

Численное решение задачи бурения скважины шнеком

Болдырев Г.Г.

Профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по науке и инновациям ООО «НПП Геотек», г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

Идрисов И.Х.

Кандидат технических наук, генеральный директор ООО «НПП Геотек», г. Пенза, idrisov@geotek.ru

Мягков К.А.

Специалист отдела расчетов ООО «ТехПромАрма», г. Москва, myagkov_k@list.ru

Новичков Г.А.

Аспирант Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза, gn@s-teh.biz

Ключевые слова: бурение скважины шнеком; численное решение, ANSYS; LS-DYNA; модель материала Cap; крутящий момент; сила тяжести; скорость вращения; мощность; лобовое сопротивление

Аннотация: приводится численное решение задачи процесса бурения скважины сплошным шнеком. Решение получено с использованием программ Ansys и Ls-Dyna. Шнек рассчитывался в переменных Лагранжа, грунт и приземный слой воздуха – в переменных Эйлера. Модель грунта Cap. Численное моделирование многослойного массива грунта показало, что с увеличением модуля упругости возрастает лобовое сопротивление грунта, крутящий момент и механическая мощность.

Boldyrev G.G.

Professor of the Penza State University of Architecture and Construction, director for research and innovation of the «NPP Geotek» LLC, Penza, g-boldyrev@geotek.ru

Idrisov I.H.

PHD, Cheep director for research and innovation of the «NPP Geotek» LLC, Penza, idrisov@geotek.ru

Miagkov K.A.

Specialist of calculations department of the «TechPromArma» LLS, Moscow, myagkov_k@list.ru

Novichkov G.A.

Postgraduate student of the Penza State University of Architecture and Construction, Penza, gn@s-teh.biz

Key words: drilling borehole by the auger; numerical modelling, ANSYS; LS-DYNA; Cap model; torque moment, axial load, power, rotation speed, tip resistance.

Abstract: В статье рассмотрено численное решение задачи процесса бурения скважины сплошным шнеком с трехперьевым долотом в грунтах с различным модулем упругости. Решение выполнено в программном комплексе ANSYS и LS-DYNA. В качестве модели грунта принята CAP модель материала. Шнек рассчитывался в переменных Лагранжа, грунт и приземный слой воздуха – в переменных Эйлера. Решение получено при постоянной угловой скорости вращения шнека в 31 рад/с, с учетом силы тяжести.

Численное моделирование многослойного массива грунта показало зависимость лобового сопротивления, крутящего момента и механической мощности от модуля упругости грунта. Зона активной деформации грунта вокруг скважины не превышает 1-1,5 диаметра долота. Интенсивность деформаций сдвига возрастает с ростом модуля упругости грунта. Выявленная зависимость величины крутящего момента и линейной скорости от модуля упругости грунта может быть использована при интерпретации данных измерений при буровом зондировании с целью определения деформационных характеристик грунтов.

В настоящее время широкое применение в практике полевых испытаний грунтов находит метод статического зондирования, который используется не только для расчленения грунтовой толщи на инженерно-геологических элементы, но и для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов [3,4,5,6]. На рис. 1а показаны основные параметры, измеряемые при погружении зонда в грунт.

Более перспективным методом исследования свойств грунтов является, по нашему мнению, метод бурового зондирования [1,2,3]. Во-первых, данный метод применим в отличие от метода статического зондирования не только в глинистых и песчаных грунтах, но и в крупнообломочных, скальных и мерзлых грунтах. Во-вторых, рассматриваемый метод позволяет прямым методом, без использования корреляционных зависимостей, определять модуль деформации грунта и силы сопротивления сдвигу. В тоже время, используя корреляционные зависимости можно находить и другие характеристики грунтов. На рис. 1б показаны основные параметры, измеряемые в процессе бурового зондирования. Как видно из рис. 1б, в отличие от метода статического зондирования при бурении скважины измеряется усилие вдавливания Q (Н), крутящий момент $M_{вр}$ (Нм), вес буровой колонны G_1 (Н) и вес грунта на ребордах G_2 (Н), угол наклона оси буровой колонны β (град.), вертикальное перемещение V (м) и угловая скорость вращения ω (рад/с).

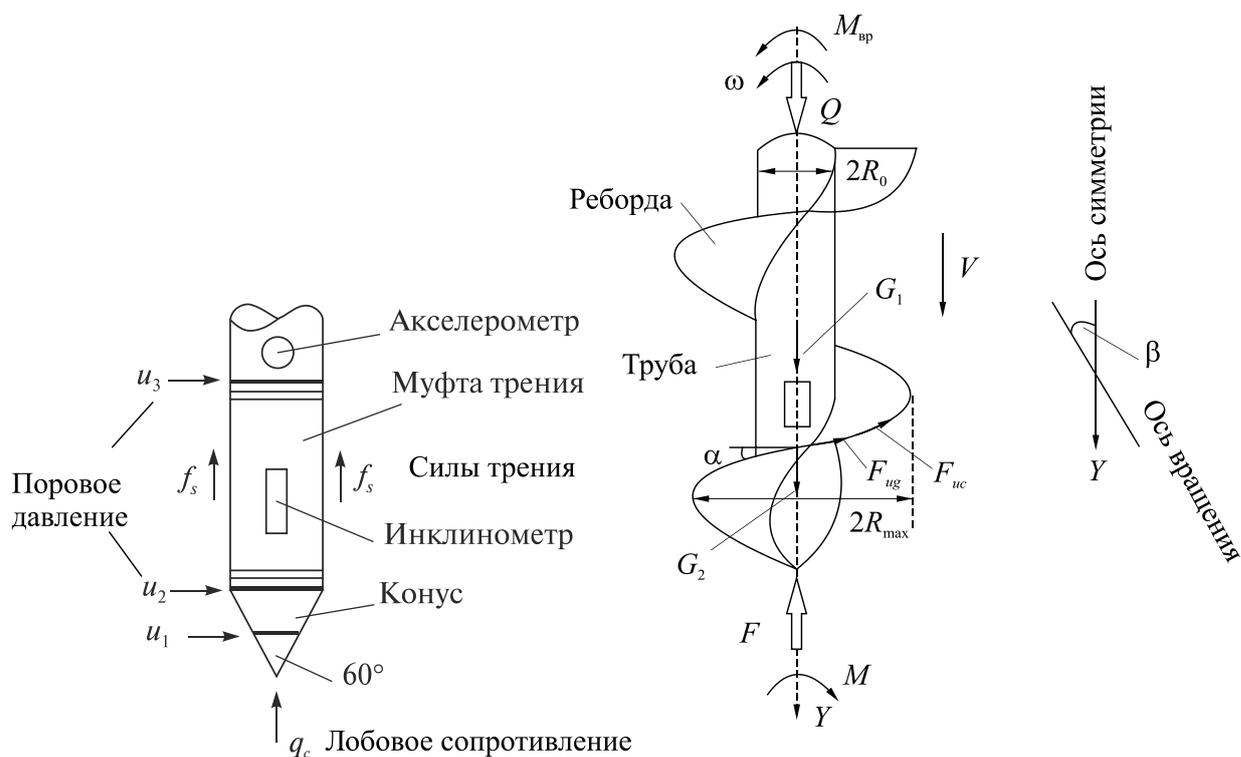


Рис. 1. Параметры, измеряемые при зондировании грунтов: а – статическое зондирование; б – буровое зондирование

В работе [1] приведено аналитическое решение задачи определения силы сопротивления погружению F (кН) в забое скважины, которое увеличивается с ростом глубины бурения. Было показано, что при полном заполнении реборд шнека грунтом измерение параметров бурения в верхней части буровой колонны дает достоверные сведения о работе, затрачиваемой на разбуривание грунта в забое скважины. Доля работы, затраченной на разбуривание грунта в единицу времени, совершаемая вертикальной нагрузкой, значительно меньше, чем вращательным моментом.

С целью исследования изменения напряженно-деформированного состояния в процессе бурения скважины шнеком данная задача была решена численно с использованием программного комплекса Ansys, Ls-Dyna.

LS-DYNA – многоцелевой конечно-элементный комплекс, предназначенный для анализа высоконелинейных и быстротекущих процессов в задачах механики твердого и жидкого тела, комплекс предлагает большую базу материалов, уравнений состояний, контактное связывание Лагранжевой и Эйлеровой областей, и другие вспомогательные карты для моделирования столь сложного процесса, как бурение. Основная сложность задачи, заключалась именно в постановке, нахождении нужных карт и нужных настроек/величин для этих карт, а также в описании поведения контакта Лагранжевой и Эйлеровой областей. В модуле LS-DYNA Export программного комплекса ANSYS была подготовлена геометрия расчетной

области, создана конечно-элементная сетка, заданы начальные условия и произведено сохранение k-файла. Далее шла работа по редактированию k-файла, добавлены необходимые модели материала, присвоены основные формулировки, подобраны настройки карты взаимодействия областей.

