



УДК 624.138

**С. И. Алексеев, Р. Р. Хисамов**Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШПУНТОВОЙ ОБОЙМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ**

Оценивается влияние конструктивной шпунтовой обоймы на несущую способность основания. Выполнено моделирование работы основания в шпунтовой обойме на песчаных грунтах. Рассмотрены условия моделирования НДС основания. Показано, что несущая способность оснований усиливаемых фундаментов возрастает пропорционально длине используемой шпунтовой обоймы. Приведено сопоставление результатов аналитического и численного решений, которые имеют удовлетворительную сходимость, что позволяет разработанный инженерный метод расчета взятого в обойму основания считать вполне обоснованным.

основание, фундамент, шпунт, обойма, несущая способность, моделирование.

**Введение**

Как при новом строительстве, так и при реконструкции зданий на слабых грунтах необходимо проводить целый ряд мероприятий, направленных на улучшение механических свойств грунтов и работы основания в целом. Все методы улучшения искусственных оснований можно разделить на три вида: конструктивные, механические и физико-химические. Одним из конструктивных методов является использование устройства шпунтового ограждения.

Изучением работы основания взятого в обойму занимались такие ученые, как Ю. Н. Мурзенко, Г. М. Борликов, А. В. Пилягин, Р. А. Усманов и др. Выполненные в данной области исследования позволили сделать вывод об эффективности использования таких конструкций для повышения несущей способности основания. За счет ограничения шпунтовой обоймы боковых перемещений грунта в наиболее напряженной зоне осно-

вания, а также улучшения условий работы основания на уровне низа обоймы несущая способность фундаментов в обойме возрастает в несколько раз. Применение таких конструкций позволило значительно сократить стоимость реконструктивных работ при усилении оснований, а также снизить осадки сооружения.

Ввиду отсутствия инженерного метода расчета фундаментов в обойме такие конструкции не нашли широкого применения в практике.

**1 Экспериментальные исследования**

В лаборатории оснований и фундаментов НПИ с 1967 г. под руководством Ю. Н. Мурзенко проводились экспериментальные исследования фундаментов с оболочками. Крупномасштабные исследования в лабораторных условиях выполнялись на испытательной машине МФ-1 в лотке  $3 \times 3 \times 2,2$  м,

заполненном среднезернистым песком. Перед опытами песок перекапывался, послойно выравнивался и уплотнялся до  $1,74\text{--}1,75\text{ кг/см}^3$ . Моделью фундамента служил штамп диаметром 400 мм, а моделью оболочки – металлическое кольцо диаметром 530 мм и высотой 260 мм [1].

Графики нагрузка-осадка для фундамента как с оболочкой, так и без оболочки представлены на рис. 1.

По результатам выполненных опытов предельная нагрузка на фундамент с оболочкой составила 30–33 т, а без оболочки – 6–7,2 т. Эпюры контактных напряжений под фундаментом в оболочки не изменяли своего очертания в процессе нагружения, а график осадок близок к прямой линии. Аналогичные наблюдения были зафиксированы Р. А. Усмановым при исследовании резервуаров на слабом основании, ограниченном по контуру забивными сваями [2]. Устройство такой конструктивной обоймы позволило существенно снизить стоимость работ при устройстве резервуаров в Западной Сибири.

С целью оценки эффективности использования шпунтовой обоймы было выполнено моделирование НДС работы основания без возможности бокового расширения.

В качестве моделей использовались железобетонные квадратные штампы площадью 500 и 750  $\text{см}^2$ . Для данных полевых испытаний обоймой служила металлическая труба квадратного сечения со стороной 30 см. Моделью основания в опытах выбран песчаный грунт, который является одним из типичных грунтов естественных оснований [3].

Перед каждым опытом грунт доводился до одинакового состояния, плотность грунта контролировалась статическим плотномером СПГ-1М, а также отбором образцов для лабораторных испытаний.

