

## ОЦЕНКА МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

**Л. В. Халтурина, Ю. В. Халтурин**

Алтайский государственный технический университет  
им. И. И. Ползунова, г. Барнаул

*Дана сопоставительная оценка результатов расчетов с использованием модели идеально упругопластической среды с результатами экспериментальных исследований пыле-вато-глинистого основания в лабораторных условиях.*

**Ключевые слова:** *грунтовое основание, напряжения, деформации, расчетная модель.*

Выбор расчетных моделей, с достаточной достоверностью описывающих поведение грунтовых оснований при решении конкретных практических задач, остается одной из актуальных задач при проектировании фундаментов и подземных сооружений.

Правильный выбор моделей, наряду с достоверными сведениями об инженерно-геологических условиях и свойствах грунтов оснований, о нагрузках и воздействиях на основания и ряд других факторов определяют точность расчета и, как следствие, надежность объекта строительства.

Ввиду значительного разнообразия возводимых строений и грунтовых условий с одной стороны и большого количества предлагаемых расчетных моделей системы «грунтовое основание – сооружение» с другой, необходима обоснованная оценка области применения каждой модели.

Соответствие выбранной расчетной модели поведению грунтов в реальных условиях может быть оценено только на основании специально проводимых экспериментальных исследований, мониторинга сооружений и практического опыта. Накопление и обобщение экспериментальных данных, полученных при различных условиях проведения опытов и с учетом значительного разнообразия свойств грунтов остается одной из актуальных задач.

Основная цель данной работы состоит в сопоставительной оценке результатов комплексных экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния оснований, сложенных твердыми суглинками, и теоретических решений, полученных с использованием идеально упругопластической модели с предельной поверхностью, определяемой критерием Кулона-Мора (модель Кулона-Мора).

Экспериментальные исследования проводились в лотке в условиях плоской деформации.

Схемы расположения датчиков давления и деформометров приведены на рисунке 1.

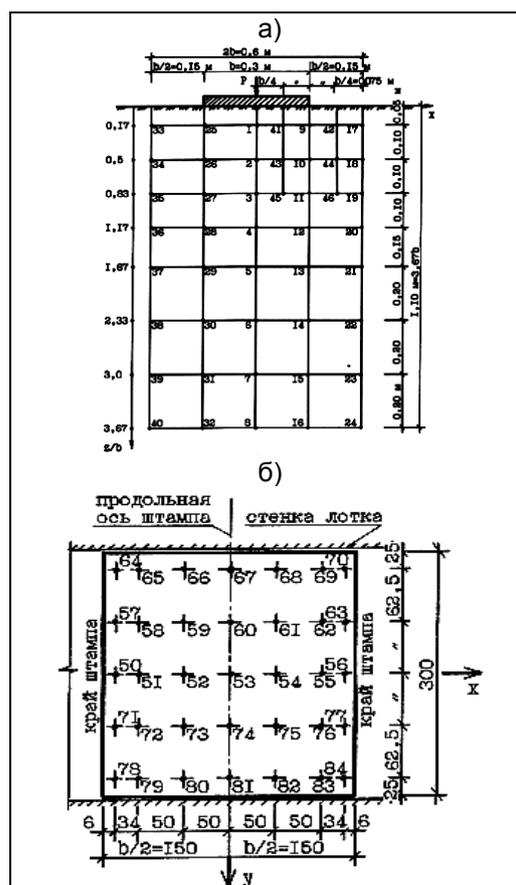


Рисунок 1 – Схема расположения измерительных приборов:  
а) в основании штампа; б) в контактной области грунта со штампом

В качестве основания использовались маловлажные суглинки тугопластичной консистенции плотностью  $\rho = 1,95 \text{ т/м}^3$ , с коэффициентом пористости  $e = 0,60$ , влажностью  $W=0,15\pm 0,02$ , числом пластичности  $J_p = 0,12$ , показателем текучести  $J_L = -0,3$ , модулем деформации  $E = 8 \text{ МПа}$ , углом внутреннего трения  $\varphi = 26^\circ$ , удельным сцеплением  $c = 0,04 \text{ МПа}$ . Методика проведения опытов, доказательство их достоверности, полученные результаты описаны в [1, 2].