Цель исследований. Основная цель численного моделирования – определение реактивного сопротивления (удельного давления) грунта в забое скважины и необходимого крутящего момента в верхней части буровой колонны для 5-ти различных по модулю упругости грунтов при бурении скважины сплошным шнеком. Рассмотрены варианты массива грунта с модулем упругости 5 МПа, 10, МПа, 15 МПа, 20 МПа и 30 МПа. Показаны графики изменения реактивного сопротивления (удельного давления) грунта с увеличением глубины погружения, графики стабилизации значения скорости погружения, таблицы конечных результатов.

Постановка задачи. Упрощена геометрия долота диаметром 135 мм (см. рис. 2а) для построения более качественной сетки, наплавки убраны, на их месте сплошной материал. При моделировании использовалась часть модели шнека, длина шнека от кончика долота до противоположного конца шнека 1130 мм. Число витков винтовой поверхности – 10.

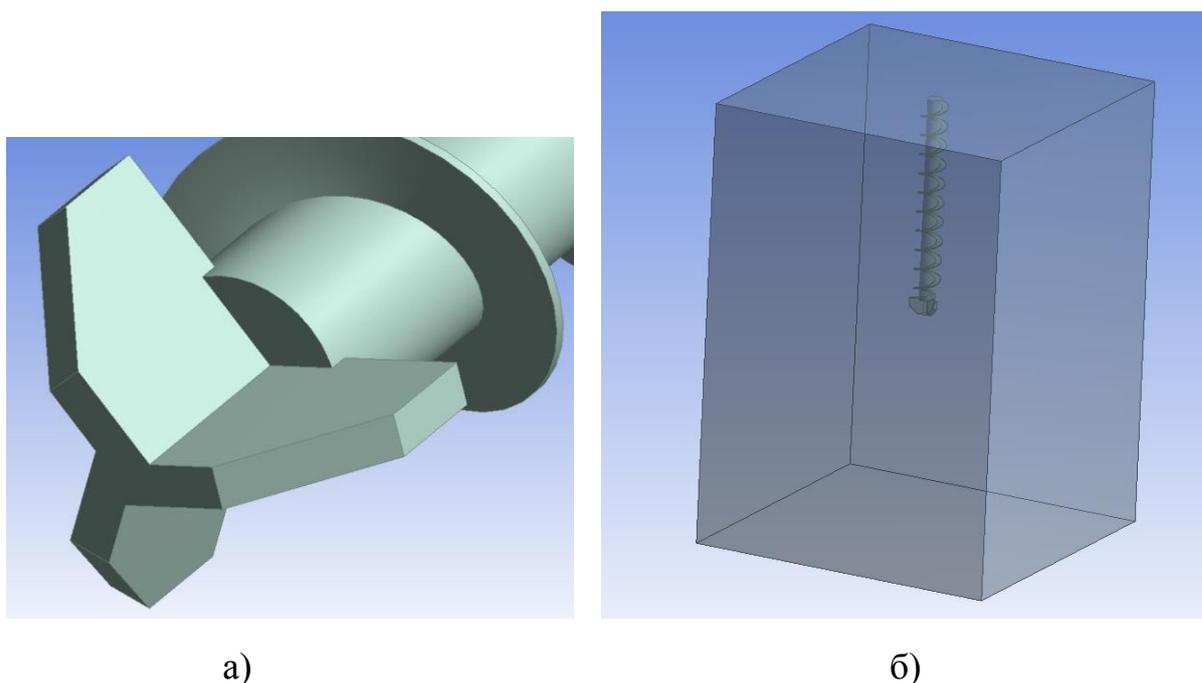


Рис. 2. Геометрия трехперьевого долота (а) и массива грунта (б)

Габариты расчетной области грунта по пространству – параллелепипед со стороной 1600 мм и высотой 2300 мм, что полностью исключает влияние свободной поверхности рассматриваемой расчетной области.

Ранее в работах [1,4] было показано незначительное влияние осевой нагрузки на процесс бурения скважины шнеком, шнек погружается в грунт за счет сил трения между грунтом на ребрах и стенками скважины. Учитывая

это, в рассматриваемом решении принято, что на начало расчета, шнек полностью погружен в массив грунта; тем самым момент фактического погружения шнека опущен и выполнялось моделирование только процесса вкручивания шнека в грунт с определением сил, препятствующих погружению (лобового сопротивления). На рисунке 2б показан общий вид расчетной области.

Ввиду вышесказанного, в расчете не участвовали дополнительные вдавливающие усилия, начальные условия приведены ниже:

- постоянная угловая скорость вращения 31 рад/с, соответствующая частоте вращения 5 об/с;
- сила тяжести, направленная в сторону погружения;
- коэффициент трения грунта по стали, равен 0,25.

Расчет велся до времени 1000 мс.

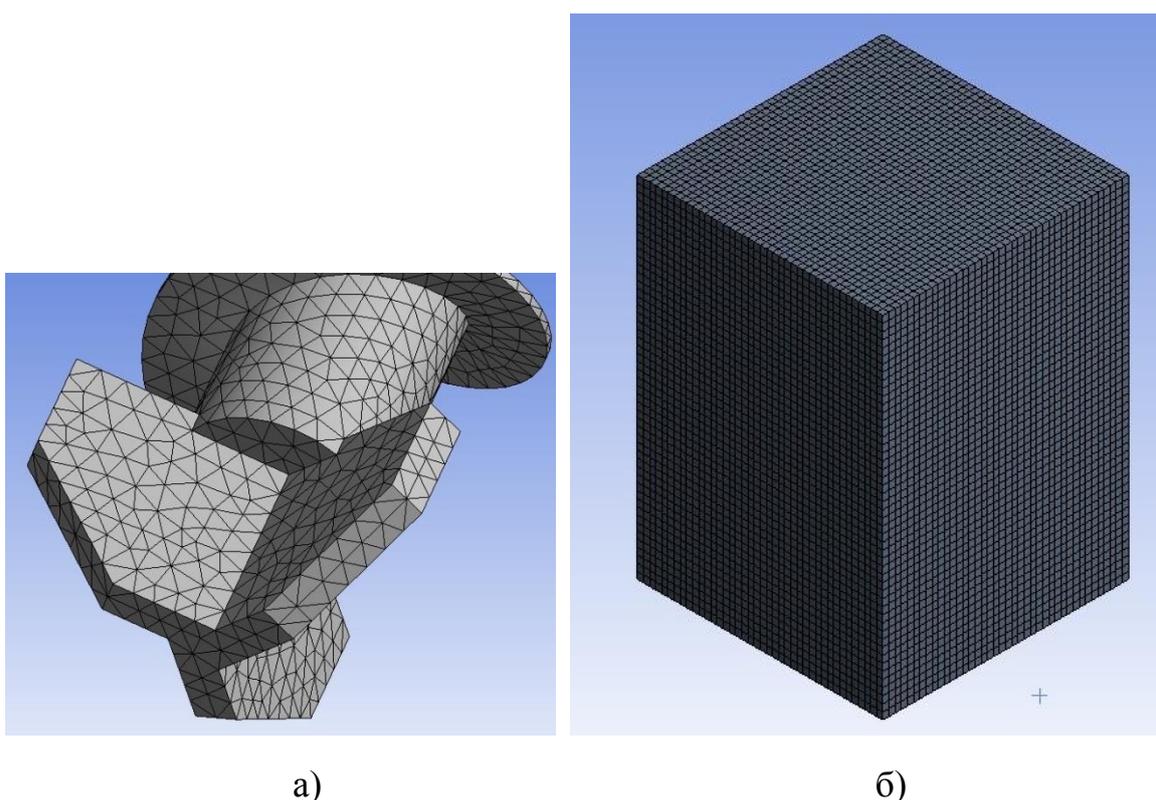


Рис. 3. Конечно-элементная сетка: а - долота и шнека; б - массива грунта

Размеры элементов во всех сетка примерно одинаковые. Сетки области грунта и воздуха построены гексаэдрическими элементами. Сетка шнека построена из тетро-элементов, из-за сложности геометрии. Геометрические

размеры массива грунта: 1600x1600x2300 мм, наибольший размер- глубина. Количество элементов расчетной модели составляет 177922 элемента.

