

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИ ПОГРУЖЕНИИ СВАЙ В ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ

Анисимов К.И., Бекшаев С.Я.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Одесса*

При погружении свай в водонасыщенных грунтах происходит значительное повышение давления грунтовых вод в области, прилегающей к свае. При этом сооружения, находящиеся в этой зоне, испытывают обусловленное этим давлением воздействие, особенностью которого является переменная в пространстве интенсивность, что может приводить к опасным наклонам, деформациям и разрушениям сооружений (рис. 1).

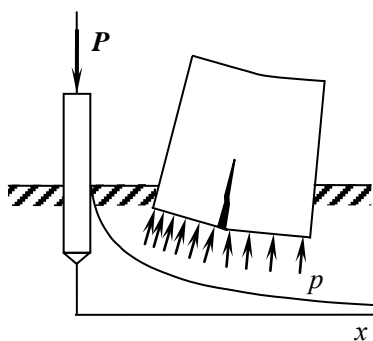


Рис. 1

Поэтому при выполнении соответствующих работ важно иметь ясное представление о характере распределения давления в зоне, прилегающей к свае, а также о его изменении со временем, т.к. ясно, что в результате фильтрации через определенное время это давление уменьшается, и состояние окружающего грунта перестает быть опасным.

Целью работы является исследование давления как функции  $p = p(x, y, z, t)$

пространственных координат и времени  $t$  в процессе погружения сваи.

Этот процесс естественно разделяется на два этапа. На первом этапе, который можно назвать активным, свая погружается в грунт под действием соответствующей технологической нагрузки.

Второй – пассивный – этап наступает после снятия технологического давления на сваю и представляет собой более или менее продолжительный период релаксации давления в грунте.

Примем следующие предположения.

Свая рассматривается как вертикальный цилиндр радиуса  $R$ . Грунт обладает однородностью и изотропией в горизонтальной плоскости, в которой фильтрация характеризуется коэффициентом  $\chi$ , не зависящим от места и времени. Фильтрацией по вертикали пренебрегаем.

В этих предположениях давление в некоторой точке грунта является функцией расстояния  $r$  этой точки от оси сваи и времени,  $p = p(r, t)$ , и подчиняется известному дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (1)$$

Введя новые безразмерные переменные  $x = r/R$  и  $\tau = \chi t / R^2$ , приведем это уравнение к стандартной форме

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial \tau}. \quad (2)$$

Будем рассматривать процесс погружения при постоянном давлении  $P$ , считая рассматриваемую область бесконечной,  $1 \leq x < \infty$ . Тогда начальные и граничные условия выразятся равенствами:

на первом этапе  $0 \leq \tau < \tau_1$

$$p(1, \tau) = P, \quad p(x, 0) = 0, \quad (3)$$

на втором этапе  $\tau_1 \leq \tau$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(1, \tau) = 0. \quad (4)$$

Точное решение уравнения (2) при условиях (3) известно ([1]) и представляется в виде

$$p = P + \frac{2P}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-u^2 \tau} \frac{J_0(ux)Y_0(u) - Y_0(ux)J_0(u)}{J_0^2(u) + Y_0^2(u)} \frac{du}{u}, \quad (5)$$

где  $e = 2,718\dots$ ,  $J_0$  и  $Y_0$  – функции Бесселя нулевого порядка первого и второго рода соответственно.

Неэлементарный характер решения (5) делает его неудобным для прямых практических вычислений и качественного инженерного анализа (бесконечный промежуток интегрирования, подынтегральная функция неэлементарна и на нижнем пределе обращается в бесконечность). Поэтому ограничиваются численным определением давления по формуле (5) для серии значений времени  $t$  и результаты вычислений представляют в виде графиков.

На рис. 2 приведен рисунок из [1], представляющий зависимость давления в точке от расстояния этой точки до оси сваи. Отметим, что по горизонтали отложен логарифм этого расстояния, а по вертикали – отношение  $p/P$  давления в точке к постоянному давлению  $y$  поверхности сваи. Числа у кривых равны значениям  $\tau = \chi t / R^2$ .