В результате опытов были получены: значения вертикальных  $\sigma_z$ , горизонтальных  $\sigma_x$ , наклонных  $\sigma_n$  напряжений и деформаций в области основания глубиной  $3,67b$  и шириной  $2b$  ( $b$  – ширина подошвы штампа); значения вертикальных  $\sigma_z$ , горизонтальных  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  и наклонных  $\sigma_n$  напряжений в контактном слое грунта со штампом. Для оценки области применения идеально упругопластической модели с предельной поверхностью, определяемой критерием Кулона-Мора, были выполнены расчеты с использованием программы конечно-элементного анализа задач в области геотехники ICFEP (Imperial College Finite

Element Program), разработанной в Имперском колледже Лондона профессором Д.М. Поттсом [3]. Программа позволяет решать задачи в плоской, осесимметричной и пространственной постановке с учетом физической и геометрической нелинейности. В программе реализованы различные нелинейные модели работы грунтов, часть из которых широко применяется в инженерной практике.

Задача о напряженно-деформированном состоянии была решена методом конечных элементов. В качестве исходных данных принимались вертикальные перемещения узлов сетки, принадлежащих подошве штампа.

На рисунке 2 представлены эпюры измеренных и полученных расчетом (с использованием идеально упругопластической модели) вертикальных  $\sigma_z$  и горизонтальных  $\sigma_x$  напряжений. Эпюры напряжения  $\sigma_z$  на всех ступенях нагружения имеют наибольшие значения на различных глубинах: по центральной вертикали – на глубине  $(0,3-0,4)b$ ; по боковой вертикали – в контактной области грунта со штампом.

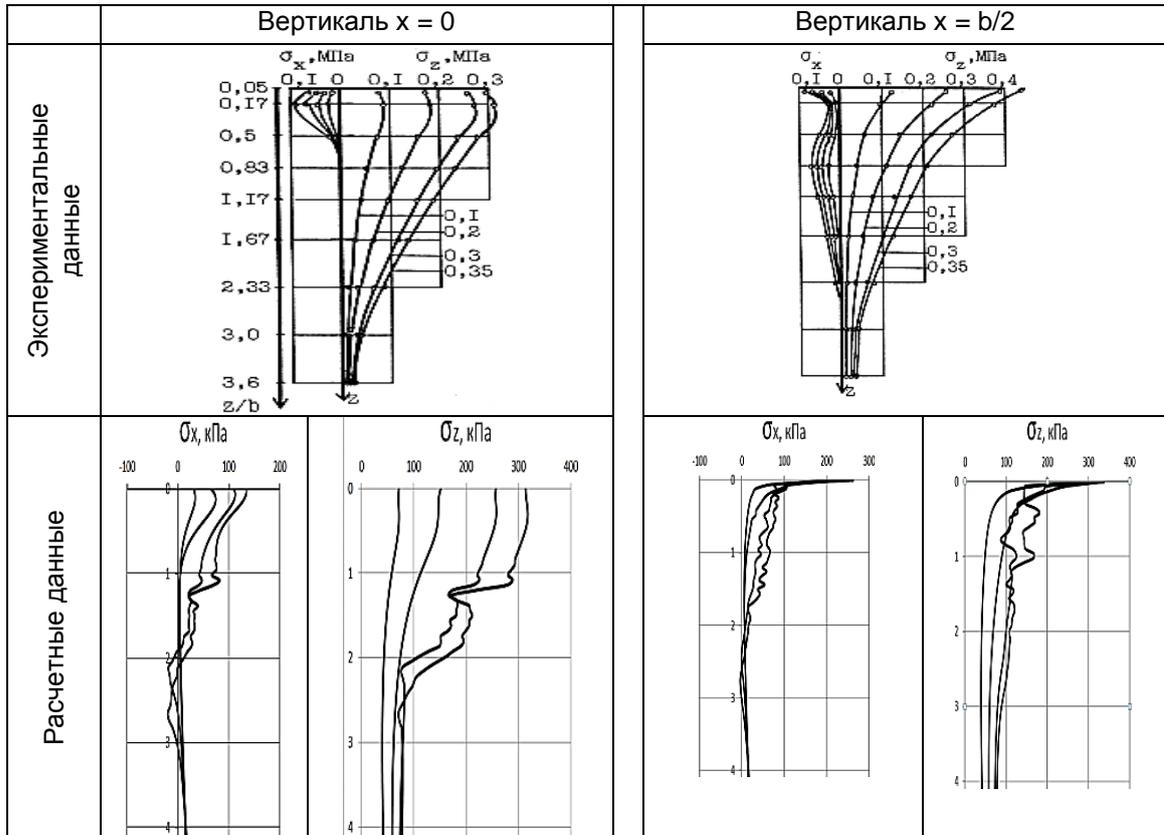


Рисунок 2 – Эпюры вертикальных  $\sigma_z$  и горизонтальных  $\sigma_x$  напряжений по опытным и расчетным данным: 0,1; 0,2; 0,3; 0,35 – ступени нагружения  $p$ ,  $\text{МН/м}^2$

