

Л.В. Янковский, О.А. Кивокурцев, В.В. Бернацкий

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОИМПЛАНТАТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ

*Представлены результаты полнофакторного эксперимента по оптимизации параметров геоимплантатных конструкций, используемых при строительстве и ремонте фундаментов протяженных транспортных объектов. Рассмотрена модель в виде алгебраического полинома 2-й степени. Найдены коэффициенты уравнения регрессии. Представлены результаты натурных и численных исследований.*

**Ключевые слова:** геоимплантат, геоимплантатная конструкция, закрепление оснований, реконструкция.

Известен способ усиления основания ленточных фундаментов при реконструкции зданий и сооружений (рис. 1), при котором под подошвой фундамента создается геоимплантатная конструкция (ГИК) [1]. Проведенные экспериментальные и численные исследования говорят об увеличении несущей способности грунтового основания сооружений, закрепленного усиленным слоем грунта, состоящим из армирующих элементов (геоимплантат) [2, 3, 4].

По форме геоимплантаты могут быть любые – наклонные, криволинейные, горизонтальные и вертикальные, в зависимости от задач по закреплению грунтового массива.

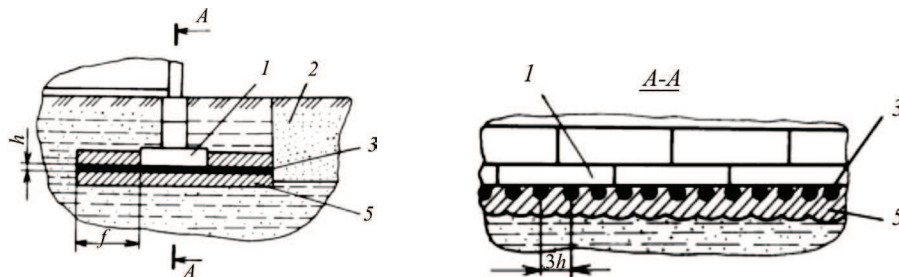


Рис. 1. Способ усиления основания ленточных фундаментов с помощью создания под подошвой ГИК: 1 – фундамент; 2 – технологический приямок; 3 – геоимплантат; 5 – зона уплотненного грунта

Данные конструкции можно изготавливать с помощью мощной малогабаритной техники: пневмопробойников, домкратов-гидроцилиндров и современных машин горизонтально направленного бурения (ГНБ) (рис. 2).



Рис. 2. Работа установки горизонтально направленного бурения

В настоящее время стоит проблема подбора параметров ГИК (длина, сечение, расстояние между геоимплантатами) для определенных грунтовых условий, чтобы затраты на изготовление были минимальными, а эффект максимальным.

Объект исследования можно представить следующей схемой (рис. 3).



Рис. 3. Схема объекта исследования

Переменные  $X_1, X_2, \dots, X_n$  называются входными независимыми переменными (факторами), переменные  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  – функциями отклика или функциями оптимизации. Функции отклика характеризуют состояние объекта исследований в зависимости от изменения факторов. Обычно устанавливают связь с одним из наиболее важных вы-

ходных параметров. Этот параметр называется параметром оптимизации. Каждый фактор принимает в опыте несколько значений, называемых уровнями. Совокупность уровней образует факторное пространство. Уравнение регрессии с ограничениями, накладываемыми на варьируемые факторы  $X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , называют математической моделью.

В нашем случае используем модель в виде алгебраического полинома 2-й степени:

$$Y = \sum_{j=0}^n B_j \cdot X_j + \sum_{i+j=1}^n B_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{j=1}^n B_{jj} \cdot X_j^2, \quad (1)$$

где  $n$  – количество факторов;  $B_0$ ,  $B_{ij}$ ,  $B_{jj}$  – коэффициенты модели.

Таким образом, формально целью эксперимента является определение численных значений коэффициентов уравнения регрессии, а для определения оптимальных условий протекания процессов находят значения факторов  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , соответствующих экстремуму полученной функции [5].

Расчет коэффициентов уравнения регрессии был проведен методом наименьших квадратов. При этом система нормальных уравнений записывается в виде

$$(X^T \cdot X)B = X^T \cdot Y. \quad (2)$$

Решив систему, получим вектор неизвестных коэффициентов уравнения регрессии  $B$  по формуле

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} X^T \cdot Y, \quad (3)$$

где  $Y$  – вектор усредненных опытных значений функции отклика размерностью  $N$ ;  $X$  – матрица неизвестных переменных размерностью  $(N \times n_B)$ ;  $N$  – общее число точек плана, количество опытов;  $n_B$  – число членов модели.

