

# ПРИКЛАДНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ БАРНАУЛА

**В. Н. Лютов, В. А. Казин**

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

Приводятся некоторые результаты математического моделирования для реальных условий трёх различных схем закрепления плитного фундамента многоэтажного жилого здания на лёссовых грунтах города Барнаула. Вычисления и построения результатов математического моделирования производилось в программном обеспечении Alterra, адаптированном к реальным условиям. Выявлены наиболее рациональные схемы закрепления основания методом струйной цементации для условий исследуемых лёссовых грунтов и демонстрация работы программного обеспечения.

**Ключевые слова:** лессовые и лессовидные грунты, инъекционные способы укрепления грунтов, струйная цементация, математическое моделирование закрепления лессовых и лессовидных грунтов.

В настоящее время для метода закрепления грунтов по струйной технологии не существует регламентируемой нормативными документами методики по определению механических и геометрических параметров закрепляющего грунтоцемента на стадии проектирования. Как правило, при проектировании эти параметры назначаются весьма условно и ориентировочно, фактически наугад.

После выполнения на объекте грунтоцементного массива эти параметры определяются по факту выполнения. При этом результаты полевых и лабораторных испытаний грунтоцемента на прочность и деформативность показывают столь значительный разброс значений, что весьма проблематично определить фиксированные расчетные величины даже у выполненного закрепленного массива.

Технология струйной цементации в грунте, или Jet-Grouting, как метод создания искусственного основания стала широко использоваться в строительной практике в начале 70-х гг. XX в. Основой для создания новой геотехнологии послужили технологии разрушения горных пород с помощью водяной струи, известные в гидромеханизации с 30-х гг [1, 2].

При всей на настоящий момент малой изученности процесса моделирования и проектирования свойств, струйная цементация является одним из наиболее эффективных методов закрепления лёссовых просадочных грунтов в том числе и для условий Алтайского края [3].

Целью данной работы является разработка варианта прикладной математической модели механических и геометрических свойств грунтоцемента, применение предложенной математической модели для расчёта закрепления лёссового просадочного основания в реальных геологических условиях г.Барнаула и Алтайского края.

## СБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На площадке, расположенной по адресу: г. Барнаул ул. Космонавтов № 6в были пробурены пять скважин глубиной по 15,0 м, а также выполнены геофизические работы по определению наличия блуждающих токов в 2-х точках. Места расположения выработок показаны на рисунке 1

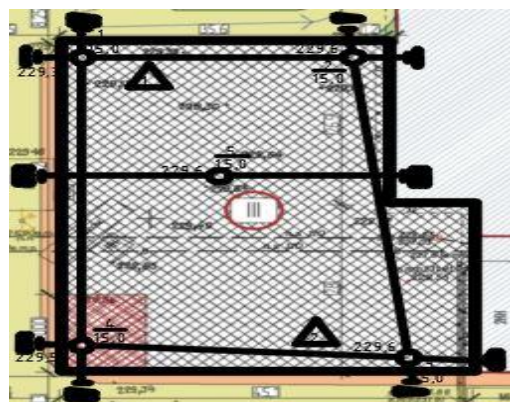


Рисунок 1 – Расположение инженерно-геологических выработок

Полевые инженерно-геологические работы выполнялись 10-15 мая 2016 года. Бурение скважины проводилось буровой установкой УГБ-1ВС вдавливающим и ударно-канатным способами с отбором проб грунта ненарушенной и нарушенной структуры.

В грунтовой лаборатории в соответствии с действующими ГОСТами определялись физико-механические и агрессивные свойства грунтов. Компрессионные испытания проведены методом «двух кривых» в условиях природного залегания грунтов. Сдвиговые испытания произведены в условиях консолидированного среза при полном водонасыщении в условиях природного залегания грунтов.

Краткое заключение по грунтовой ситуации: исследуемая область основания сложенная тремя слоями грунтов (таблица 1):

- 1 слой – супесь лёссовидная просадочная высокопористая твёрдая;
- 2 слой – суглинок лёссовидный просадочный низкопористый полутвёрдый;
- 3 слой – суглинок лёссовидный непросадочный твёрдый.

Для моделирования было принято решение взять за основу проект уже строящегося в городе Барнауле здания, отвечающего следующим требованиям (рисунок 2):

- здание должно быть многоэтажным, причем этажность должна быть не менее 9 этажей, в расчётном случае здание имеет 17 этажей;
- в качестве фундамента должна выступать фундаментная плита, что является наиболее часто применяемым и рациональным расчёт-

ным случаем для закрепления грунтов методом струйной цементации.

Данные требования сформированы авторами работы с целью демонстрации наиболее часто встречающейся и рациональной ситуации для применения технологии закрепления струйной цементацией грунтов.

#### ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАДАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Первым этапом является задание характерных точек фундаментной плиты в двухмерной системе координат, причём единицы измерения согласно СИ – метры.

В данном расчётном случае была выбрана плита сложной формы, для демонстрации возможности программы. Заметим, что наружная линия контура фундаментной плиты формируется автоматически.