Вследствие сложности решения данной задачи было принято нецелесообразным моделирование единого многослойного массива грунта, поскольку, во-первых это в разы увеличит время решения, при этом возможна аварийная остановка решателя, за счет перераспределения Эйлеровой области в Лагранжевую. Вместо этого, расчет велся для однослойного массива грунта отдельно, каждый слой отличался от предыдущего увеличенным модулем упругости. Расчет был разбит на 5 его составляющих, каждая из которых соответствовала определенному модулю упругости (5, 10, 15, 20 и 30 МПа). Параметры модели грунта приняты прежними за исключением модуля упругости. Далее сопоставляя полученные решения, можно сделать вывод изменяется ли работа затрачиваемая при бурении и другие данные.

Шнек рассчитывался в переменных Лагранжа, грунт и приземный слой воздуха – в переменных Эйлера (формулировка 5). Поверхность контакта между грунтом и шнеком задавалась с помощью карты `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID`. Расчет производился при помощи трехмерного высоконелинейного решателя `LS-DYNA`. Для описания поведения шнека использовалась карта `*MAT_RIGID`, в карте были приняты следующие величины: модуль упругости 2×10^8 кПа, коэффициент Пуассона 0,3. Для грунта использовалась модель `GEOLOGIC_CAP_MODEL` с параметрами, которые приведены в табл. 1.

Подготовка к расчету производилась в модуле `ExplicitDynamics (LS-DYNA Export)` программного комплекса `Ansys`. Помимо шнека и грунта, в модели была создана область воздуха, примыкающая к грунту со стороны шнека. С использованием топологии, была построена сетка. Заданы основные граничные условия (закрепление и угловая скорость). После завершения процедуры подготовки был записан `k`-файл. Последующая корректировка происходила уже в нем.

Работа в `k`-файле. Для моделей воздуха и грунта была выбрана 5-я формулировка, для модели шнека 1-я в карте `*SECTION`. Было создано 3 карты `*MAT`, соответствующие каждой модели. Для модели шнека использовалась карта `*MAT_RIGID`, для воздуха `*MAT_NULL`, для грунта карта материала №25 (`*MAT_GEOLOGIC_CAP_MODEL`). Для воздуха была создана карта уравнения состояния `*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL`. Для шнека и грунта, модель состояния не учитывалась.

Модель грунта и ее параметры

Модель предназначена для описания невязкого поведения геологического материала, которую можно использовать для решения задач

геомеханики или таких материалов, как бетон. Это материал типа 25 программы LS-DYNA, который задается ключевыми словами

*MAT_GEOLOGIC_CAP_MODEL.

Параметры модели представлены в табл. 1, 2. В табл. 2 приведены значения модулей объемного сжатия и сдвига в зависимости от модуля упругости. В расчетах с различными модулями упругости грунта, дополнительные параметры из табл. 1 приняты теми же.

Рассматриваемая двухинвариантная модель материала, основана на работах [6, 7, 8]. В модернизированной модели учтено нелинейное кинематическое упрочнение материала при его всестороннем обжатии, что предложено в работе Isenberg, Vaughn и Sandler (1978). Ниже приведено краткое описание данной модели и её параметры.

Уравнения модели записываются через инварианты тензора напряжений. Квадратный корень из второго инварианта девиатора тензора напряжений $\sqrt{J_{2D}}$ определяется по компонентам девиатора тензора напряжений s

$$\sqrt{J_{2D}} = \sqrt{\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}}, \quad (1)$$

и является скалярной мерой дисторсионного или сдвигового напряжения. Первый инвариант J_1 это след тензора напряжений.

Модель состоит из трёх поверхностей в пространстве $\sqrt{J_{2D}} - J_1$, как показано на рис. 4.

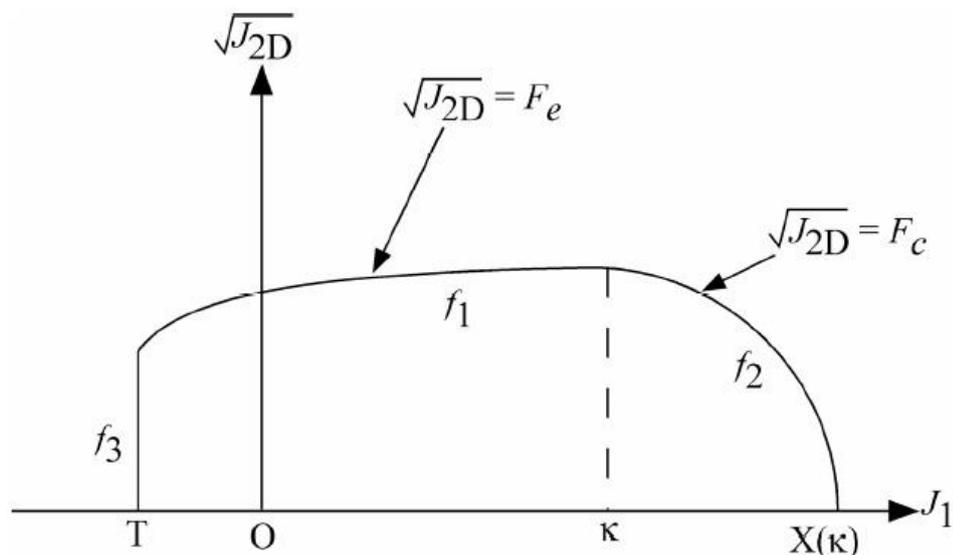


Рис. 4. Поверхность текучести двухинвариантной модели в пространстве инвариантов $\sqrt{J_{2D}} - J_1$ f_1 – предельная огибающая; f_2 – огибающая объемного сжатия; f_3 – ограничение по растяжению

Таблица 1 – Параметры Сар модели

| Обозначение | Наименование | Величина |
|-------------|--|----------|
| BULK | Начальный модуль объёмного сжатия, кПа | 5555,6 |
| G | Начальный модуль сдвига, кПа | 1851,9 |
| ALPHA | Параметр кривой разрушения, α | 13 |
| THETA | Линейный коэффициент кривой разрушения, θ | 0,344 |
| GAMMA | Экспоненциальный коэффициент кривой разрушения, γ | 0 |
| BETA | Экспонента кривой разрушения, β | 0 |
| R | Отношение масштабов по осям кривой разрушения | 2,3 |
| D | Экспонента кривой упрочнения | 0,00178 |
| W | Коэффициент закона упрочнения | 0,49 |
| X0 | Экспонента закона упрочнения | 46,5 |
| C | Коэффициент кинематического упрочнения | 0 |
| N | Параметр кинематического упрочнения | 0 |
| PLOT | Для выдачи на график с помощью пакета TAURUS запоминается соответствующее значение переменной (на графике она будет помечена как «эффективная пластическая деформация»): = 1: параметр упрочнения κ ; = 2: точка $X(\kappa)$ пересечения кривой с осью J_1 ; = 3: объёмная пластическая деформация ε_v^p ; = 4: первый инвариант J_1 ; = 5: второй инвариант $\sqrt{J_{2D}}$; = 6: не используется; = 7: не используется; = 8: номер формы отклика; = 9: число итераций | 1 |
| FTYPE | Тип материала: = 1: грунт или бетон (предельная поверхность может сжиматься); = 2: горная порода (предельная поверхность не сжимается); | 1 |
| VEC | Признак векторизации: = 0: векторное решение (фиксированное число итераций); = 1: полностью итерационное. | 0 |
| TOFF | Предельная величина растяжения $TOFF < 0$ (значение положительно при сжатии), кПа | 0 |

Таблица 2. Объемный модуль и модуль сдвига

| № | Модуль упругости (МПа) | BULK (кПа) | G (кПа) | Коэффициент Пуассона |
|---|------------------------|------------|---------|----------------------|
| 1 | 5 | 5555,6 | 1851,9 | 0,35 |
| 2 | 10 | 11111,1 | 3703,7 | 0,35 |
| 3 | 15 | 16666,7 | 5555,6 | 0,35 |
| 4 | 20 | 22222,2 | 7407,41 | 0,35 |
| 5 | 30 | 33333,3 | 11111,1 | 0,35 |

Во-первых, имеется огибающая поверхность разрушающих значений, которая на рисунке обозначена f_1 и записывается в виде

$$f_1 = \sqrt{J_{2D}} - \min(F_e(J_1), T_{mises}), \quad (2)$$

где $F_e(J_1) = \alpha - \gamma \exp(-\beta J_1) - \theta J_1$; $T_{mises} = |X(\kappa) - L(\kappa)|$.