Если план эксперимента содержит все возможные неповторяющиеся комбинации уровней варьирования факторов, то такой эксперимент называется полным факторным экспериментом.

Итак, нам необходимо построить математическую модель, описывающую основание с усиленным слоем грунта (см. рис. 1). Параметром оптимизации выбираем значение осадки фундамента  $f(x) = S$  или в общем виде  $f(x) = S/b$ , где  $b$  – ширина фундамента. Основными факторами, описывающими усиленный слой, являются:  $f$  – вылет слоя за об-

рез фундамента,  $h$  – высота слоя или диаметр армирующего элемента. Для описания грунтовых условий выбираем модуль деформации  $E$ . Предполагаем, что воздействие каждого из этих факторов может быть описано параболой второго порядка. Для каждого фактора выбираем три уровня, которые называются кодированными: минимальный ( $X_i^{\min} = -1$ ), нулевой ( $X_i^0 = 0$ ), максимальный ( $X_i^{\max} = +1$ ). Переход от натуральных значений факторов к кодированным и обратно осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta Z_i &= \frac{Z_i^{\max} - Z_i^{\min}}{2}, \\ X_i^{\min} &= \frac{Z_i^{\min} - Z_i^0}{\Delta Z_i} = -1, \\ X_i^{\max} &= \frac{Z_i^{\max} - Z_i^0}{\Delta Z_i} = +1,\end{aligned}\tag{4}$$

где  $X_i$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;  $Z_i$  – натуральное значение  $i$ -го фактора;  $\Delta Z_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Всего необходимо провести  $N \cdot 3 = 27$  опытов. В этом случае факторное пространство представляет собой куб. Все условия, необходимые для постановки эксперимента, приведены в табл. 1. Каждый опыт проводился для 5 ступеней нагрузки. Данные экспериментов были получены с помощью программы, реализующей МКЭ в 2D (упругопластическая модель геосреды). Для этого были созданы три конечно-элементные сетки для каждой толщины слоя усиления размером  $4b \times 6b$ . Решение проводилось для фундамента шириной 2 м.

Таблица 1

**Исходные данные для планирования  
эксперимента в натуральных значениях**

Условия опыта	Обозначения	Уровни факторов в натуральных значениях		
		$X_1 (E, \text{МПа})$	$X_2 (f, \text{м})$	$X_3 (h, \text{м})$
Верхний уровень	$Z_i^{\max}$	10	$1,5b$	$0,125b$
Нулевой уровень	$Z_i^0$	7,5	$b$	$0,1b$
Нижний уровень	$Z_i^{\min}$	5	$0,5b$	$0,075b$
Интервал варьирования	$\Delta Z_i$	2,5	$0,5b$	$0,025b$

По данным эксперимента были также построены графики нагрузка – осадка, по которым, в частности, можно судить о влиянии того или иного фактора на осадку (рис. 4, 5, 6).

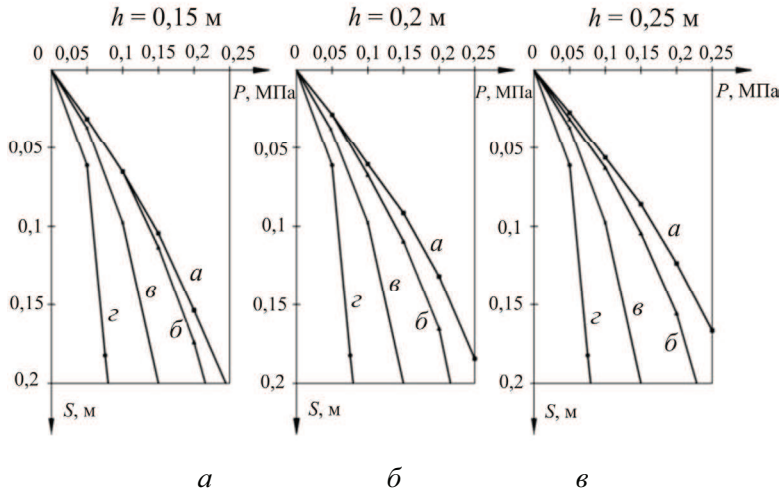


Рис. 4. Графики осадки фундамента при  $E = 5$  МПа:  
 $a - f = 3$  м;  $б - f = 2$  м;  $в - f = 1$  м;  $з$  – без усиления

