

## Использование метода планирования эксперимента при определении прочностных характеристик укрепленных засоленных грунтов

*С. А. Федоров*

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

**Аннотация:** В статье исследуется применение метода математического планирования оптимального эксперимента при определении прочностных характеристик укрепленных грунтов. Для анализа исследовалась многокомпонентная грунтовая система, состоящая из незасоленных и засоленных грунтов, укрепленных битумом с добавками цемента и поверхностно-активными веществами (ПАВ). В процессе планирования эксперимента определены факторы, влияющие на прочностные характеристики и, их уровни, а также интервалы варьирования факторов. В результате решения задачи были получены математические модели сцепления и угла внутреннего трения укрепленных грунтов. На основании полученных уравнений регрессии были сделаны основные выводы.

**Ключевые слова:** укрепленные грунты, комплексное укрепление грунтов, планирование эксперимента, полный факторный эксперимент, математическая модель, уравнение регрессии.

Прочность грунтов, укрепленных органическими вяжущими, зависит, главным образом, от двух основных видов сопротивления: сцепления и угла внутреннего трения [1, 2]. На сцепление в основном оказывают влияние зацепление зерен скелета и прочность вяжущего, т. е. прочность структурных связей – внутриагрегатных и межагрегатных, адгезия и когезия вяжущих [3, 4]. На угол внутреннего трения материала влияют исходный гранулометрический состав грунта, форма и плотность упаковки, наличие воды и вяжущего [5].

Исследовалась многокомпонентная система: незасоленные и засоленные грунты (6 % солей), укрепленные битумом (4 и 0 %) с добавками цемента (3 %) и ПАВ. В качестве анионоактивной добавки применялась госсиполовая смола в количестве 5 % массы вяжущего материала, в качестве катионоактивной добавки использовали препарат типа Э-1 в количестве 0,01 % массы грунта [6-8].

Сцепление и угол внутреннего трения определяли на приборе

трехосного сжатия, как наиболее полно соответствующем реальным условиям работы исследуемого материала в конструкции [9, 10]. Испытания проводили на предварительно водонасыщенных образцах. Результаты оценивали с помощью кругов Мора, построенных по величине нормального давления, являющегося главным напряжением, и величине бокового давления, равного 1 и 3 кг/см<sup>2</sup> [11].

В работе использовали метод активного факторного планирования эксперимента Бокса-Уилсона типа  $2^i$  [12, 13], задачами которого являлись:

- определение оптимального для поставленных целей сочетания вяжущих;
- построение математических моделей процессов;
- установление на основе анализа этих моделей влияния различных факторов и их взаимодействий на явление.

Эти задачи решались при минимуме затрат. Так, использование однофакторного эксперимента для определения каждого из параметров оптимизации ( $Y_1, Y_1^1$  – сцепление материала при добавке соответственно госсиполовой смолы и препарата Э-1;  $Y_2, Y_2^1$  – угол внутреннего трения с теми же ПАВ) требовало постановки в каждом случае по 36 опытов. При использовании выбранного метода их количество сократилось до 8.

Для получения математических моделей процессов реализована реплика факторного эксперимента  $2^3$ ; исследуются три фактора, которые являются компонентами смеси. Четвертый фактор (расход цемента) при всех варьируемых факторах величина постоянная – 3 %.

В таблице №1 приведены уровни факторов, интервалы их варьирования и полученные уравнения регрессий.

Наибольшее влияние на  $Y_1$  оказывает засоление, с увеличением которого сцепление материала в водонасыщенном состоянии уменьшается.

---

Количество битума и госсиполовой смолы имеет близкие по величине коэффициенты, поэтому их влияние на сцепление почти одинаково. С увеличением количества битума и госсиполовой смолы (переход с нижнего на верхний уровень) сцепление повышается, о чем свидетельствует знак плюс перед коэффициентами уравнений.