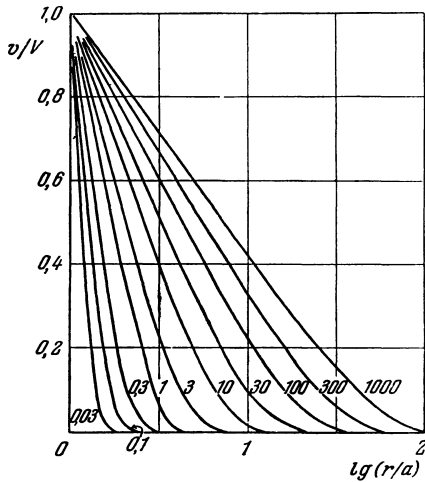


Рис. 2

двухпараметрическим семейством

Представленное семейство кривых позволяет приблизительно проследить за развитием процесса нарастания давления в течение погружения сваи. Как видно из рис.2, кривые давления имеют достаточно регулярный вид, что побуждает к поиску адекватного приближенного аналитического их представления через элементарные функции. Проведенный анализ показал, что искомое давление с хорошей точностью может быть представлено

$$p = p(x, t) = P \cdot \frac{\ln(1 + a \cdot x^{-b})}{\ln(1 + a)}, \quad (6)$$

где параметры  $a$  и  $b$  являются функциями времени, которые определяются равенствами

$$a = 450 \cdot t - 56700 \cdot (1 - e^{-0,00317 \cdot t}), \quad b = 2,92 + 2,55 \cdot t^{-0,306}. \quad (7)$$

На рис. 3 показано сравнение точных решений уравнения (2) (сплошные линии) и их приближенных представлений согласно (6), (7) (пунктирные линии) для значений  $\tau = \chi t / R^2$ , равных 0,5, 10, 400 и 1000.

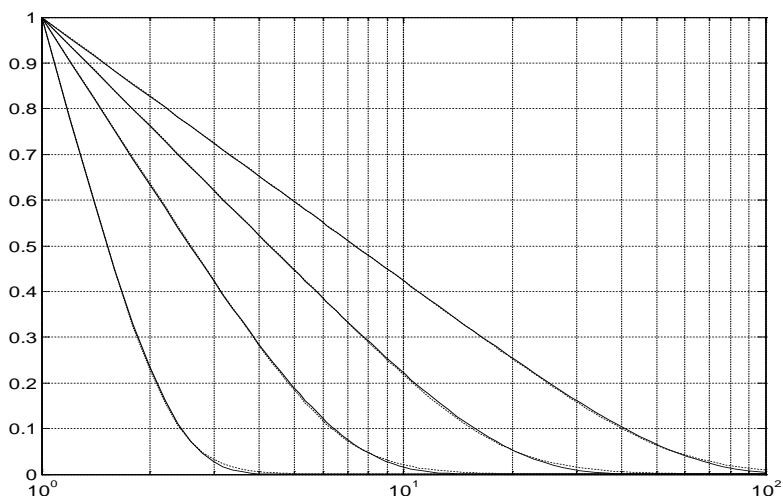


Рис. 3

Как видим, кривые, отвечающие точным и приближенным решениям, очень незначительно отличаются друг от друга в широком диапазоне изменения  $x$  и  $t$ , что позволяет с уверенностью применять предложенное аналитическое представление для оценки и прогнозирования состояния грунта при производстве и проектировании свайных работ.

Ниже на рис. 4 показаны соответствующие кривые при линейном (не логарифмическом) масштабе расстояния  $x$ , отложенного по горизонтали.

Они дают более точное представление о распределении давления вокруг сваи.

Логарифмические представления рис. 2 и 3 подсказывают еще ряд полезных выводов, основанных на практической прямолинейности участков кривых, отвечающих диапазону  $0,2 < p/P < 1$ . В этом случае

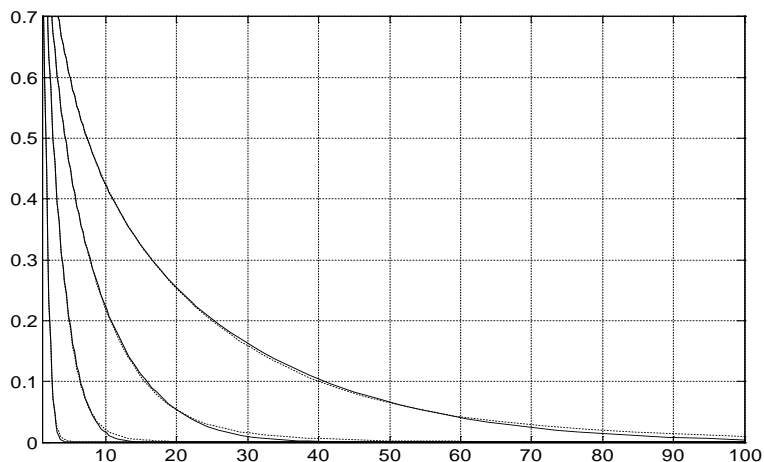


Рис. 4

$\ln(x)$  приближенно является линейной функцией давления  $p$   
 $\ln(x) \approx k(P - p)$ , где  $k = k(t)$  не зависит от расстояния  $x$ . Отсюда для двух каких-либо точек  $x_1$  и  $x_2$ , взятых в один и тот же момент  $t$

