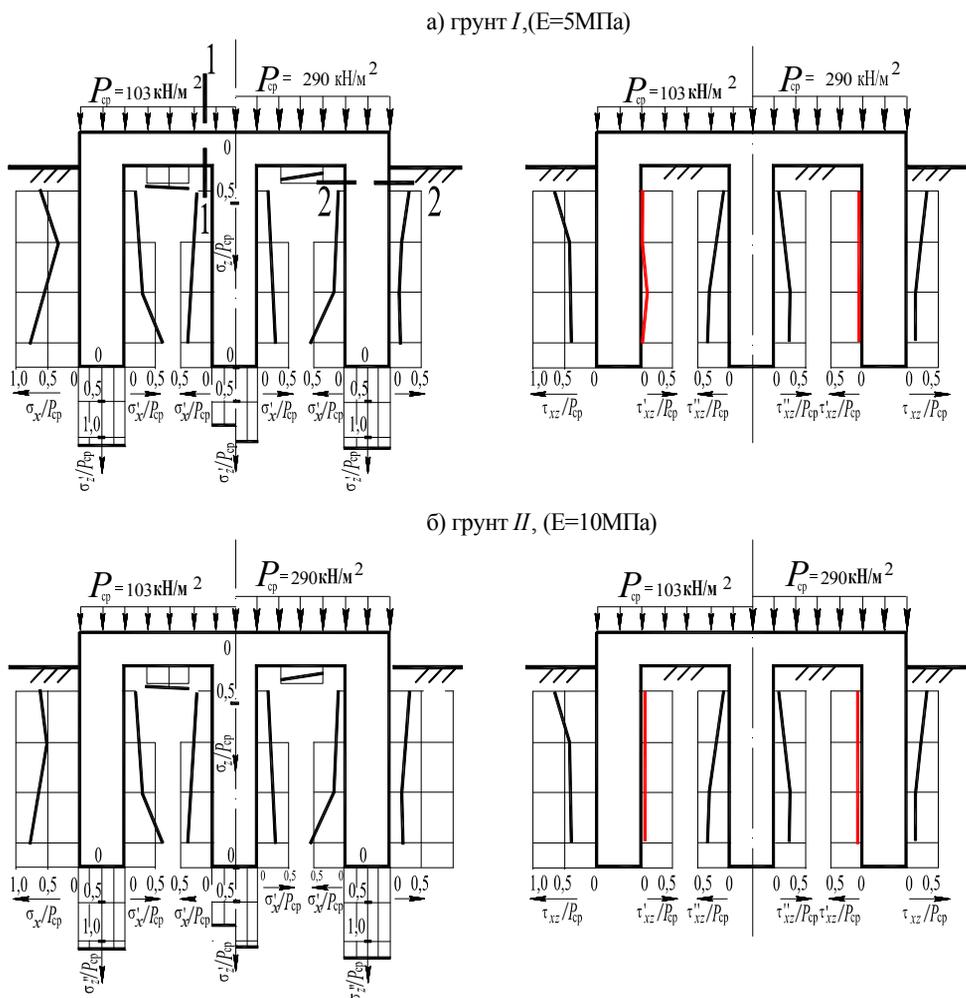


Рис. 4. Распределение контактных напряжений при заглублинии фундамента  $h_{\min}$ : а – грунт I –  $E = 5$  МПа,  $j = 15^\circ$ ,  $c = 0.04$  МПа; б – грунт II –  $E = 10$  МПа,  $j = 15^\circ$ ,  $c = 0.04$  МПа

уменьшаются; при отказе от условия «слипания» грунта с фундаментом очертания этих эпюр будут принципиально иными.

Распределение напряжений и в грунте II как при «малых», так и при «больших» нагрузках в качественном отношении аналогично описанному выше для грунта I.

При увеличении заглублиния подошвы фундамента характер распределения напряжений по контуру подошвы фундамента сохраняется (рис. 5).