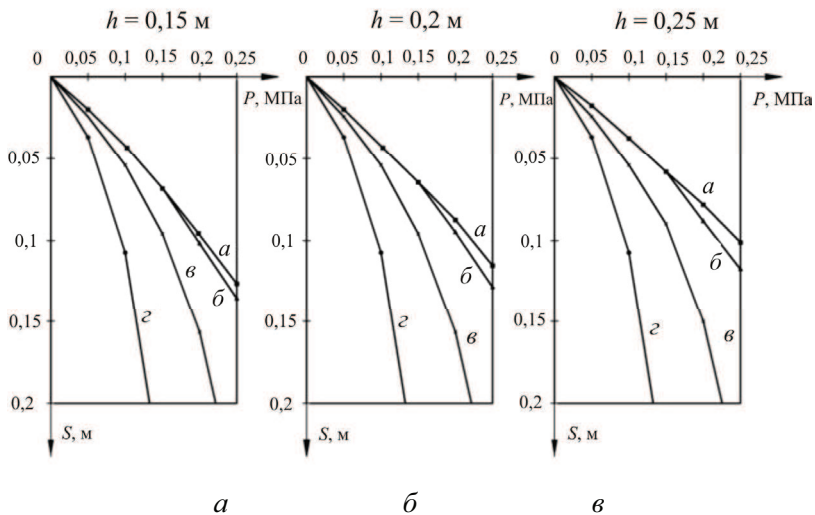


Рис. 5. Графики осадки фундамента при  $E = 7,5$  МПа:  
 $a - f = 3$  м;  $б - f = 2$  м;  $в - f = 1$  м;  $з$  – без усиления

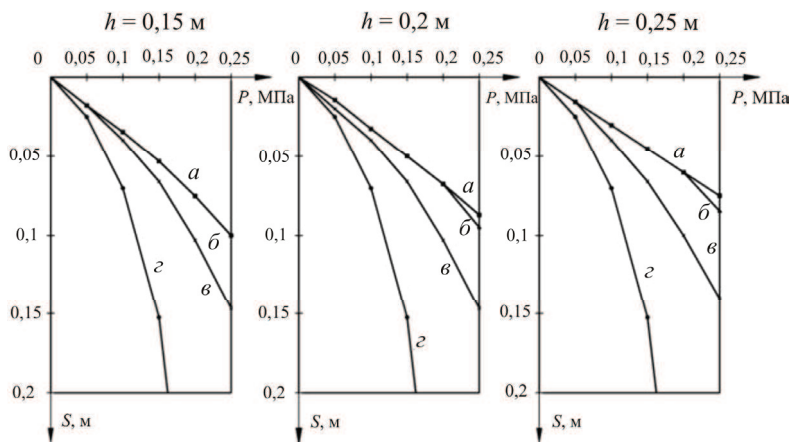


Рис. 6. Графики осадки фундамента при  $E = 10 \text{ МПа}$ :  
 $a - f = 3 \text{ м}$ ;  $б - f = 2 \text{ м}$ ;  $в - f = 1 \text{ м}$ ;  $г - \text{ без усиления}$

В табл. 2 приведен план трехфакторного эксперимента, содержащий результаты функции отклика для 5 нагрузок. Функция отклика – осадка, записана в долях от ширины фундамента  $Y = S/b$ .

Таблица 2

### План эксперимента

Номер опыта	$E f h$			Нагрузка $P$ , МПа				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
				$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$
1	-	0	-	0,016	0,033	0,056	0,085	0,127
2	0	0	-	0,011	0,0225	0,035	0,051	0,0685
3	+	0	-	0,0085	0,0175	0,0265	0,0375	0,05
4	-	-	-	0,018	0,048	0,2025	0,276	0,6915
5	0	-	-	0,012	0,0265	0,049	0,0785	0,129
6	+	-	-	0,009	0,019	0,0325	0,0515	0,0735
7	-	+	-	0,016	0,0325	0,053	0,076	0,103
8	0	+	-	0,011	0,0225	0,035	0,050	0,0655
9	+	+	-	0,0085	0,017	0,0265	0,0375	0,0495
10	-	0	0	0,0155	0,0315	0,0535	0,081	0,125
11	0	0	0	0,0105	0,0215	0,0325	0,0465	0,063
12	+	0	0	0,008	0,016	0,0245	0,034	0,0455
13	-	-	0	0,018	0,048	0,1055	0,310	0,8595
14	0	-	0	0,012	0,0255	0,047	0,0765	0,1205
15	+	-	0	0,0085	0,0185	0,0315	0,050	0,071
16	-	+	0	0,015	0,0305	0,0475	0,0675	0,0905
17	0	+	0	0,0105	0,021	0,0315	0,044	0,0575