## ОЦЕНКА МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

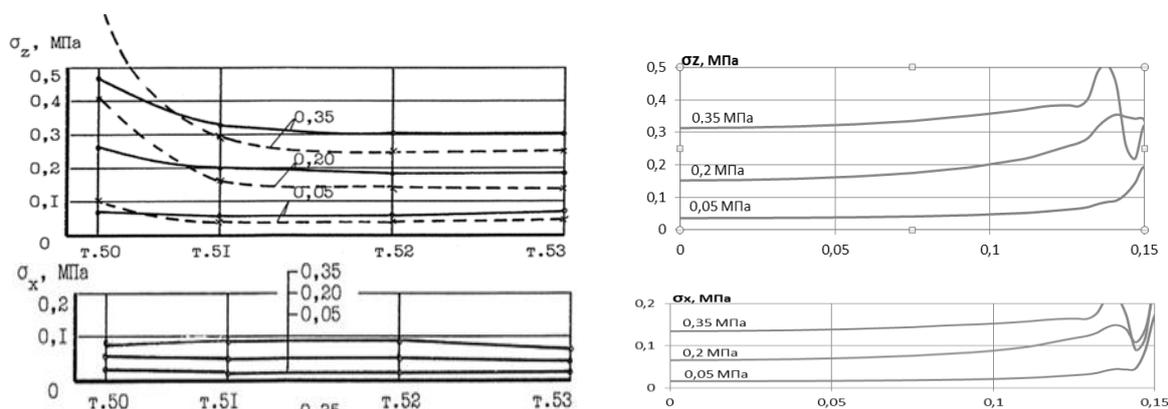


Рисунок 3 – Эпюры вертикальных  $\sigma_z$  и горизонтальных  $\sigma_x$  напряжений в контактной области грунта со штампом по опытным (слева) и расчетным с использованием модели Кулона-Мора (справа) данным

В контактной области грунта со штампом с ростом внешней нагрузки происходит интенсивный рост пластических деформаций, и напряженное состояние приближается к предельному. Свидетельством тому служит интенсивный рост вертикальных напряжений  $\sigma_z$  при малорастущих горизонтальных напряжениях  $\sigma_x$ .

Расчеты показали, что в основании с ростом нагрузки появляются области с растягивающими горизонтальными напряжениями. В этих же областях опытами зафиксированы значительные горизонтальные перемещения и деформации. В грунтовом основании, сложенном суглинками тугопластичной консистенции, в центральной части под подошвой штампа даже при нагрузках, близких к разрушающим, существует область допредельного напряженного состояния, так называемое «упругое ядро». В остальных исследуемых областях основания при увеличении нагрузки напряженное состояние в той или иной степени приближается к предельному, и наиболее интенсивно этот процесс происходит у граней штампа, а также под вершиной «упругого ядра».

Как видно из рисунка 3, расчеты с использованием модели Кулона-Мора, дают хорошую сходимость в распределении вертикальных напряжений  $\sigma_z$  в контактной области грунта со штампом с измеренными напряжениями. Теоретические горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  растут значительно интенсивнее, чем опытные и при нагрузках от 0,2 МПа превышение составляет более чем в 2 раза. С ростом нагрузки максимальные значения эпюр  $\sigma_z$  и  $\sigma_x$  смещаются от граней штампа к его центральной оси, а на расстоянии  $0,1b$  от

граней штампа при нагрузке 0,35 МПа происходит резкое падение всех компонент напряжений.

Напряженное и деформированное состояние грунтового основания, полученное по результатам расчетов с использованием модели линейно-деформируемой среды, в целом заметно отличаются от действительного напряженно-деформированного состояния (рисунок 4).

В решении идеально упругопластической задачи учитываются пластические деформации, что сближает расчетные и опытные эпюры и в качественном и в количественном отношении. Заметим, что по опытным данным вертикальные напряжения  $\sigma_z$  с глубиной убывают значительно быстрее, чем это следует из теоретических решений, полученных с использованием моделей линейно-деформируемой среды и Кулона-Мора. Это означает, что глубина сжимаемой толщи исследуемого в опытах основания получилась значительно меньшей, чем вычисленная с применением вышеупомянутых моделей.