Таблица № 1

## Уровни факторов, интервалы варьирования и уравнения регрессий

Факторы	$x_1$ – битум, %	$x_2$ – госсиполовая смола, %	$x_2^I$ – препарат Э-1, %	$x_3$ – засоление, %	Уравнения регрессий
Основной уровень, $x_{i0}$	6	2,5	0,005	3	$Y_1 = 2,6 + 0,84 \cdot x_1 + 0,86 \cdot x_2 - 1,2 \cdot x_3$
Интервал варьирования, $\Delta x_i$	2	2,5	0,005	3	$Y_1^I = 3,22 + 1,17 \cdot x_1 + 1,2 \cdot x_2^I - 1,12 \cdot x_3$
Верхний уровень (+1)	8	5	0,01	6	$Y_2 = 14,11 + 3,93 \cdot x_1 + 4,4 \cdot x_2 - 0,6 \cdot x_3 + 0,93 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,6 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,6 \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,11 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$
Нижний уровень (-1)	4	0	0	0	$Y_2^I = 11,37 + 2,37 \cdot x_1 + 1,62 \cdot x_2^I - 1,86 \cdot x_3$

Аналогично оцениваются коэффициенты в остальных уравнениях регрессий.

Результаты опытов, поставленных согласно плану эксперимента, показывают, что для укрепленных незасоленных грунтов, при любых сочетаниях вяжущих, сцепление материала находится не ниже 250 кПа (2,5 кг/см<sup>2</sup>), наибольшая величина – 690 кПа (6,9 кг/см<sup>2</sup>).

При укреплении избыточно засоленных грунтов для получения сцепления не ниже 100 кПа (1,0 кг/см<sup>2</sup>) необходимо использовать поверхностно-активные добавки и повышенный расход битума (8 %). Наибольшее сцепление при комплексном укреплении избыточно засоленных грунтов

составляет 510 кПа (5,1 кг/см<sup>2</sup>). Применение одного битума без добавок (цемента и ПАВ) возможно лишь при укреплении незасоленного грунта при расходе его 8 %.

Значения углов внутреннего трения находятся в пределах 10-23° для незасоленных укрепленных грунтов и 9-17° для засоленных. Ясно прослеживаемой зависимости угла внутреннего трения от каких-либо показателей нет, однако можно отметить, что комплексное укрепление повышает его величину. Довольно низкая величина угла внутреннего трения объясняется большим содержанием воды в порах грунта (образцы водонасыщенные), снижающим трение частиц. Причем, чем большее количество воды связывается частицами, т. е. чем выше гидрофильность, тем значительно уменьшается трение. Это и наблюдается при переходе от комплексно укрепленных грунтов к грунтам, укрепленным одним битумом. Дополнительное увлажнение засоленных грунтов вызывает понижение концентрации окружающего частицы грунта грунтового раствора, сопровождающееся утолщением сольватных оболочек и уменьшением трения между частицами. Поэтому угол внутреннего трения укрепленных засоленных грунтов на 3-9° ниже незасоленных.

Полученные в результате планирования уравнения регрессий были проверены как аналитическим, так и графическим методом. Хорошая сходимость кривых по расчетным и опытным данным подтверждает достоверность полученных уравнений.

Изучалось также изменение сил сцепления материала во времени. Общим является ясно выраженное увеличение сцепления со временем. Характер кривых, особенно при комплексном укреплении, близок для грунтов незасоленных и избыточно засоленных; разница лишь в количественном выражении величины. Если сцепление незасоленного комплексно укрепленного грунта в возрасте 120 суток достигает 600-720 кПа

---

(6,0-7,2 кг/см<sup>2</sup>), то избыточно засоленного 450-500 кПа (4,5-5,0 кгс/см<sup>2</sup>). Если образцы незасоленного и избыточно засоленного грунта, укрепленные соответственно 4 % битума и 4 % битума + 3 % цемента, в возрасте 7 суток вообще разрушались, то в более поздние сроки твердения (28 суток) они имели сцепление 100 и 180 кПа (1,0 и 1,8 кгс/см<sup>2</sup>), а в возрасте 120 суток сцепление достигало 210 и 310 кПа (2,1 и 3,1 кгс/см<sup>2</sup>). Следовательно, со временем продолжают процессы упрочнения кристаллизационных связей в результате гидратационного твердения цемента и возникают элементы конденсационных связей грунта с битумом.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Метод полного факторного планирования эксперимента, приведенный в данной работе, позволил при минимальном объеме экспериментальных работ получить математические модели процессов (см. таблицу № 1), на основе их анализа выявить влияние различных факторов на прочность и их взаимодействие, а также определить оптимальное для поставленных целей, сочетание вяжущих.

2. Полученные по задаче планирования величины сцепления и угла внутреннего трения позволяют считать одним и наиболее эффективных мероприятий по повышению прочности материала комплексные **методы укрепления** грунтов с использованием поверхностно-активных веществ.