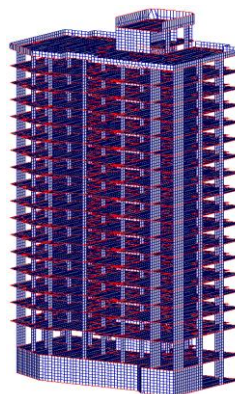


Рисунок 2 – Объёмная модель проектируемого здания

Таблица 1 – Характеристики исследуемых грунтов

| Номер элемента | Номенклатурный вид грунта                                  | Удельный вес, кН/м <sup>3</sup> |             |               | Угол внутреннего трения, град. |             |                | Удельное сцепление, кПа |       |          | Модуль деф. МПа   |
|----------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------|--------------------------------|-------------|----------------|-------------------------|-------|----------|-------------------|
|                |                                                            | $\gamma_n$                      | $\gamma_I$  | $\gamma_{II}$ | $\varphi_n$                    | $\varphi_I$ | $\varphi_{II}$ | $c_n$                   | $c_I$ | $c_{II}$ |                   |
| 1              | Насыпной грунт                                             | 12,0                            |             |               |                                |             |                |                         |       |          |                   |
| 2              | Супесь лёссовидная просадочная высокопористая твердая      | <u>16,9</u>                     | <u>16,7</u> | <u>16,8</u>   | Консолидированный при Wsat     |             |                |                         |       |          | <u>6,5</u><br>2,5 |
|                |                                                            | 19,0                            | 18,8        | 18,9          | 25                             | 25          | 5              | 7                       | 7     | 7        |                   |
| 3              | Суглинок лёссовидный просадочный низкопористый полутвёрдый | <u>17,9</u>                     | <u>17,8</u> | <u>17,8</u>   | Консолидированный при Wsat     |             |                |                         |       |          | <u>8,0</u><br>4,0 |
|                |                                                            | 19,6                            | 19,5        | 19,5          | 24                             | 23          | 23             | 12                      | 10    | 11       |                   |
| 4              | Суглинок лёссовидный непросадочный полутвёрдый             | <u>18,5</u>                     | <u>18,3</u> | <u>18,4</u>   | Консолидированный при Wsat     |             |                |                         |       |          | <u>8,5</u><br>5,5 |
|                |                                                            | 19,9                            | 19,7        | 19,8          | 24                             | 23          | 23             | 16                      | 15    | 15       |                   |

Примечание: \*) - 16,9 – удельный вес при природной влажности  
19,0 – удельный вес при полном водонасыщении

# ПРИКЛАДНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ БАРНАУЛА

По окончании ввода – линии контура преобразовываются в полигон и приобретают свойства и очертания проектируемой фундаментной плиты.

После получения модели фундаментной плиты, необходимо задать характер и величину нагружений. Причём нагружения по характеру могут быть:

- Точечными (чаще всего такие нагрузки задаются в случае, когда нагрузка на фундаментную плиту передаётся от колонны квадратного сечения)
- Линейными (нагрузки от несущих стен и пилонов)
- Полосовидными (задаются в случае передачи нагрузки от большого по площади поперечного сечения объекта прямоугольной формы)
- Эллиптическими (задаются в случае передачи нагрузки от большого по площади поперечного сечения объекта криволинейной формы)

После задания всех необходимых нагрузок на фундаментную плиту (рисунок 3) необходимо указать габариты и точки положения осей симметрии грунтоцементных свай. Кроме того, необходимо указать прочностные характеристики проектируемых свай.

Заметим, что данная математическая модель позволяет рассчитать и стандартный свайно-плитный фундамент, однако при этом в расчётной методике придется вводить прочностные характеристики свай вручную.

Прочностные характеристики свай можно получить экспериментальным путём или воспользовавшись справочными данными. В созданной математической модели сваи мо-

гут иметь как прямолинейную, так и криволинейную форму сечения, однако визуализироваться при этом они всё же будут как прямолинейные, что, впрочем, не повлияет на учёт формы сечения при проведении вычислений [4].

Полученная расчетная схема впоследствии разбивается на конечные элементы и воспринимается моделью как интегральные бесконечно малые площадки.

После составления расчётной схемы для проведения расчётов необходимо задать свойства грунта, на который передаётся нагрузка от фундамента и грунтоцементных свай. В расчётном случае задаются свойства грунта, полученные при проведении полевых работ и лабораторных испытаний проб грунта со строительной площадки, расположенной по адресу г. Барнаул ул. Космонавтов № 6в.

Кроме того, на этапе задания свойств грунта основания необходимо вычислить коэффициент постели для фундаментной плиты, расчёт которого автоматизирован.