Номер опыта	<i>Efh</i>			Нагрузка <i>P</i> , МПа				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
				$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$
18	+	+	0	0,008	0,017	0,0245	0,0335	0,0435
19	-	0	+	0,0145	0,0305	0,051	0,0765	0,116
20	0	0	+	0,010	0,0205	0,031	0,0445	0,060
21	+	0	+	0,0075	0,0155	0,0235	0,031	0,0425
22	-	-	+	0,018	0,047	0,1005	0,2945	0,763
23	0	-	+	0,0115	0,0255	0,047	0,076	0,1245
24	+	-	+	0,0085	0,018	0,0315	0,0495	0,070
25	-	+	+	0,014	0,0285	0,043	0,061	0,082
26	0	+	+	0,01	0,0195	0,0295	0,0405	0,052
27	+	+	+	0,0075	0,015	0,023	0,031	0,0395

По выбранной математической модели уравнение регрессии в общем виде примет вид

$$\begin{aligned}
 Y = & B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_{11} \cdot X_1^2 + \\
 & + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + B_{22} \cdot X_2^2 + \\
 & + B_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + B_{33} \cdot X_3^2 = \sum_{j=0}^3 B_j \cdot X_j + \\
 & + \sum_{i \neq j=1}^3 B_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{j=1}^3 B_{jj} \cdot X_j^2.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Обработка результатов полнофакторного эксперимента осуществлялась по программе *ФАКТ*, включающей стандартные программы обращения матриц (*MINV*) и умножения матриц (*GMPRD*), созданной на кафедре ОФим ПНИПУ. При этом для опытов № 4, № 13, № 22 четвертая и пятая ступень нагружения не включались в план, так как в них наблюдалась полная потеря несущей способности основания.

Для уравнения (5) были определены коэффициенты для пяти ступеней нагрузки. Решение проводилось в общем виде. Значения коэффициентов приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Коэффициенты уравнения регрессии**

Коэффициенты	Нагрузка P, МПа				
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
B0	0,01048	0,02048	0,02293	0,04868	0,06810
B1	-0,00394	-0,00978	-0,02603	-0,02434	-0,04127
B2	-0,00083	-0,00403	-0,01853	-0,01598	-0,03277
B3	-0,00047	-0,00103	-0,00756	-0,00350	-0,00488
B11	0,00122	0,00406	0,01564	0,00745	0,01288
B12	0,00058	0,00375	0,02029	0,00776	0,01891
B13	0,00008	0,00021	0,00913	0,00121	0,00160
B22	0,00072	0,00347	0,01631	0,01087	0,02005
B23	-0,00025	-0,00050	0,00717	-0,00171	-0,00235
B33	-0,00003	-0,00003	0,00556	0,00069	0,00122

Для того чтобы решить уравнение (5) в натуральных величинах, используют следующие формулы:

$$X_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{\Delta Z} = \frac{Z_1 - 7,5}{2,5} = 0,4E - 3,$$

$$X_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{\Delta Z} = \frac{Z_2 - b}{0,5b} = \frac{2}{b}f - 2, \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{Z_3 - Z_0}{\Delta Z} = \frac{Z_3 - 0,1b}{0,025b} = \frac{40}{b}h - 4.$$

По уравнению (5) определяется осадка основания фундамента, закрепленного усиленным слоем, в долях от ширины  $b$  фундамента. Поэтому для получения чистой осадки полученные значения необходимо умножить на величину  $b$ .

Для того чтобы выбрать оптимальные геометрические размеры усиления, нужно выбрать параметр оптимизации. На затраты по устройству усиленного слоя грунта в основном влияют два параметра: число проходок пневмопробойником для образования армирующих элементов на единицу длины фундамента и объем цементного раствора на единицу длины фундамента. Если мы возьмем один параметр постоянным, например объем цементного раствора на единицу длины фундамента, то легко выбрать необходимую толщину слоя (диаметр скважины) по минимальному количеству необходимых для его создания проходок пневмопробойником. Таким образом, можно подобрать параметры усиления при создании слоя непосредственно пневмопробойником.



В грунтах, где необходимо создавать усиленный слой забивкой трубами, параметром оптимизации является также еще и длина слоя или длина забиваемой трубы. Это сказывается на ширине технологического приямка, которая должна быть минимально возможной. Если возьмем постоянным объем цементного раствора на единицу длины фундамента, то для создания слоя нужно взять слой с минимальным вылетом за обрез фундамента. Условием выбора параметров усиления при реконструкции является неувеличение осадки после нагрузки. Поэтому ось осадки фундаментов без усиления  $S$  и ось осадки усиленных фундаментов  $S_y$  необходимо совместить. Для расчетов надо учитывать коэффициент запаса  $K_3 = 0,85$ , который страхует от неточной глубины заложения слоя.

$$S_y = K_3 \cdot S. \quad (7)$$

С учетом сказанного выше, графиков полнофакторного эксперимента (см. рис.4, 5, 6) и формулы (5) были построены номограммы для определения оптимальных параметров усиленного слоя (рис. 7) в зависимости от модуля деформации  $E$  для ширины фундамента  $b = 2$  м.