$$\frac{\ln(x_2)}{\ln(x_1)} \approx \frac{(P - p_2)}{(P - p_1)} \Rightarrow p_2 = P - (P - p_1) \cdot \frac{\ln(x_2)}{\ln(x_1)}, \quad (8)$$

что позволяет, узнав каким-либо образом (например, из опыта), давление  $p_1$  в точке  $x_1$ , вычислить в этот момент давление в произвольной точке  $x_2$  (не слишком удаленной от сваи, пока  $p > \approx 0,2P$ ). Точно также зная давление  $p_1$  в точке  $x_1$ , вычислим расстояние  $x_2$ , на котором в этот момент будет давление  $p_2$  ( $> \approx 0,2P$ )

$$x_2 = x_1^\alpha, \text{ где } \alpha = \frac{(P - p_2)}{(P - p_1)}. \quad (9)$$

Эти соображения могут быть полезны при экспериментальном исследовании состояния грунта.

Те же кривые рис. 3, 4 показывают, что зона повышенного давления ограничивается расстояниями, на которых  $p \approx 0,05P$ . За пределами этой зоны давление изменяется незначительно, и можно ожидать, что находящиеся там объекты не будут испытывать влияния погружения сваи. Соответствующий «радиус безопасности» можно определить из (6)

$$x = \left( \frac{a}{(1+a)^{p/P} - 1} \right)^{1/b}, \quad (10)$$

где следует принять  $p/P = 0,05$ . Размеры опасной зоны растут со временем погружения. Зависимость величины (10) от времени  $\tau$  показана на графике рис. 5.

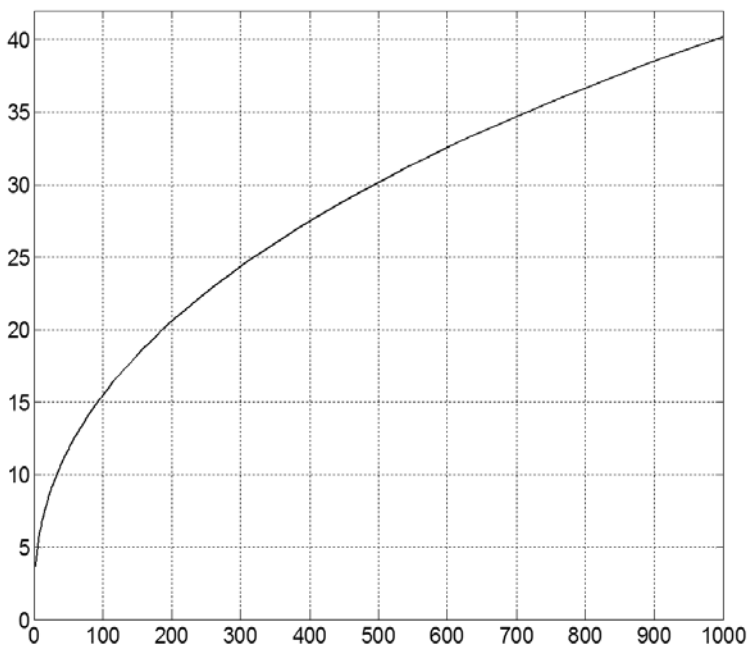


Рис. 5

### *Заклучение*

В работе численно исследовано распределение давления в грунте, окружающем сваю в процессе погружения. Предложено приближенное аналитическое представление, позволяющее упростить получение удовлетворительных инженерных оценок и прогнозировать состояние грунта в процессе погружения. Исследование процесса релаксации давления после погружения будет предметом последующих исследований.

### **Summary**

**Evolution of the groundwater pressure in the process of pile diving is explored. The numerical and analytical results are represented for effectively evaluate and predict the condition of the soil in the execution and design of pile works.**

### *Литература*

1. Г.Карслоу, Д.Егер. Теплопроводность твердых тел. М., «Наука», 1964, 488 с.