3. Испытания, проведенные на образцах укрепленного грунта при длительных сроках хранения, показывают дальнейшее повышение сцепления во времени, что свидетельствует о росте процессов структурообразования в укрепленных засоленных грунтах.

### Литература

1. Середин В.В. К вопросу о прочности засоленных глинистых
-

грунтов // Инженерная геология. 2014. №1. С. 66-69.

2. Маклаков С.Ф., Мишин В.А. Экспериментальное определение предела прочности грунта на сдвиг при динамическом нагружении // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4476.

3. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Монография. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.

4. Юань Ц., Лю Ч.Х., Ху Г.С., Фанг И.Г. Экспериментальный анализ влияния состава грунта на прочностные характеристики // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. №5. С. 19.

5. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю., Джаро Мухаммед Назим. Определение угла внутреннего трения несвязных грунтов при компрессионных испытаниях // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2012. №3. С. 17.

6. Кабалин М.Д., Замуруев А.В., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А. Теоретические аспекты укрепления грунта в дорожном строительстве // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №3. С. 64-76.

7. Андреева А.В., Буренина О.Н., Давыдова Н.Н., Саввинова М.Е. Исследование влияния способов укрепления грунтов // Наука и современность. 2015. №38. С. 147-150.

8. Gurbanov H.R., Adigezalova M.V. Investigation of the efficiency of the composition containing gossypol resin against corrosion and salt depositions // Chemchemtech. 2022. V. 65. №12. pp. 76-86.

9. Уашов Е.Н. Экспериментальное исследование грунта в приборе трехосного сжатия // Студенческий. 2021. №18-1. С. 24-28.

10. Куликов О.В., Кучияш Е.В. Определение показателей прочности и деформируемости грунтов методом трехосного сжатия // Технические науки: Проблемы и решения. Сборник статей по материалам XVII

---

международной научно-практической конференции. 2018. №11. С. 86-92.

11. Цой П.А., Усольцева О.М. Поведение коэффициентов сцепления и углов внутреннего трения горных пород в зависимости от функционального представления огибающей Мора // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. №1. С. 167-171.

12. Ву Ким З., Баженова С.И., До М.Ч., Хоанг М.Т., Нгуен В.З., Нгуен З.Т.Л. Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса-Уилсона // Инженерный вестник Дона, 2021, №5 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n5y2021/6988](http://ivdon.ru/magazine/archive/n5y2021/6988).

13. Tri B.M. Probability statistics and experimental planning. Publishing scientific and technical, 2018. 256 p.

### References

1. Seredin V.V. Inzhenernaja geologija. 2014. №1. pp. 66-69.
  2. Maklakov S.F., Mishin V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4476](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4476).
  3. Boldyrev G.G. Metody opredelenie mehanicheskikh svojstv gruntov. Sostojanie voprosa [Methods for determining mechanical properties of soils. Status of the question]. Monografija. Penza: PGUAS, 2008. 696 p.
  4. Juan' C., Lju Ch.H., Hu G.S., Fang I.G. Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov. 2018. №5. p. 19.
  5. Ter-Martirosjan Z.G., Mirnyj A.Ju., Dzharo Muhammed Nazim. Internet-vestnik VolgGASU. 2012. №3. p. 17.
  6. Kabalin M.D., Zamuruev A.V., Kurlykina A.V., Kuznecov D.A. Vestnik GGNTU. Tehniceskie nauki. 2023. T. 19. №3. pp. 64-76.
  7. Andreeva A.V., Burenina O.N., Davydova N.N., Savvinova M.E. Nauka i sovremennost'. 2015. №38. pp. 147-150.
  8. Gurbanov H.R., Adigezalova M.V. Chemchemtech. 2022. V. 65. №12.
-



pp. 76-86.

9. Uashov E.N. Studencheskij. 2021. №18-1. pp. 24-28.
10. Kulikov O.V., Kuchijash E.V. Tehnicheskie nauki: Problemy i reshenija. Sbornik statej po materialam XVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. №11. pp. 86-92.
11. Coj P.A., Usol'ceva O.M. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. 2021. №1. pp. 167-171.
12. Vu Kim Z., Bazhenova S.I., Do M.Ch., Hoang M.T., Nguen V.Z., Nguen Z.T.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №5. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n5y2021/6988](http://ivdon.ru/magazine/archive/n5y2021/6988).
13. Tri B.M. Probability statistics and experimental planning. Publishing scientific and technical, 2018. 256 p.

**Дата поступления: 24.04.2024**

**Дата публикации: 30.05.2024**