Знание особенностей распределения контактных давлений под подошвой стенок и плитой фундамента позволяет более правильно назначить расчетную схему при оценке прочности щелевидного фундамента и надежнее оценить его прочность.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований по измерению напряжений в основании двухщелевых фундаментов, выполненных в лаборатории оснований и фундаментов Новосибирского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева в 1966-1967 гг. [4]. Опыты по установлению характера распределения контактных давлений проводили в грунто-

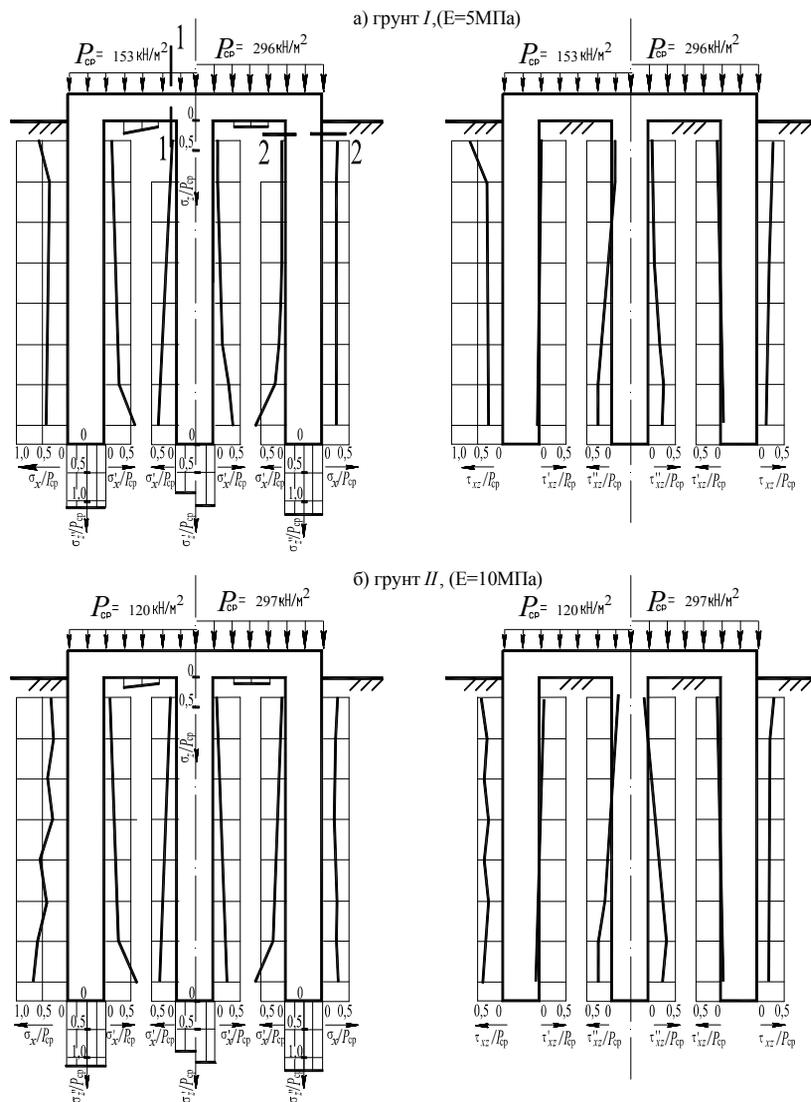


Рис. 5. Распределение контактных напряжений при заглублении фундамента  $h_{\max}$ : а – грунт I –  $E = 5$  МПа,  $j = 15^\circ$ ,  $c = 0.04$  МПа; б – грунт II –  $E = 10$  МПа,  $j = 15^\circ$ ,  $c = 0.04$  МПа

вом лотке размером  $2.2 \times 0.76 \times 1.2$  м. В качестве основания использовали рыхлый песок с удельным весом  $16.4$  кН/м<sup>3</sup> и плотный – с объемным весом  $17.6$  кН/м<sup>3</sup>.