Нагрузочная рама установки для проведения испытаний вдавливающей нагрузкой (рис. 2) состояла из двух винтовых свай длиной 3,5 м с диаметром лопасти 250 мм. К сваям были приварены опорные пластины, на которые установлен швеллер № 24. Нагрузка на штампы передавалась ручным

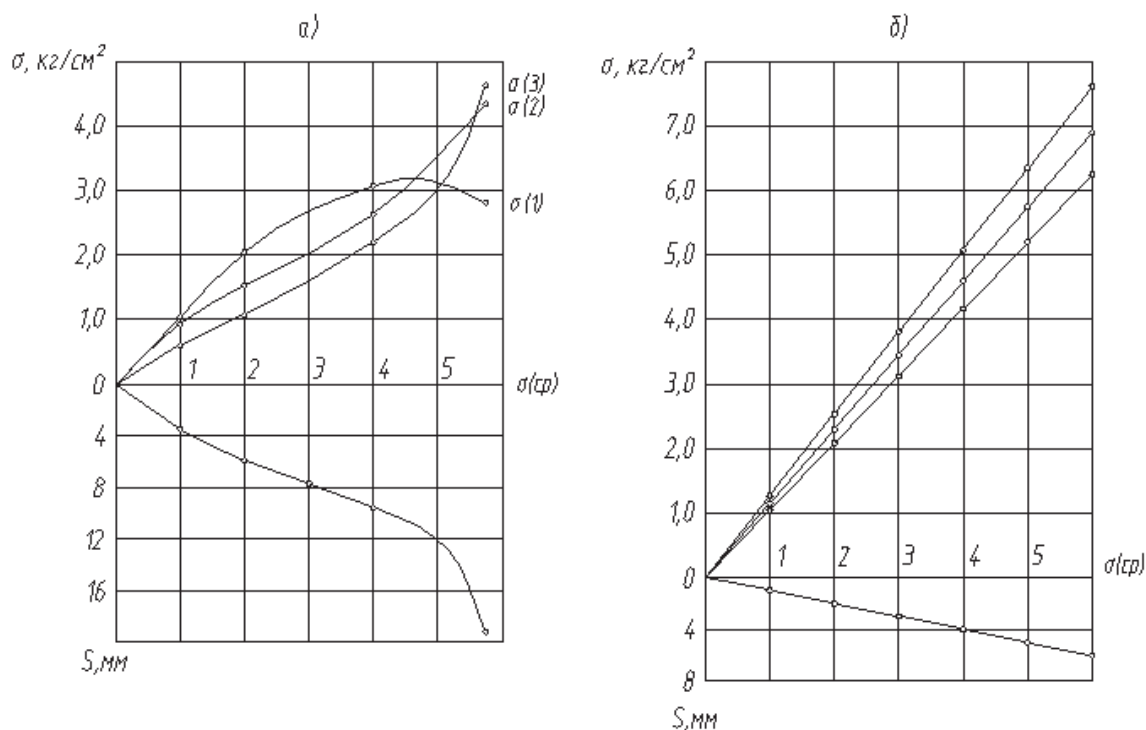


Рис. 1. Графики испытаний (по данным Ю. Н. Мурзенко):  
а – без оболочки; б – с оболочкой



Рис. 2. Общий вид опытной площадки

десятитонным гидравлическим домкратом. Величина передаваемой нагрузки фиксировалась динамометром. Величина осадки фундамента измерялась прогибомером.

Было выполнено несколько серий испытаний:

1 серия. Исследование несущей способности незаглубленных фундаментов.

2 серия. Исследование несущей способности фундаментов с использованием шпунтовой оболочки различной длины.

По результатам выполненных испытаний несущая способность фундаментов без оболочки составила 200 и 270 кПа для фундаментов площадью 500 и 750 см<sup>2</sup> соответственно (рис. 3).

Подобные же испытания были проведены для штампа с различной длиной обоймы (рис. 4).