По завершении задания исходных данных появляется возможность выполнить расчёт осадки основания, а так же получить диаграммы изополей напряжений. Основным результатом, имеющим наибольшую практическую значимость, является построение диаграммы перемещений границ конечных элементов по оси Z. Что соответствует осадке фундамента. Для демонстрации возможностей математической модели было принято решение рассчитать три различных схемы закрепления грунта струйной цементацией.

| Слои грунта (считать от низа плиты) |       |         |         |          |            |
|-------------------------------------|-------|---------|---------|----------|------------|
| G (кН/м²)                           | Ф (°) | C (кПа) | E (кПа) | Качество | Количество |
| 17.2                                | 25    | 7       | 6300    | Супеси   | IL = 0.0   |
| 17.91                               | 24    | 12      | 6000    | Суглинки | IL = 0.0   |
| 18.49                               | 24    | 16      | 8300    | Суглинки | IL = 0.0   |

| Толщины слоёв (м) |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|
| 1                 | 2 | 3 | 4 |
| 0                 | 0 | 0 | 0 |
| 0                 | 0 | 0 | 0 |

Добавить слой    Изменить слой    Удалить слой

Расстояние от низа плиты до грунтовых вод (+ вода ниже плиты)  м

Коэффициент постели  (кН/м²)

☐ Нет грунта

Справка    ОК

Рисунок 3 – Диалоговое окно задания свойств грунта основания

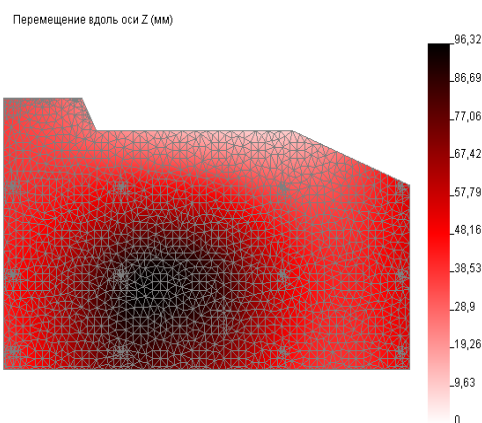


Рисунок 4 – Диаграмма перемещения границ конечных элементов по оси X (схема 1)

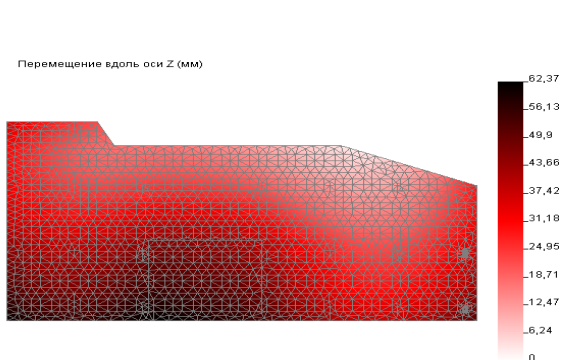


Рисунок 5 – Диаграмма перемещения границ конечных элементов по оси Y (схема 2)

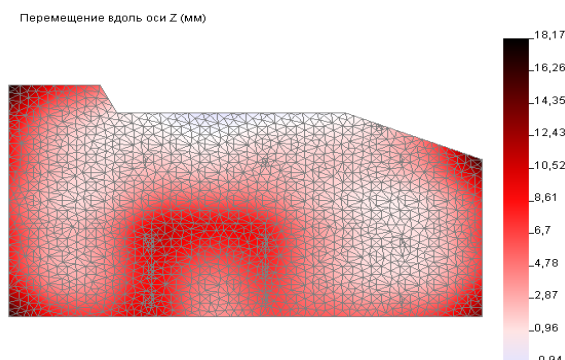


Рисунок 6 – Диаграмма перемещения границ конечных элементов по оси Z (схема 3)

## ВЫВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее важным показателем результатов моделирования процесса закрепления лёссовых просадочных грунтов методом струйной цементации по закреплению плитного фундамента многоэтажного жилого здания является диаграмма осадки плитного фундамента, которая показывает равномерность и степень осадки фундамента после произведения закрепления основания.

Шкала градации представляет собой значения осадки фундамента в миллиметрах.

Кроме того метод конечных элементов и данная математическая модель позволяет получить диаграммы и поля моментов, сил кручения и поперечных осей относительно осей X, Y и Z (рисунки 4-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин, А. Г. Струйная цементация грунтов: монография / А. Г. Малинин. – Пермь: Пресс-айм, 2007. – 168 с.

2. Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве: Стандарт организации // СТО 028 НООСТРОЙ. – Изд.; Махачкала, 2012. – 68 с.

3. Лютов В. Н. Исследование и анализ возможности использования современных струйных геотехнологий для укрепления лёссовых грунтов в условиях Западной Сибири / В. Н. Лютов, Г. И. Швецов, С. К. Куликов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 95-99.

4. Лютов, В.Н. Исследование и анализ методов моделирования закрепления лёссовых и лесовидных грунтов Алтайского края инъекционной струйной технологией / В. Н. Лютов, Т. Е. Лютова // Сб. матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Интерстроймех – 2015». – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. – С. 241-244.

**Лютов В.Н.** – к.т.н., доцент кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: vnlutov@mail.ru.

**Казичин В.А.** – студент ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: vasilysocipat@gmail.com.