По результатам опытов построены эпюры нормальных контактных давлений, выявлено отношение среднего контактного давления под подошвой плиты ( $P_{cp}$ ) к фактическому среднему давлению на модель фундамента ( $P$ ), т.е. установлена характеризующая степень передачи нагрузки фундаментной плитой на грунтовый сердечник. Это отношение названо коэффициентом

передачи нагрузки грунтовому сердечнику,  $K_{II} = \frac{P_{cp}}{P}$ . Отношение среднего контактного

давления под стенками фундамента к давлению  $P$  на модель фундамента характеризует сте-

Таблица 1. Коэффициенты передачи нагрузки плитой  $K_{II}$  и стенками  $K_C$  фундамента

Грунт основания	Грунт I (E = 5 МПа)				Грунт II (E = 10 МПа)				Метод определения
	$K_{II}$		$K_C$		$K_{II}$		$K_C$		
Внешняя нагрузка	$P_{min}$	$P_{max}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$P_{min}$	$P_{max}$	$P_{min}$	$P_{max}$	Нелинейное решение (III-фундамент)
Заглубление фундамента $h_{min}$	0,300	0,120	1,100	1,310	0,300	0,130	1,100	1,300	
Заглубление фундамента $h_{max}$	0,190	0,140	1,220	1,230	0,190	0,140	1,220	1,390	
Грунт основания	Плотный песок				Рыхлый песок				Эксперимент В.И. Иванова [4] (II-фундамент)
Заглубление фундамента $h_{min}$	0,214	0,214	3,250	2,260	-	-	-	-	
Заглубление фундамента $h_{max}$	0,267	0,372	2,280	1,880	0,270	0,446	2,480	1,830	

пень передачи нагрузки через подошву стенок фундамента на грунт. Это отношение названо коэффициентом передачи нагрузки стенками,  $K_C = \frac{P_{CP}}{P}$ .

Изменения коэффициентов  $K_{II}$  и стен  $K_C$  приведены в табл. 1.

Экспериментальные исследования [4] показали, что с возрастанием внешней нагрузки у двухщелевых фундаментов наблюдается увеличение коэффициента  $K_{II}$ , т.е. все большая доля её воспринимается грунтовым сердечником, а доля нагрузки  $p$ , воспринимаемая подошвой стенок, уменьшается, коэффициент  $K_C$ , соответственно, уменьшается. Обратная закономерность наблюдается у трехщелевых фундаментов (табл. 1), при возрастании нагрузки коэффициент передачи нагрузки плитной частью  $K_{II}$  уменьшается, но при этом увеличивается коэффициент передачи нагрузки стенками  $K_C$ . Значения коэффициентов  $K_{II}$  и  $K_C$  для III-фундамента со значениями  $h_{min} < h_{CP} < h_{max}$  промежуточные по сравнению с обозначенными в табл. 1.

Выводы:

- средняя величина установленных расчетом вертикальных контактных давлений под подошвой плиты III-фундамента значительно меньше величины среднего давления от внешней нагрузки на фундамент в целом;
- средняя величина установленных расчетом вертикальных контактных давлений под подошвами стенок III-фундамента больше величины среднего давления от внешней нагрузки на фундамент в целом;
- у трехщелевых фундаментов коэффициенты передачи нагрузки  $K_{II}$  с увеличением давлений уменьшаются, а коэффициенты  $K_C$  при этом увеличиваются, что не согласуется с опытными данными с использованием двухщелевых фундаментов (опыты В.Е. Иванова);

- характер распределения установленных расчетом главных напряжений в основании вдоль центральной вертикали трехщелевых фундаментов аналогичен распределению напряжений под двухщелевыми фундаментами с той лишь разницей, что на глубине  $z \approx 0.5$  наблюдается локальный максимум напряжений, обусловленный влиянием концентрированных контактных давлений под подошвами крайних стен.

Как видим, для подтверждения установленного расчетом характера изменения коэффициентов  $K_{\Pi}$  и  $K_C$  под подошвой трехщелевого фундамента, отличающегося от процесса изменения этих коэффициентов в основании двухщелевого фундамента, необходимо выполнить экспериментальные исследования для упомянутого явления.

### Список литературы

- [1] *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 224 с.
- [2] СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-85. М.: Стройиздат, 2000. 40 с.
- [3] СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры [Электронный ресурс] // Информационная система – Технонорматив.
- [4] *Иванов В.Е., Криворотов А.П.* // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1969. № 4. С. 31–35.