Эта поверхность фиксирована в пространстве $\sqrt{J_{2D}} - J_1$ и, следовательно, не описывает упрочнения, если отсутствует кинематическое упрочнение. Следующая поверхность f_2 определяется соотношением

$$f_2 = \sqrt{J_{2D}} - F_c(J_1, \kappa), \quad (3)$$

где $F_c(J_1, \kappa) = \frac{1}{R} \sqrt{[X(\kappa) - L(\kappa)]^2 - [J_1 - L(\kappa)]^2}$; точка $X(\kappa)$ – это пересечение поверхности f_2 с осью J_1

$$X(\kappa) = \kappa + RF_e(\kappa), \quad (4)$$

а $L(\kappa)$ задается следующим образом:

$$L(\kappa) = \begin{cases} \kappa, & \text{если } \kappa > 0 \\ 0, & \text{если } \kappa \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Параметр упрочнения κ связан с изменением объемной деформации ε_v^p через закон упрочнения:

$$\varepsilon_v^p = W \{1 - \exp[-D(X(\kappa) - X_0)]\}. \quad (6)$$

Геометрически параметр κ интерпретируется как координата J_1 пересечения купольной части поверхности с поверхностью разрушающих значений. И, наконец, имеется поверхность, соответствующая предельным значениям по растяжению, которая на рисунке обозначена f_3 и записывается в виде:

$$f_3 = T - J_1, \quad (7)$$

где T – входной параметр материала, который определяет максимальное гидростатическое растяжение, выдерживаемое материалом. Таким образом, упругая область в пространстве $\sqrt{J_{2D}} - J_1$ ограничена сверху огибающей разрушающих значений, слева – поверхностью, соответствующей предельному значению по растяжению, и справа – купольной частью поверхности.

Аддитивное разложение деформации на упругую и пластическую имеет вид:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p, \quad (8)$$

где ε^e – упругая деформация и ε^p – пластическая деформация. Напряжение определяется по упругой деформации с помощью закона Гука

$$\sigma = C(\varepsilon - \varepsilon^p), \quad (9)$$

где σ – напряжение и C – тензор упругого состояния.

Условие текучести может быть записано следующим образом

$$f_1(s) \leq 0, \quad (10)$$

$$f_2(s, \kappa) \leq 0,$$

$$f_3(s) \leq 0,$$

а по условию градиентности требуется, чтобы

$$\dot{\lambda}_k f_k = 0, \quad k = 1, 2, 3, \quad (11)$$

$$\dot{\lambda}_k \geq 0,$$

где $\dot{\lambda}_k$ – произвольный неотрицательный множитель для поверхности k . Если $f_k < 0$, то $\dot{\lambda}_k = 0$ и процесс является упругим. Если $f_k > 0$, то поверхность k является активной, и $\dot{\lambda}_k$ находится из условия $f_k = 0$.

Предполагается соответствующее пластическое течение, и поэтому в соответствии с правилом течения Койтера скорость пластической деформации записывается в виде суммы вкладов от всех активных поверхностей:

$$\dot{\varepsilon}^p = \sum_{k=1}^3 \dot{\lambda}_k \frac{\partial f_k}{\partial s}, \quad (12)$$

Одним из основных преимуществ данной модели по сравнению с классическими моделями зависимости пластических свойств от давления является возможность контролировать величину дилатансии при сдвиговом нагружении. Дилатансия при сдвиговом нагружении является результатом того, что поверхность текучести имеет положительный наклон в пространстве $\sqrt{J_{2D}} - J_1$, и поэтому предположение о пластическом течении в направлении нормали к поверхности текучести дает вектор скорости пластической деформации, у которого есть компонент в направлении объемной (гидростатической) деформации. В моделях типа Друкера–Прагера и Мора–Кулона эта дилатансия имеет место в течение всего времени приложения сдвигающих нагрузок, и во многих случаях это приводит к гораздо большей величине дилатансии, чем наблюдается в экспериментах. В данной модели, если активизирована поверхность текучести, дилатансия

учитывается так же, как в моделях Друкера–Прагера и Мора–Кулона. Однако, в соответствии с законом упрочнения, купольная часть поверхности может сжиматься до тех пор, пока не произойдет пересечения купола с огибающей разрушающих значений. Локальная нормаль к поверхности текучести теперь вертикальна, и, следовательно, условие нормировки гарантирует, что не происходит дальнейшего увеличения объемной пластической деформации (дилатансии). С помощью корректировки параметров, которые определяют скорость сжатия купольной части поверхности, можно внести экспериментальные данные по дилатансии в модель и получить определяющее соотношение, которое лучше описывает моделируемые физические процессы.

Другим преимуществом данной модели по сравнению с моделями Друкера-Прагера и Мора-Кулона является возможность моделирования пластического уплотнения материала. В указанных моделях все чисто объемные изменения являются упругими. В рассматриваемой модели объемные изменения являются упругими до тех пор, пока точка напряжения не попадает на купольную часть поверхности. Таким образом, величина объемной пластической деформации (уплотнения) определяется законом упрочнения. Итак, кроме учета величины дилатансии введение купольной части поверхности добавляет в модель еще одну экспериментальную характеристику геологического материала.

Учет кинематического упрочнения приводит к гистерезисной диссипации энергии при циклических нагрузках. Если заданы ненулевые значения параметров F_e и N , то в соответствии с подходом, изложенным в работе Айзенберга и соавторов (1978), для огибающей разрушающих значений используется нелинейный закон кинематического упрочнения. В этом случае огибающая заменяется семейством поверхностей текучести, ограниченным начальной поверхностью текучести и предельной поверхностью разрушения. Таким образом, форма описанных выше поверхностей текучести остается неизменной, но они могут перемещаться в плоскости, ортогональной оси J_1 .

Перемещение поверхностей текучести становится возможным при введении тензора «обратных напряжений» α . Формулировка с кинематическим упрочнением получается при замене тензора σ на тензор $\eta = (\sigma - \alpha)$ во всех приведенных выше уравнениях. Предполагается, что тензор истории напряжений α – это девиатор, и поэтому у него только 5 разных компонентов. Изменение тензора обратных напряжений определяется нелинейным законом упрочнения

$$\alpha = cF(\sigma, \alpha)\epsilon^p, \quad (13)$$

где c – константа, F – скалярная функция переменных σ и α , ϵ^p – скорость девиаторной пластической деформации. Константу можно определить по наклону кривой, описывающей зависимость между напряжением сдвига и пластической деформацией сдвига при низких уровнях напряжения сдвига.

Функция F определяется соотношением

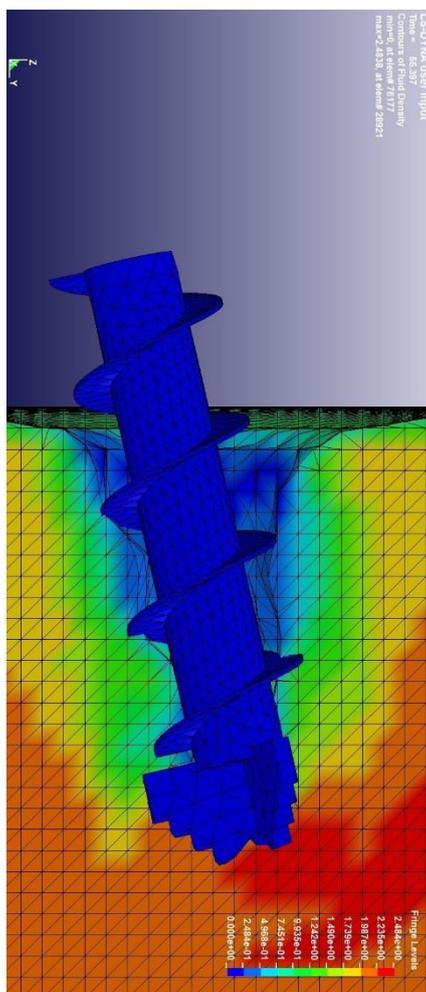
$$F = \max\left(0, 1 - \frac{(\sigma - \alpha) \cdot \alpha}{2NF_e(J_1)}\right), \quad (14)$$

где N – некоторая константа, определяющая размер поверхности текучести. Значение константы N можно интерпретировать как радиальное расстояние от внешней стороны начальной поверхности текучести до внутренней стороны предельной поверхности. Чтобы предельная поверхность в модели с кинематическим упрочнением совпадала с огибающей разрешающих значений в стандартной модели, в определении функции F_e нужно заменить скалярный параметр α параметром $\alpha - N$.