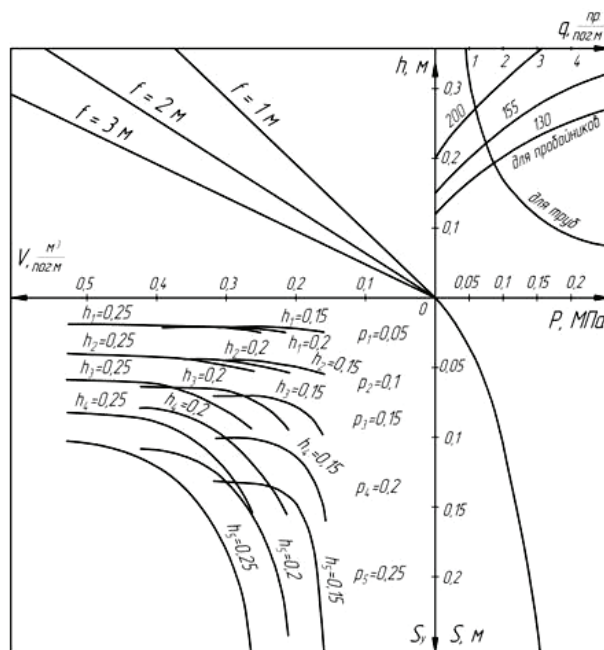


Рис. 7. Номограмма для определения параметров армирующего слоя в основании фундамента (ГИК) при  $E = 7,5$  МПа и  $b = 2$  м

Анализ результатов полнофакторного эксперимента показывает, что минимум функции отклика происходит при максимальных уровнях факторов. Параметры усиления необходимо оптимизировать в зависимости от технологии изготовления геоимплантат при минимальном объеме цементного раствора на единицу длины фундамента. При проходке скважин пробойниками параметром оптимизации будет минимальное число проходок на единицу длины, а при забивке элементов – минимальный вылет. Критерием выбора параметров усиленного слоя является условие неувеличения осадки фундаментов после реконструкции.

Инженерный расчет, проведенный по номограммам для усредненных грунтовых условий, дает завышенные результаты. Разработанные номограммы можно использовать только для грунтов в диапазоне с модуля деформации 5–10 МПа и нагрузке  $p$  до 0,25 МПа, при этом надо стремиться выбирать значение вылета  $f$  в диапазоне 0,5–1,5 $b$ , а толщину слоя  $h$  – от 0,075 до 0,125 $b$ . Для точного решения, с учетом реального напластования грунтов, необходим дополнительный уточняющий расчет по программе МКЭ [6; 7].

### Список литературы

1. Пат. 2032024 Российская Федерация. Способ усиления основания ленточных фундаментов при реконструкции зданий и сооружений / А.А. Бартоломей, Л.В. Янковский. Бюл. № 9, 27.03.95.
2. Янковский Л.В. Классификация геоимплантатных конструкций, используемых при строительстве и ремонте транспортных объектов // Строительные материалы. – 2011. – № 7.
3. Янковский Л.В., Ладин М.О., Орлов А.Д. Исследование НДС основания ленточного фундамента, армированного геоимплантатной конструкцией // Дороги. Инновации в строительстве. – СПб., 2011. – № 9. – С. 91–93.
4. Янковский Л.В. Крупномасштабный эксперимент по проверке модели основание-геоимплантат-фундамент // Строительные материалы. – 2011. – № 9.
5. Планирование эксперимента: метод. указания по курсам «Численные методы решения строительных задач с использованием ЭВМ», «УИРС» и для самостоятельной работы студентов специальности САД (29.10) / Сост. Т.Б. Пермякова, Н.Е. Рукавишникова, А.Б. Зырянов; Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1990. – 32 с.

6. Янковский Л.В. Описание модели геосреды основания, усиленного геоимплантатной конструкцией // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 1. – С. 75–81.

7. Янковский Л.В. Моделирование системы основание – геоимплантат – фундамент // Вестник ПГТУ. Охрана окружающей среды. Транспорт. Безопасность жизнедеятельности. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 1. – С. 90–98.

Получено 28.02.2012