Несущая способность фундаментов в обойме оказалась значительно выше (пропорционально длине обоймы), чем фунда-

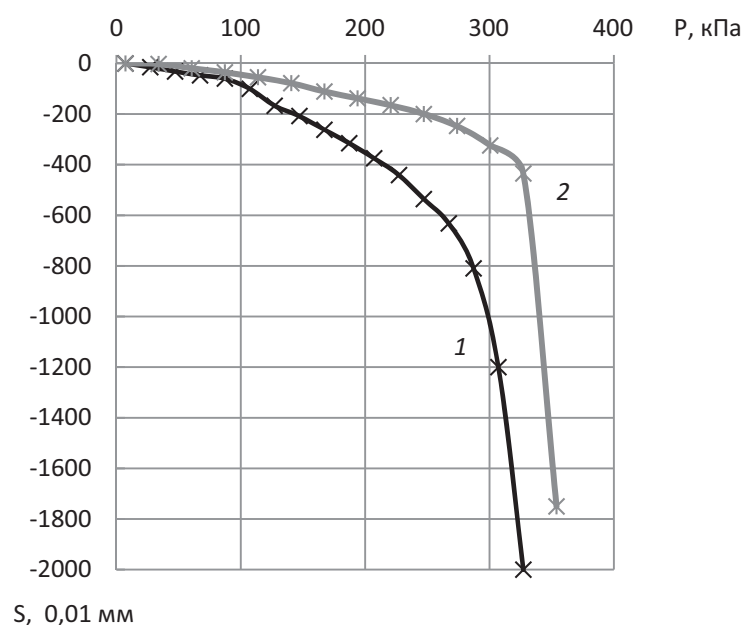


Рис. 3. Графики испытаний:  
1 – 500 см<sup>2</sup>; 2 – 750 см<sup>2</sup>

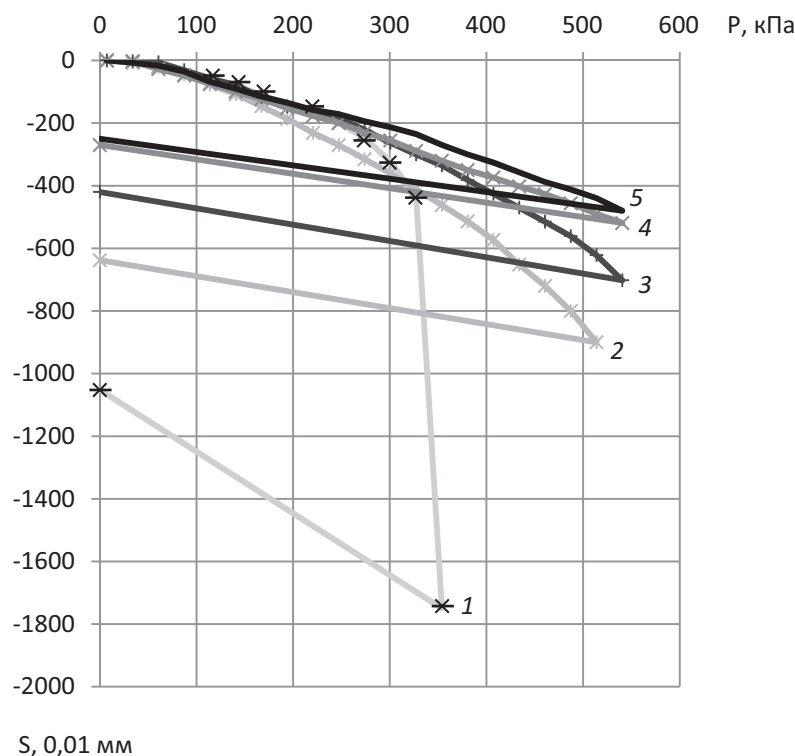


Рис. 4. График испытаний фундамента 750 см<sup>2</sup> в обойме:  
1 – без обоймы; 2, 3, 4, 5 – с обоймой длиной 0,5; 1; 1,5 и 2 м

ментов без обоймы. До наступления предельного состояния основания опыты довести не удалось.