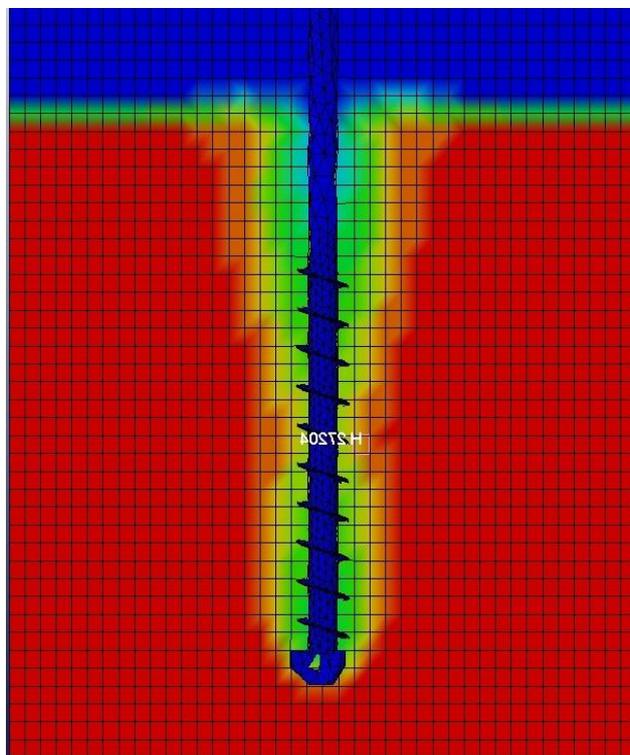
Модель содержит ряд параметров, которые зависят от конкретного материала и обычно определяются на основе экспериментальных данных. Параметры α, γ, β и θ обычно оцениваются с помощью выравнивания кривой в соответствии с данными по разрушения, полученными в серии испытаний на всестороннее сжатие. Параметры W, D и X_0 определяют закон упрочнения геологического материала. Значение W определяет долю пустот в несжатом образце, а параметр D даёт наклон начальной кривой нагружения при гидростатическом сжатии. Значение R – это отношение большой оси к малой в четверти эллипса, определяющего купольную часть поверхности. Более подробную информацию об определении параметров модели геологического материала с помощью экспериментальных данных можно найти в работе Chen and Baladi (1985).

Результаты расчетов

На рис. 5 приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния в массиве грунта вокруг скважины при погружении шнека с поверхности грунта. Первоначально (рис. 5а), наблюдалось отклонение оси шнека от вертикали, так как не были введены граничные условия положения оси. После введения граничных условий было обеспечено вертикальное погружение шнека. На рис. 5а показано распределение плотности в массиве грунта, на рисунке 5б – распределение материала в массиве грунта в процессе бурения скважины шнеком. Зона деформирования грунта вокруг шнека не превышает 1,0 – 1,5 диаметра долота. На поверхности массива у устья скважины наблюдается выпор грунта в виде валика, что свидетельствует о движении грунта по ребордам к поверхности.



а)



б)

Рис. 5. Характер изменения плотности грунта при бурении и распределение материала в массиве грунта, соответственно: а – неконтролируемый поворот оси шнека; б – бурение с фиксацией положения вертикальной оси

При анализе влияния глубины на результаты решения рассмотрены 4 элемента, следующих друг за другом в глубину, расстояние между рядом стоящими элементами 92 мм. Для каждого элемента, в зависимости от времени было рассмотрено 4 положения шнека относительно того или иного элемента. Начало влияния поля давления под долотом на элемент, давление в элементе при приближении долото вплотную к нему, прохождение через элемент (формирование забоя), давление в забое скважины.

За счет заданной скорости вращения, шнек вкручивается в грунт, тем самым погружаясь. На рис. 6 показаны графики максимального погружения шнека на момент окончания расчета относительно своего начального положения для грунтов с различной «жесткостью» (модулем упругости). Все представленные ниже результаты расчетов выполнены при постоянной скорости вращения шнека, равная 5 об/с.

Как видно из данных зависимостей глубина погружения уменьшается с ростом «жесткости» грунта, от 319 до 278 мм, что свидетельствует о адекватности расчетов наблюдаемым процессам при реальном бурении.

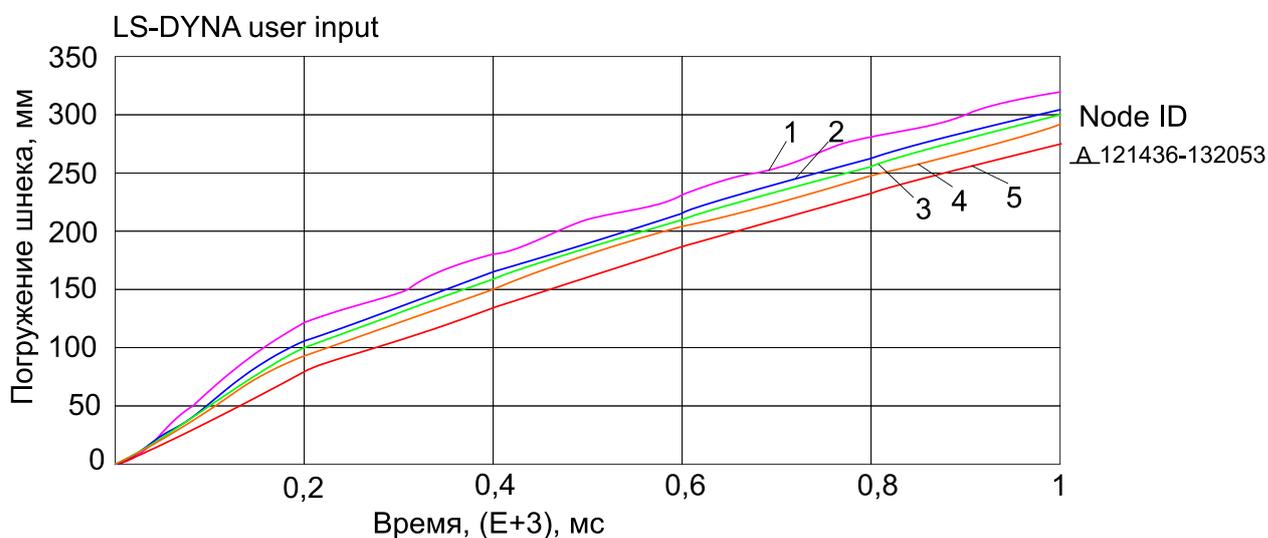


Рис. 6. Максимальное погружение шнека на момент окончания расчета относительно своего начального положения, в грунте с модулем упругости: 1,2,3,4,5 – 5,10,15,20 и 30 МПа, соответственно

Изменение давления под долотом было определено в элементах, находящихся на пути погружения шнека. Графики изменения давления (кПа) в элементе при прохождении через него шнека представлены для каждого варианта модуля упругости на рис. 7. Здесь показаны графики только последнего элемента, через который прошел шнек, остальные промежуточные значения увеличения давления (лобового сопротивления) с глубиной показаны на рис. 8.

Из рис. 7 видно, что давление возрастает с ростом модуля упругости грунта, при этом оно нелинейно зависит от глубины погружения (см. рис. 8).