Графики осадок, построенные по результатам расчетов с использованием модели Кулона-Мора, до нагрузок  $p = 0,12$  МПа почти прямолинейны (рисунок 5). Для оценки влияния на результаты расчета изменения модуля деформации и сцепления были выполнены сопоставительные расчеты с варьированием величин этих характеристик. Как видно из графиков, величина удельного сцепления грунта существенно влияет на величину осадок, и разница в значениях осадок (при одинаковых значениях нагрузок) увеличивается с 5% при  $p = 0,12$  МПа до 50% при  $p = 0,30$  МПа.

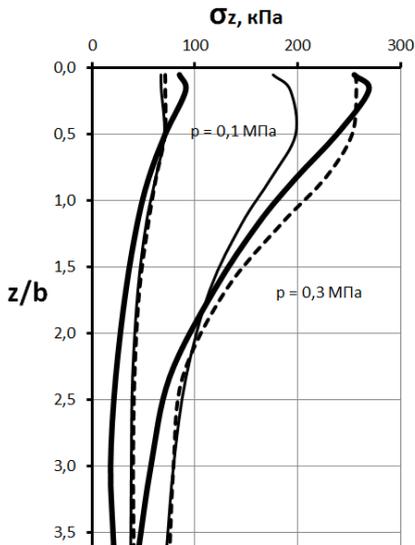


Рисунок 4 – Эпюры напряжений  $\sigma_z$  по центральной вертикали ( $x = 0$ ): опытные данные (толстая линия); теория линейно-деформируемой среды (тонкая линия); программа ICFEP (пунктирная линия)

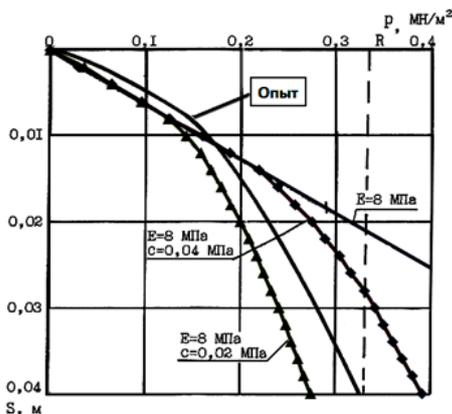


Рисунок 5 – Осадки штампа: опыт (толстая линия), теория линейно-деформируемой среды (прямая), программа ICFEP (линии с маркерами)

С ростом нагрузки интенсивность нарастания осадок под влиянием пластических деформаций увеличивается (рисунок 5).

Учет пластических деформаций в решении нелинейной идеально упругопластической задачи существенно сближает расчетные и опытные графики (по сравнению с линейным решением).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всесторонние экспериментальные исследования напряженного и деформированного состояний в условиях плоской деформации пылевато-глинистого основания жесткого штампа позволяют дать оценку соответствия теоретических решений полученным опытными данным, могут быть также полезны для верификации новых моделей и совершенствования инженерных методов расчета.

Идеально упругопластическая модель, как и модель линейно-деформируемой среды, не учитывает ряд важных особенностей деформируемости грунтов и грунтовых оснований (изменчивость деформационных и прочностных характеристик, анизотропию, подобие напряженного и деформированного состояний и др.).

Вместе с тем, учет развития пластических деформаций при нагружении основания в идеально упругопластической модели делает возможным определять нормальные контактные напряжения, выполнять расчет осадок фундаментов при давлениях больше расчетного сопротивления грунта и во всем диапазоне возрастания нагрузок получать более точные результаты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халтурина, Л. В. Лабораторные комплексные исследования напряженного и деформированного состояний грунтовых оснований / Л. В. Халтурина // Геотехника. Теория и практика. Общероссийская конф. молодых ученых, научных работников и специалистов: межвузовский тематический сб. трудов; СПбГАСУ. – 2013. – С. 190-194.
2. Халтурина, Л. В. Исследование напряженного состояния контактной области грунтового основания с жестким штампом в условиях плоской деформации / Л. В. Халтурина // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова. – 2014. – № 1. – С. 207-210.
3. Potts, D. M. Finite element analysis in geotechnical engineering: theory / D. M. Potts, L. Zdravkovic. London: Thomas Telford Publishing, 1999. 440 p.

**Халтурина Л.В.** – к.т.н., доцент кафедры «Теория и история архитектуры» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: khalt.larisa@mail.ru.

**Халтурин Ю.В.** – к.т.н., доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: khalt.yuriy@mail.ru.