## 2 Условия моделирования НДС

Моделирование НДС основания для условий постановки смешанной задачи теорий упругости и предельного равновесия впервые рассмотрено В. А. Флориным [4]. П. Д. Евдокимов ввел понятие о числе моделирования [5]:

$$N = \sigma / (b \times \gamma), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – давление под подошвой фундамента;  
 $b$  – размер фундамента;  $\gamma$  – удельный вес.

Таким образом, число моделирования для фундамента площадью 500 см<sup>2</sup> составит 51, а для фундамента площадью 750 см<sup>2</sup> – 56, что практически совпадает.

Для получения напряжений натурального объекта под подошвой фундамента достаточ-

но умножить число моделирования на ширину подошвы фундамента и на удельный вес грунта. Таким образом, при такой же плотности грунта и ширине подошвы фундамента 1 м напряжения под подошвой составят:  $51 \times 1 \times 17,4 = 887,4$  кПа.

По результатам выполненных стабилметрических испытаний песчаного грунта угол внутреннего трения составил 41°. В соответствии с СП 22.13330.2011, несущая способность такого квадратного фундамента должна составить:

$$\begin{aligned} N_u &= b' l' (N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_l) = \\ &= 1 \times 1 \times (88,33 \times 0,75 \times 1 \times 17,4) = \\ &= 1153 \text{ кН (1153 кПа)}. \end{aligned}$$

Однако следует отметить, что значения коэффициента  $N_\gamma$ , приведенные в отечественных нормативных документах, отражают решение задачи при наличии пригрузки для заглубленных штампов. Коэффициент  $N_\gamma$  соответствует линейному участку зависимости

$p_u(q)$  и является несправедливым в случаях нахождения штампа на поверхности или на небольшой глубине в сыпучей среде. Точное решение по определению коэффициента  $N_\gamma$  представлено в работах С. Мартина, С. Слоана и В. Г. Федоровского [6]. Для угла внутреннего трения  $41^\circ N_\gamma$ , по С. Слоану, составит 59,44, в результате предельное давление получится равным 776 кПа. Погрешность в определении предельного давления по сравнению с выполненным моделированием составит 12–20%.

Максимальное давление, до которого удалось довести фундамент в обойме длиной  $b$ , – 540 кПа. При переносе на натурный фундамент с размером в плане  $1 \times 1$  м давление под его подошвой составит 1970 кПа, что практически в 2,5 раза превышает давление без обоймы.

Очевидно, что с увеличением давления возрастает и осадка и, поскольку несущая способность такого фундамента очень высокая, необходимо вести ограничения на заданную величину осадки.

Допустим, предельная деформация сооружения не должна превышать 10 см. Согласно условиям моделирования [7]:

$$(S/b)_m = (S/b)_n. \quad (2)$$

Тогда, осадка модели составит:

$$S_m = 10 \text{ см} / 1 \text{ м} \times 0,274 \text{ м} = 2,74 \text{ см}.$$

Давление под подошвой модели с обоймой, соответствующее осадке в 2,74 см, равно 300 кПа. Следовательно давление под подошвой натурального фундамента будет равно 1094 кПа, что превышает предельное давление для фундамента без оболочки и тем более расчетное сопротивление.

### 3 Методика расчета основания в обойме

Аналитическая формула для определения вертикальных напряжений в ограничен-

ном обоймой основании имеет следующий вид [8]:

$$\sigma_v = 1/A \times [\gamma - (\gamma - A \times p) e^{-Az}], \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент;  $\gamma$  – удельный вес грунта, кН/м<sup>3</sup>;  $p$  – нагрузка на поверхности засыпки, кН/м<sup>2</sup>;  $z$  – глубина, на которой вычисляется вертикальное давление.