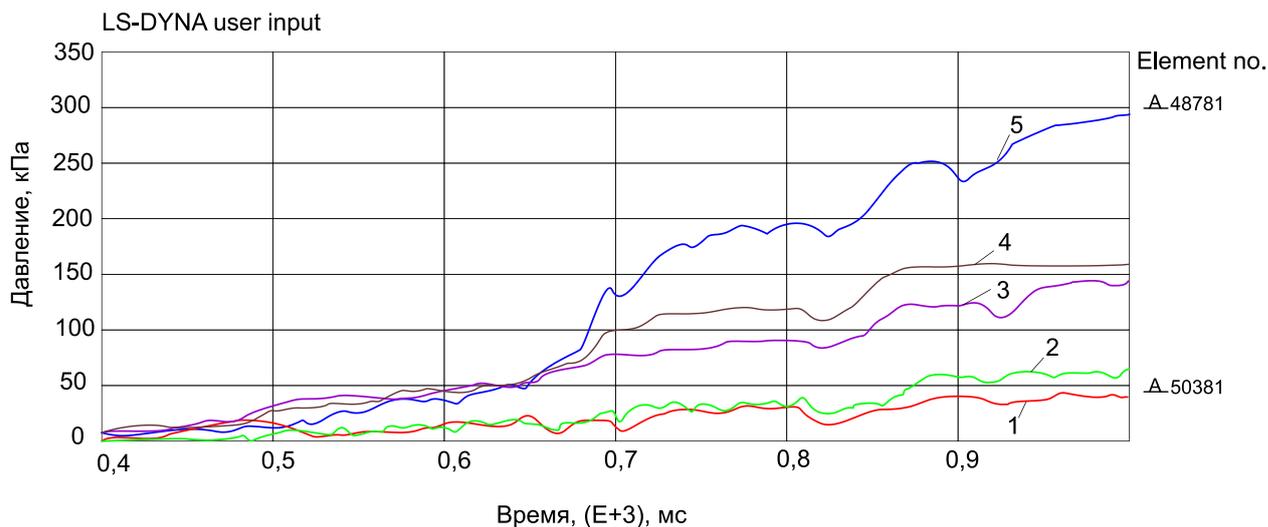


Рис. 7. Изменение давления при прохождении шнека через элемент в грунте с модулем упругости: 1,2,3,4,5 - 5,10,15,20 и 30 МПа, соответственно

Расчет велся для всех модулей упругости до одного и того же времени - 1000 мс, время выбрано как оптимальное для решения данной задачи в разумные пределы и исходя из ресурсов компьютера, в среднем счет одного варианта длился порядком 6-8 часов; одинаковость временного промежутка, также обусловлено дальнейшим сравнением скорости погружения, глубины и остальных параметров.

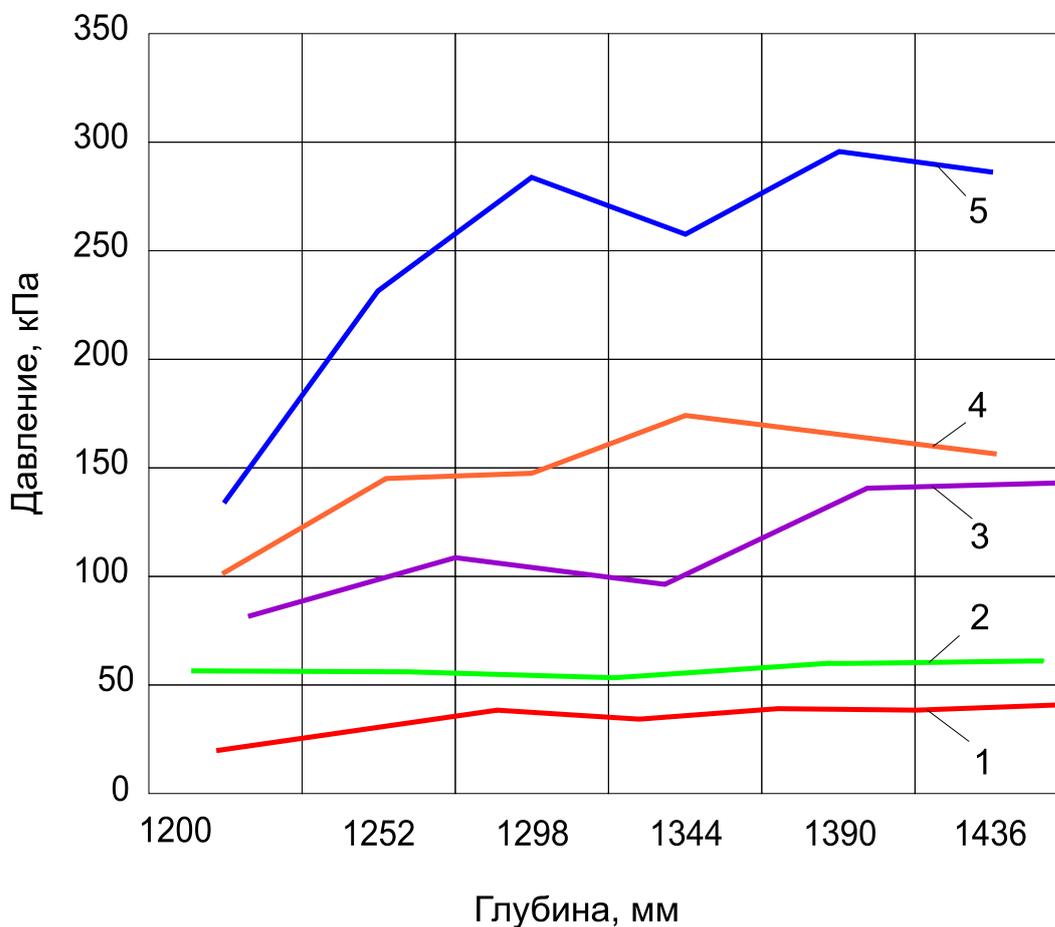


Рис. 8. Графики зависимости давления от глубины для грунтов с различным модулем упругости: 1,2,3,4,5 - 5,10,15,20 и 30 Мпа, соответственно

Ниже, для более полного описания поведения шнека при вращении, приведены графики изменения осевой скорости погружения (рис. 9).

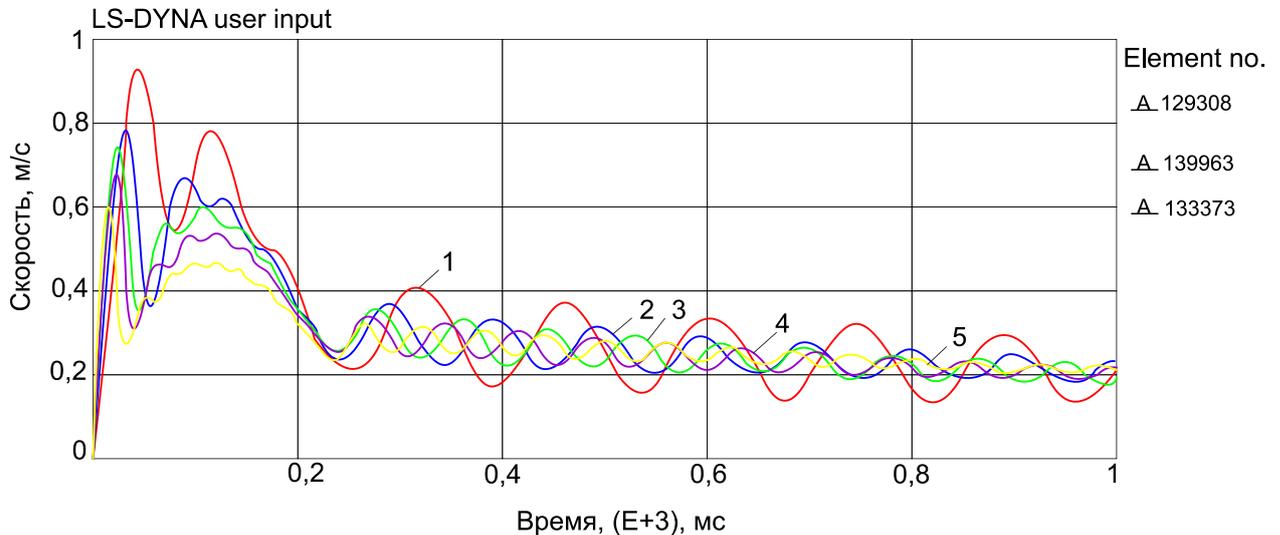


Рис. 9. Скорость погружения (м/с) для грунтов с различным модулем упругости: 1,2,3,4,5 - 5,10,15,20 и 30 Мпа, соответственно

На графиках видна тенденция по уменьшению амплитуды колебаний скорости. На основании предположения, что вследствие постепенной стабилизации значения скорости погружения дальнейшие значения лобового сопротивления будут неизменны, для определения необходимого крутящего момента использованы значения давления в последнем элементе, который за время расчета прошел шнек.

Величину момента в забое скважины M , можно найти из следующего условия равновесия моментов[1]:

$$\sum M = M_{вр} - M_{тр} - M = 0, \quad (15)$$

$$M_{тр} = tg \varphi_{ш} m_{гр} (g \cos \alpha + tg \varphi_{гр} R_{max} \omega^2 \sin \alpha) K_1 K_2 \cos \alpha R_{max} \quad (16)$$

Тогда момент $M_{зб}$ в забое скважины можно найти из выражения:

$$M = M_{вр} - tg \varphi_{ш} m_{гр} (g \cos \alpha + tg \varphi_{гр} R \omega^2 \sin \alpha) K_1 K_2 \cos \alpha R_{max} \quad (17)$$

где: $M_{вр}$ – крутящий момент, в верхней части шнека; M – момент, затрачиваемый на разрушение грунта в забое скважины; $M_{тр}$ – момент сил трения бурового инструмента по стенкам скважины; K_1 и K_2 - коэффициенты трения грунта по грунту $tg \varphi_{гр}$ и грунта по стали $tg \varphi_{ш}$, соответственно.

Полагая, что объем реборд полностью заполнен грунтом, находим массу грунта на ребордах $m_{гр}(18,05 \text{ кг})$ и используя параметры из табл. 1 статьи [1] находим $M_{гр} = 3,971 \text{ Нм}$.

Для определения момента в забое M (рис. 1б), использовались стандартные инженерные методики:

$$M = F \cdot L \quad (18)$$

где F - лобовое сопротивление, равное произведению найденного давления под долотом (рис. 9) на площадь поперечного сечения шнека, A ; L - условное плечо.

$$F = p \cdot A \quad (19)$$

Здесь $A=0,01431 \text{ м}^2$, $L=0,5 \cdot d_2 \cdot \text{tg}(\alpha+\beta)$; α – угол подъема; d_2 - средний диаметр резьбы шнека; β – угол трения; $\text{tg}\beta = \mu$ – коэффициент трения грунта по стали.

Используя уравнение (15) находим необходимый крутящий момент $M_{вр}$.

Одним из определяющих параметров при буровом зондировании является механическая мощность P (Дж/с), совершаемая крутящим моментом в процессе бурения.

$$P = M_{вр} \cdot 2\pi\omega, \quad (13)$$

где $M_{вр}$ – крутящий момент, Н·м; ω – частота вращения бурового инструмента, с^{-1} .

Все полученные расчетным путем величины показаны в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные величины

| Модуль упругости (МПа) | Давление p (кПа) | Условное плечо L (м) | Момент в забое M (Нм) | Крутящий момент $M_{вр}$ (Нм) | Механическая мощность P (Дж/с) |
|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 5 | 38,9 | 0,0451 | 25,1 | 29,1 | 913,74 |
| 10 | 65,4 | 0,0451 | 42,2 | 46,2 | 1450,02 |
| 15 | 141,0 | 0,0451 | 91,0 | 95,0 | 2983,0 |
| 20 | 154,0 | 0,0451 | 99,4 | 103,4 | 3246,76 |
| 30 | 286,0 | 0,0451 | 184,6 | 188,5 | 5918,9 |

Анализируя данные, приведенные в табл. 3 можно сделать следующие выводы. Во-первых, момент в забое скважины несущественно зависит от сил трения между грунтом на ребордах и стенками скважины. При полном заполнении реборд шнека разница между моментом в забое скважины и крутящим моментом не превышают 5-10%. Во-вторых, что очевидно, механическая мощность возрастает с ростом «жесткости» грунта, как и удельное давление.

На рис. 10,11 приведены поля деформаций сдвига в массиве грунта для двух значений жесткости грунта (5 и 30 МПа), а на рис. 13 эквивалентные по Мизесу напряжения на боковой поверхности скважины и в массиве грунта под долотом при погружении шнека.

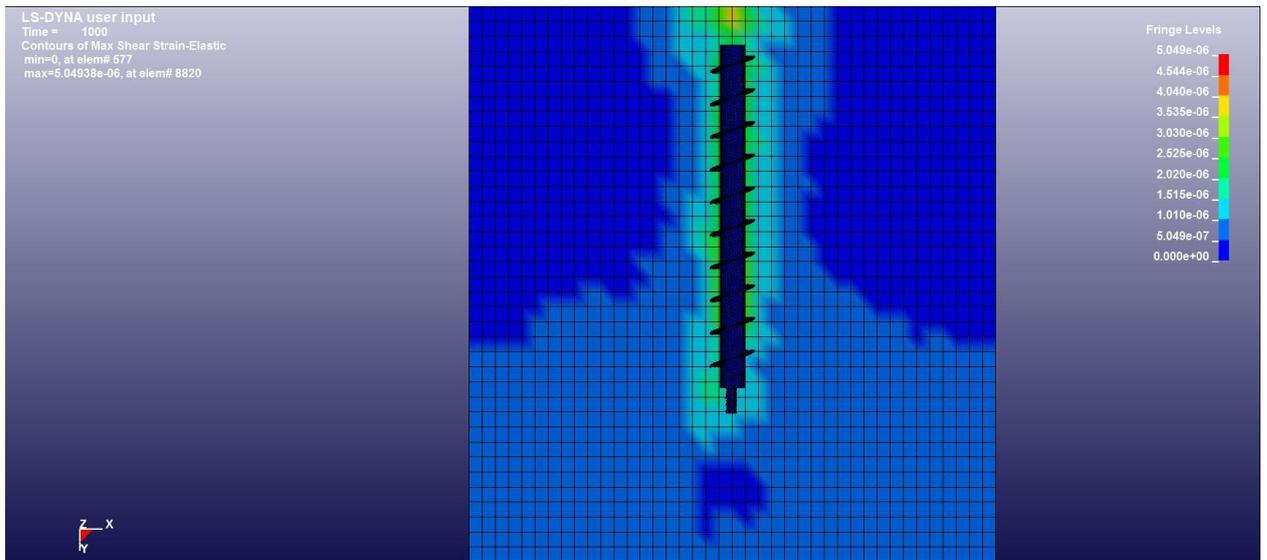


Рис. 10. Поле деформации сдвига на момент окончания расчета (пять оборотов шнека) в грунте (5 МПа)

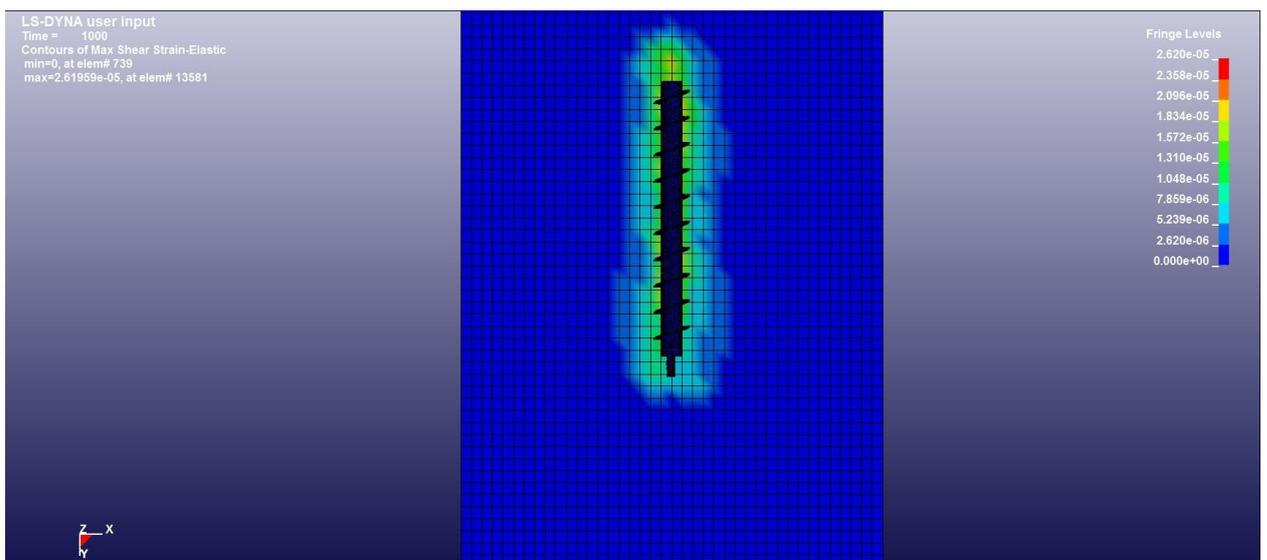


Рис. 11. Поле деформации сдвига на момент окончания расчета в грунте (30 МПа)

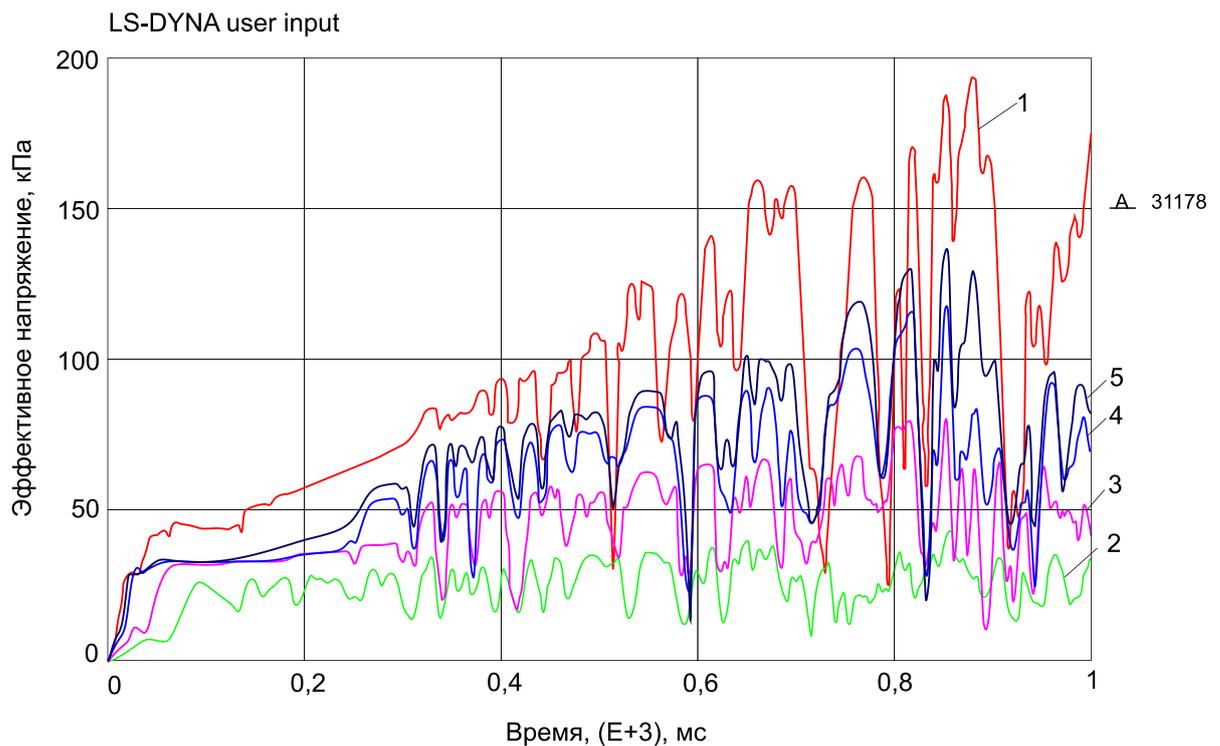


Рис. 12. График напряжений (кПа) на боковой поверхности скважины: 1-30 МПа, 2 - 5 МПа, 3 - 10 МПа, 4 - 15МПа, 5 - 20МПа

Аналогично методу построения графиков зависимости рис. 8, были построены графики (рис. 13) зависимости эквивалентного напряжения по мизесу от глубина, в элементах, находящихся на пути погружения шнека.

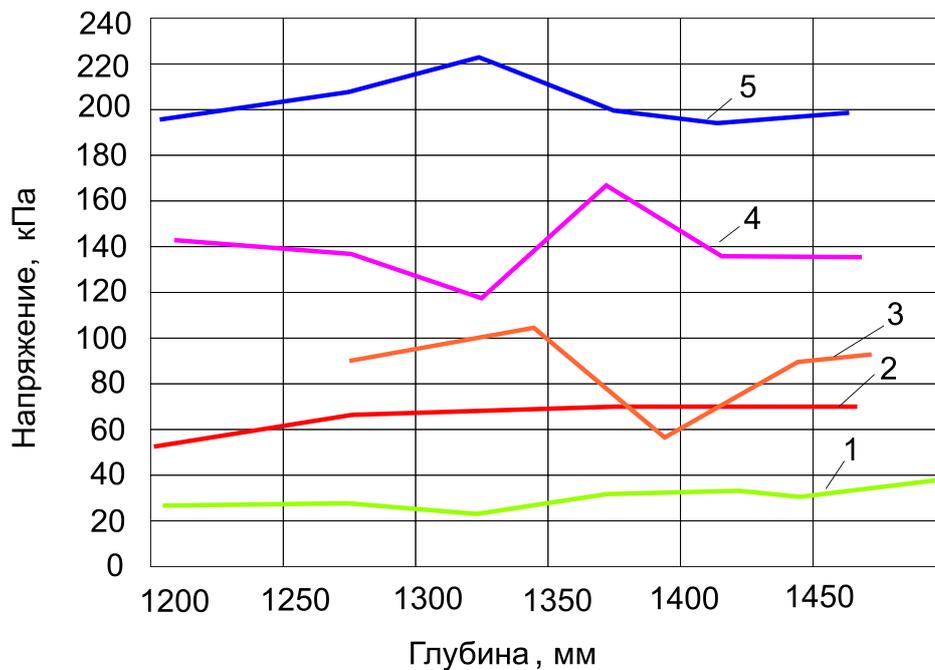


Рис. 14. Зависимости изменения напряжений от глубины погружения шнека: 1,2,3,4,5 – 5,10,15,20 и 30 МПа, соответственно

Заключение

Численное моделирование многослойного массива грунта показало зависимость лобового сопротивления, крутящего момента и механической мощности от модуля упругости грунта. Зона активной деформации грунта вокруг скважины не превышает 1-1,5 диаметра долота. Интенсивность деформаций сдвига возрастает с ростом модуля упругости грунта. Выявленная зависимость величины крутящего момента и линейной скорости от модуля упругости грунта может быть использована при интерпретации данных измерений при буровом зондировании с целью определения деформационных характеристик грунтов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков Г.А. Применение модификаций шнекового бурения для определения физико-механических свойств грунтов. Инженерные изыскания, 2015, № 3. С. 24-31.
2. Болдырев Г.Г., Кальберген Р.Г., Кушнир Л.Г., Новичков Г.А. Метод бурового зондирования. Инженерные изыскания, 2012, №12. С. 38-43.
3. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов, 2013. С. 356.
4. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Меркульев Е.В., Новичков Г.А. Сравнение методов лабораторных и полевых испытаний грунтов. Инженерные изыскания, 2013, №14. С. 28-46.
5. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков Г.А. Интерпретация результатов полевых и лабораторных испытаний прочностных и деформационных характеристик грунтов. Часть III. Интерпретация результатов полевых испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов. Инженерные изыскания, №5-6, 2014. С. 86-97.
6. Болдырев Г.Г., Колесников А.С., Новичков Г.А. Интерпретация результатов полевых и лабораторных испытаний прочностных и деформационных характеристик грунтов. Часть I. Интерпретация результатов полевых испытаний с целью определения прочностных характеристик грунтов. Инженерные изыскания, №5-6, 2014. С. 69-77.
7. ГОСТ 19912-2001 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. М.: МНТКС, 2001. – с. 22.
8. LS-DYNA keyword user's manual.
9. Sandier. I.S. and D. Ruhin, "An Algorithm and a Modular Subroutine for the Cap Model," Int. J. Numer. Anal. V1ct. Geomech.. 3, pp. 173–186 (1979).

10. Simo, J.C., J.W. Ju, K.S. Pister, and R.L. Taylor, "An Assessment of the Cap Model: Consistent Return Algorithms and Rate-Dependent Extension." *J. Eng. Mech.*. Vol. 114, No. 2, 191–218 (1988).

11. Simo, J.C., J.W. Ju, K.S. Pister, and R.L. Taylor, "Softening Response, Completeness Condition, and Numerical Algorithms for the Cap Model," *Int. J. Numer. Analy. Meth. Eng.* (in press) (1988).

12. Simo, J.C., J.W. Ju, K.S. Pister, and R.L. Taylor, "Softening Response, Completeness Condition, and Numerical Algorithms for the Cap Model," *Int. J. Numer. Analy. Meth. Eng.* (inpress) (1988).

Abstract. The paper describes numerical solution for the problem of drilling a hole with continuous three-bit auger in soils, having different elastic moduli. The solution was generated by ANSYS and LS-DYNA software. Soil was simulated with the CAP-model. Lagrange and Euler variables were applied to simulate the auger while Euler variables simulated soil and ground surface air. The solution was obtained for constant angular velocity of 31 rad/s with gravity force taken into account.

Numerical simulation of the multi-layer soil showed dependence of tip resistance, rotation moment and mechanical strength on soil elastic modulus. The zone of soil active deformation around the hole does not exceed 1.0-1.5 bit diameter. Shear deformation intensity grows if soil elastic modulus grows. The identified dependence of the torque moment on linear velocity can be used to interpret the data measured in drilling penetration in order to determine soil deformation parameters.