Коэффициент  $A$  определяется по формуле:

– для замкнутых стенок:

$$A = 2\xi \times \text{tg}(\varphi_0) / b_1 = \xi \times \text{tg}(\varphi_0) \times u/F; \quad (4)$$

– для незамкнутых стенок:

$$A = \xi \times \text{tg}(\varphi_0) / b_1, \quad (5)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления грунта;  $\varphi_0$  – трение грунта о стенку;  $b_1$  – полуширина фундамента;  $u, F$  – периметр и площадь ячейки.

Изменяя длину шпунта, а соответственно и величину пригрузки, можно по СП 22.13330.2011 найти величину предельного давления в уровне низа обоймы. Подставив величину предельного давления в формулу (3) и решив уравнение через  $p$ , получим формулу для определения несущей способности фундамента, взятого в обойму:

$$p = \gamma/A - [\gamma/A - (P_{\text{пред}})] e^{Az}. \quad (6)$$

Для проверки полученного аналитического решения (6) было выполнено сопоставление его с результатами численного моделирования в программном комплексе Plaxis 3D (рис. 5).

Результаты сопоставления численного и аналитического решений при определении предельного давления на основании приведены в табл. 1.

### Выводы

1. Использование шпунтовой обоймы позволяет повысить несущую способность ос-

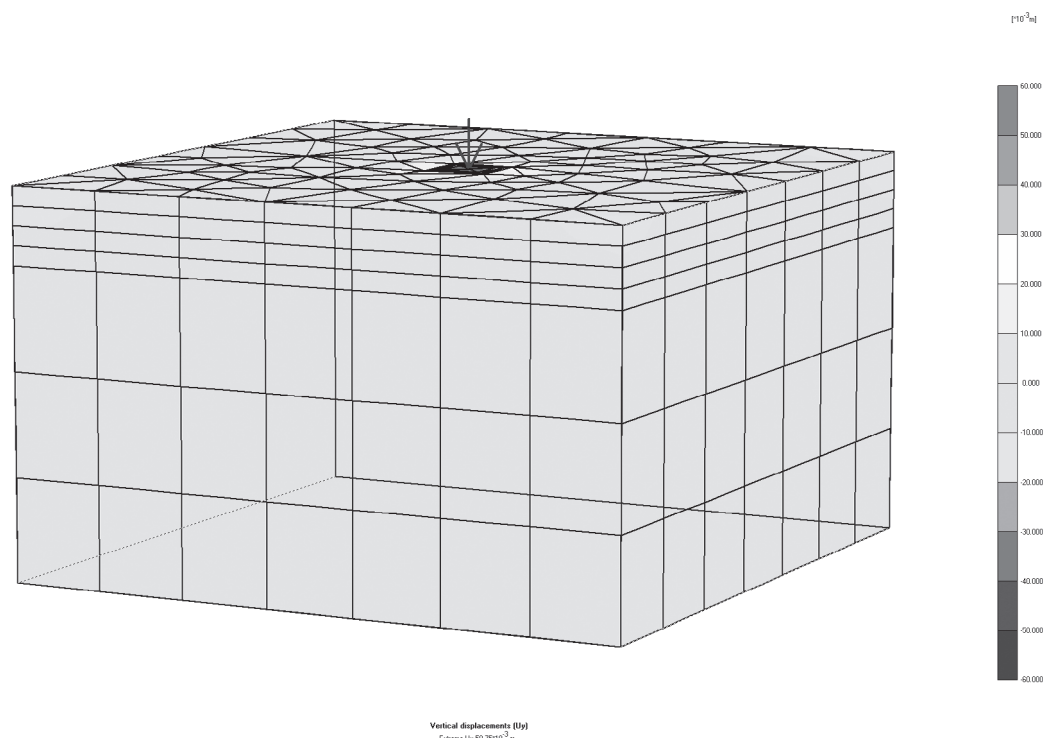


Рис. 5. Расчетная схема численного моделирования штамповых испытаний

ТАБЛИЦА 1. Сопоставление определения предельного давления в основании ограниченном обоймой при различной ее длине (Н)

| Н, м | $(\sigma_v)$ по Plaxis, кПа | $(\sigma_v)$ по расчету, кПа | $\Delta$ , % |
|------|-----------------------------|------------------------------|--------------|
| 0,5  | 498                         | 467                          | 6,6          |
| 1    | 700                         | 693                          | 1,0          |
| 1,5  | 1102                        | 1029                         | 7,1          |
| 2    | 1528                        | 1530                         | 0,1          |

нования за счет ограничения боковых перемещений грунта в наиболее напряженной зоне основания оболочкой, а также изменением условий работы основания по нижнему концу.

2. Моделирование напряженно-деформированного состояния с использованием расчетного геотехнического комплекса позволило спрогнозировать работу основания в шпунтовой обойме для натурного фундамента.

3. Несущая способность оснований усиливаемых фундаментов возрастает пропор-

ционально длине используемой шпунтовой обоймы.

4. Результаты аналитического и численного решений имеют удовлетворительную сходимость, что позволяет разработанный инженерный метод расчета взятого в обойму основания считать вполне обоснованным.

#### Библиографический список

1. **Исследование** фундаментов с оболочками для строительства многоэтажных каркасных



зданий / Г. М. Борликов, Э. В. Арина. – Новочеркасск, 1969.

2. **Деформации** модельных и натурных резервуаров на слабых грунтах / Р. А. Усманов // Нефтепромысловое строительство. – 1982. – № 5. – С. 5–7.

3. **Расчет** оснований зданий и сооружений в упруго-пластической стадии работы с применением ЭВМ / Ю. Н. Мурзенко. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 135 с.

4. **Расчет** оснований гидротехнических сооружений / В. А. Флорин. – Москва : Госстройиздат, 1948. – 188 с.

5. **Прочность** оснований и устойчивость гидротехнических сооружений на мягких грунтах /

П. Д. Евдокимов. – Москва : Госэнергоиздат, 1956. – 271 с.

6. **Решение** задачи предельного равновесия с использованием метода конечных элементов / К. Г. Шашкин, В. А. Шашкин, М. В. Дунаева // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 13. – С. 81–95.

7. **Условия** моделирования напряженно-деформированного состояния сыпучей среды под жестким штампом. Исследование оснований, фундаментов и гидротехнических сооружений: Труды НПИ. Т. 216. – Новочеркасск, 1970. – С. 12–22.

8. **Механика** грунтов / Н. А. Цытович. – Москва : Госстройиздат, 1963. – 636 с.

УДК 624.04

**Б. М. Аллахвердов, К. Ю. Полинкевич**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **ИТЕРАЦИОННЫЙ СПОСОБ РАСЧЕТА АНИЗОТРОПНОЙ БАЛКИ НА ПРОЧНОСТЬ**

Предложено описание методики расчета анизотропных балок на прочность, основанной на итерационном способе последовательного удовлетворения условиям равновесия и совместности деформаций. На численном примере приведены результаты, и оценена их близость к решению, полученному точным аналитическим способом. Определены упругие постоянные анизотропного материала в зависимости от направления армирования связующего вещества. Даны характеристики современного углепластика и очерчена область его применения.

теория упругости, анизотропия, ортотропная балка, метод итераций, напряжения, деформации.

### **Введение**

В работе рассмотрена возможность применения итерационного способа расчета на прочность к анизотропным балкам. Рассмотрен простейший расчет балка на двух опорах, имеющий точное аналитическое решение. Приведено сравнение результатов.

### **1 Закон Гука для анизотропных материалов**

Считая, как это принято в сопротивлении материалов, что при малых деформациях зависимость между деформациями и напряжениями соответствует линейному закону, запишем в общем случае анизотропии обобщенный закон Гука [1]: