

Численное моделирование методов статического и бурового зондирования

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

Новичков Г.А.

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

Ключевые слова: метод бурового зондирования; шнек; метод статического зондирования; зонд; численное моделирование; произвольная формулировка Лагранжа-Эйлера, ANSYS; LS-DYNA; лобовое сопротивление; силы трения; сравнение методов

Аннотация: приводится сравнение численного решения двух методов исследования грунтов – буровое и статическое зондирование. Оба решения получены с использованием программ Ansys и Ls-Dyna. Шнек и зонд рассчитывались в переменных Лагранжа, грунт и приземный слой воздуха – в переменных Эйлера. Численное моделирование многослойного массива грунта показало, что с увеличением модуля упругости возрастает лобовое сопротивление грунта. Приведены графики изменения лобового сопротивления грунта и сил трения на боковой поверхности зонда с увеличением глубины погружения, поля деформации сдвига и распределения давления в массиве грунта. Представлено сравнение результатов расчетов зондирования грунта двумя методами.

Numerical modeling of methods static and boring sounding

Boldyrev G.G.

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

Idrisov I.H.

General director of the «Research and Production Co.», LLC ., PhD (candidate of science in Technics), Penza, idrisov@geotek.ru

Novichkov G.A.

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

Key words: drilling test; auger; cone penetration test; probe; numerical modeling; Arbitrary Lagrangian-Euleran Formulation; ANSYS; LS-DYNA; tip resistance; friction sleeve.

Abstract: comparison of the numerical solution two methods research of soil – drilling test and cone penetration test is given. Both decisions are received with use of the ANSYS and LS-DYNA programs. The auger and a probe are considered in Lagrange's variables, soil – in Euler's variables. Numerical modeling of the multilayered massif of soil showed that with increase in the module of elasticity the tip resistance of soil increases. Schedules of change of tip resistance of soil and friction sleeve are given in a side surface of a probe with increase in depth of immersion,

a field deformation of shear and distribution of pressure in the massif of soil. Comparison results of calculations sounding of soil is presented by two methods.

1. Введение

Настоящая публикация авторов, как и предыдущая [1], рассматривает решение краевых задач механики сплошной среды при больших деформациях. В связи с ограниченностью объема в статье [1] не была рассмотрена методология решения подобного типа задач с использованием численных методов. Считаем полезным изложить в начале данной публикации существующие методы решения задач при больших деформациях. Следует заметить, что излагаемые ниже подходы к решению были применены авторами впервые при решении задачи о потере устойчивости жесткого штампа на нелинейно-деформируемом основании [3, 9].

В настоящее время известно несколько подходов к описанию движения деформируемой сплошной среды. К ним относятся подходы Лагранжа, Эйлера и объединенный подход Лагранжа-Эйлера [10]. Области применения каждого из этих подходов достаточно хорошо известны. Поэтому, не преследуя цель перечислить все их достоинства и недостатки, отметим лишь некоторые из них.

В подходе Лагранжа наблюдатель следит за движением материальных частиц движущейся сплошной среды. С материальными частицами связаны неизвестные, которые ищутся в процессе решения. Неизвестными, прежде всего, являются перемещения и скорости материальных частиц, напряжения и деформации в них.

При использовании подхода Лагранжа к описанию движения сплошной среды для пространственной дискретизации чаще всего используется метод конечных элементов. При решении динамических задач метод конечных элементов используется с явной или неявной схемой интегрирования первого или второго порядка. К числу последних, относится часто применяемая процедура Ньюмарка.

В процессе потери устойчивости в массивах оснований возникают деформации сдвига, величина которых составляет десятки процентов в пределах полос сдвига/локализации деформаций [2,7,9]. Элементы грунта в предельном и запредельном состояниях испытывают очень большие деформации, превышающие размер конечных элементов. Поэтому, если из решения не исключить эти чрезмерно деформируемые или разрушенные элементы, то поведение материала среды становится жестким, иногда говорят, что среда замыкается при сдвиге. Использование конечных элементов с одной точкой интегрирования, применение адаптивных сеток позволяют осуществить численное моделирование процесса деформации вплоть до потери устойчивости. Однако, плохая обусловленность матрицы жесткости системы, вследствие чрезмерного искажения сетки, часто приводит к невозможности получения адекватного решения как при приближении деформационного процесса к предельной по устойчивости нагрузке, так и в запредельном состоянии при больших деформациях.

При использовании подхода Эйлера к описанию движения сплошной среды наблюдатель следит за точками пространства. Неизвестные, которыми, прежде всего, являются скорости движения среды, напряжения и деформации, связаны с точками пространства. Подход Эйлера получил существенно меньшее распространение для решения геотехнических задач, чем Лагранжа. Это обусловлено необходимостью использования дополнительных процедур для определения перемещений сплошной среды, в том числе ее границы, сложностью учета переноса внутренних переменных, которые характеризуют состояние материальных частиц грунта. В ряде литературных

источников [10] такие величины, характеризующие внутренне состояние материальных частиц сплошной среды, называются историческими переменными.

Подход Лагранжа-Эйлера, в иностранной литературе, он называется Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE), сочетает в себе оба подхода и Лагранжа и Эйлера [10]. На основе подхода Лагранжа-Эйлера разработан ряд методов решения задач механики деформируемого твердого тела. Основными из них являются однокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), многокомпонентный метод Эйлера (Multi-material Eulerian) и многокомпонентный метод Лагранжа-Эйлера (Multi-material Arbitrary Lagrangian-Eulerian).

При решении задач однокомпонентным методом Лагранжа-Эйлера узлы конечно-элементной сетки могут перемещаться в пределах области, которую занимает материал, таким образом, чтобы уменьшить искажения сетки. В каждом конечном элементе содержится один материал.

При использовании многокомпонентного метода Эйлера материал течет через фиксированную в пространстве сетку. При этом каждый элемент может содержать смесь нескольких материалов.

Решения, основанные на методе Лагранжа-Эйлера, имеют преимущества методов Лагранжа и Эйлера при описании движения сплошной среды, не имея в то же время отмеченных выше недостатков. В ряде литературных источников приведены примеры успешного их использования для решения задач геомеханики [9,11-19].

При решении задач часто возникают ситуации, когда различные части рассматриваемой системы проявляют различные типы механического поведения. Например, одна часть системы ведет себя как жидкость, другая – как твердое тело. В такой ситуации для описания движения твердой части может быть применен метод Лагранжа, а для описания движения жидкости – Эйлера. В этом случае, при моделировании взаимодействия рассматриваемых частей может быть использован реализованный, например, в программе LS-DYNA алгоритм связывания Лагранжа-Эйлера. В иностранной литературе он называется Fluid-Structure Interaction (FSI). Подобный подход применен в работах [11-13] при описании поведения водонасыщенных грунтов.

Следует заметить, что в ряде систем автоматизированного инженерного анализа, например в программе LS-DYNA, реализованы два метода, основанные на подходе Лагранжа к описанию движения сплошной среды, которые позволяют эффективно моделировать процесс потери устойчивости оснований. Это бессеточный метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH) и бессеточный метод, основанный на методе Галеркина (Element Free Galerkin method). Эффективность этих методов для решения рассматриваемой задачи объясняется тем, что оба метода являются бессеточными, основываются на локальной аппроксимации перемещений узлов или частиц, а значит они не являются чувствительными к большим искажениям сетки. Метод Галеркина применен в работах [11, 12].

Особенности процессов деформирования и разрушения грунтов, важность учета влияния на поведение грунтов многочисленных факторов обуславливают необходимость использования многоэтапной процедуры решения различных задач в области геотехники. Такая процедура предполагает наличие следующих этапов - испытания грунта [4], идентификации параметров определяющего соотношения (модели грунта) [6,7], решения тестовых задач [3, 8, 14, 17] проведения и моделирования полунатурных испытаний [9]. Содержание и объем каждого этапа определяется целями математического моделирования

или расчета. Сама процедура может быть итерационной. Данная процедура решения была применена при исследовании процесса деформации массивов грунта при погружении в них шнека и зонда (рис. 1).

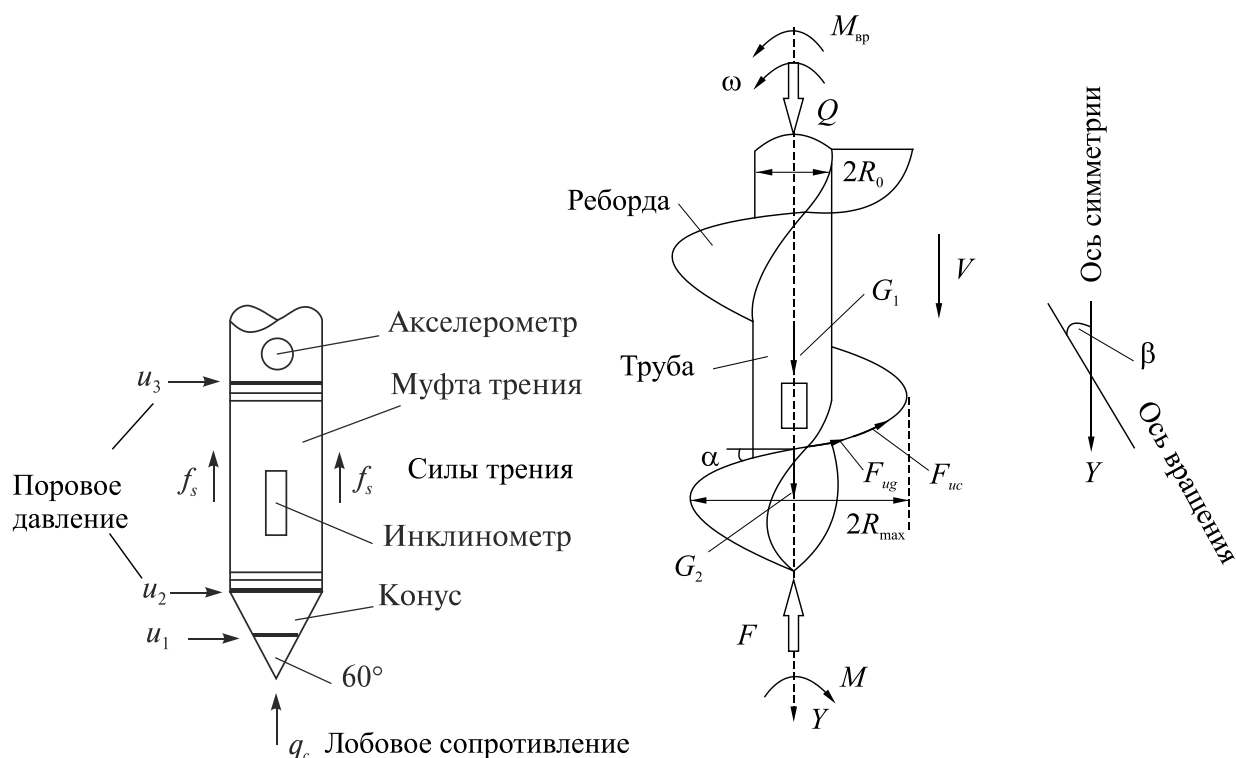


Рис. 1. Параметры, измеряемые при зондировании грунтов: а – статическое зондирование; б – буровое зондирование

Численное моделирование процесса погружения шнека в многослойный массив грунта, выполненное ранее [1], показало:

- зона активной деформации грунта вокруг скважины не превышает 1-1,5 диаметра долота;
- зависимость лобового сопротивления, крутящего момента, механической мощности и линейной скорости от модуля упругости грунта;
- рост интенсивности деформаций сдвига с увеличением модуля упругости грунта.

Цель настоящих исследований заключалась в определении лобового сопротивления (удельного давления) грунта в забое скважины, сил трения, на боковой поверхности зонда, основных характеристик напряженно-деформированного состояния массива грунта в процессе погружения зонда.

2. Постановка задачи

Как и в предыдущей работе [1] задача о погружении зонда в грунт была решена с использованием программных комплексов ANSYS и 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 задач пенетрации. Основная сложность рассматриваемой 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.

Модель зонда представляет собой сборку твердотельного конусообразного наконечника и цилиндрической оболочки, жестко закрепленной по торцу к наконечнику (рис. 2) с размерами: диаметр 30 мм, угол при вершине 60° , длина 450 мм. Размеры массива грунта: длина – 720 мм, высота – 480 мм, ширина – 155 мм. Расчетная область грунта по пространству – параллелепипед. В процессе моделирования статического зондирования использовалась та же модель грунта, что и в предыдущей работе [1] с модулем упругости 5, 10, 15, 20 и 30 МПа.

Ввиду того, что в отличие от процесса бурения [1], где шнек полностью погружен в массив грунта и моделировался процесс непосредственного вкручивания шнека в грунт, был опущен момент фактического погружения шнека, за счет трудоемкости вычислительного процесса и малоинформативности. В данном примере есть очевидная необходимость в моделировании не только процесса погружения зонда уже в массиве грунта, но и моделировании процесса начального внедрения зонда в грунт, в связи с чем было принято решение установить зонд над расчетной областью грунта. На рис. 2 показан общий вид расчетной области и сетка конечных элементов.

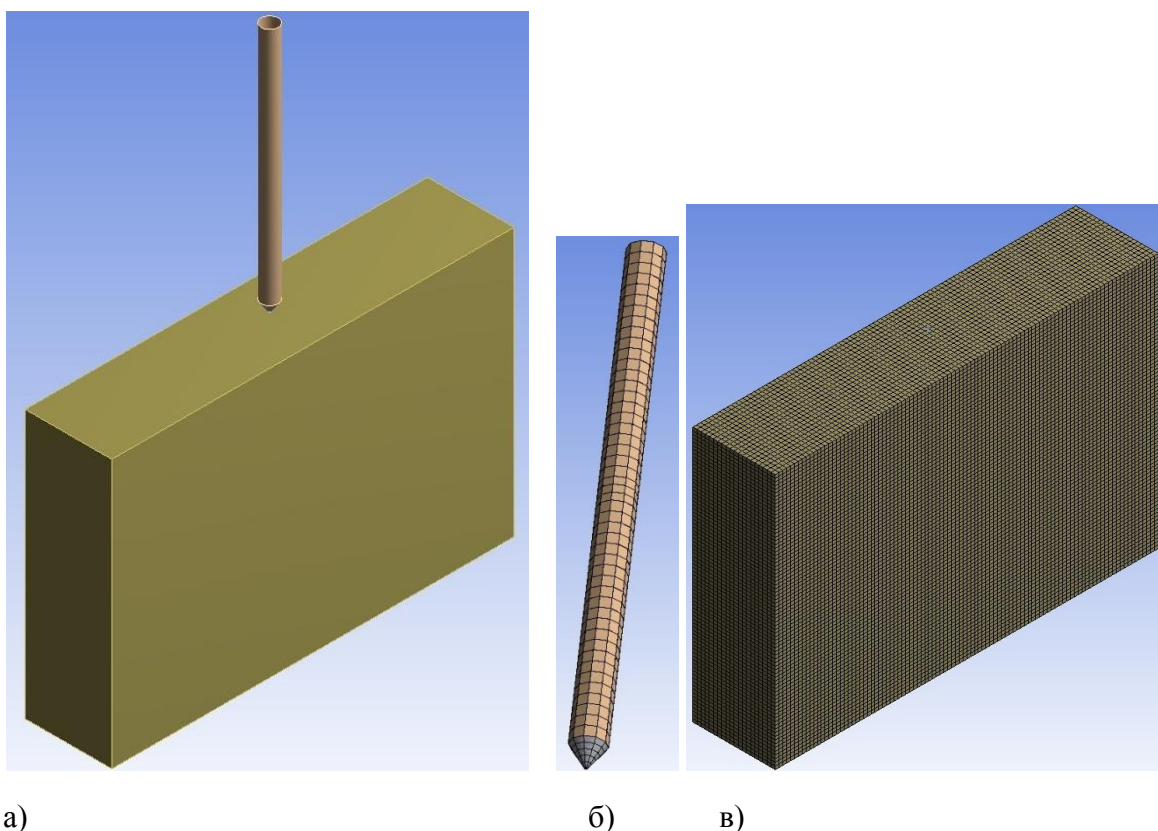


Рис. 2. Общий вид расчетной области (а), сетка конечных элементов зонда (б) и массива грунта (в)

Из вышесказанного следует, что для исследования процесса зондирования в данной задаче необходимо в расчете задать дополнительные вдавливающие усилия или постоянную скорость, начальные условия приведены ниже:

- постоянная осевая скорость 1 м/с, приложенная ко всей модели зонда и направленная в сторону погружения. Расчеты со стандартной скоростью погружения 2 см/с выполнить не удалось из-за большого времени счета;
- сила тяжести, направленная в сторону погружения;
- коэффициент трения грунта по стали 0,25.

Расчет многослойного массива грунта был разбит на 5 его составляющих, каждая из которых соответствовала определенному модулю упругости (5, 10, 15, 20 и 30 МПа). Параметры модели грунта (Cap model - http://lsdyna.ru/pdf/support/LS-DYNA_manual_Vol_II_R6.0.0.pdf) приняты прежними, как и в работе [1].

На рис. 2 б,в представлены модели конечно-элементной сетки зонда и массива грунта соответственно. Характерная форма элементов - гексаэдр. Размерность сетки составила 200500 элементов.

Контактное взаимодействие Лагранжевой (зонд) и Эйлеровой (массив грунта) областей описывалось картой *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID. Эта карта обеспечивает механизм сцепления для моделирования Fluid-Structure взаимодействия (FSI) путем привязки Лагранжевой (подчиненной) сетки оболочечных и объемных элементов к материальным точкам Эйлеровой (главной) сетки. Для обеспечения большей точности результатов тип связывания (CTYPE) был выбран со штрафным ограничением для оболочечных и объемных элементов. В качестве направления связывания (DIREC) была выбрана опция «во всех направлениях», тем самым учитывался момент возможного налипания грунта на боковую поверхность зонда. Также для учета и отслеживания сил трения в опции FRIC был задан коэффициент трения 0,25.

Контакт между жестким (Rigid) телом и оболочечной частью задавался при помощи карты *CONSTRAINED_EXTRA_NODES, а именно привязкой узлов оболочечной части зонда к жесткому телу наконечника. Дополнительные узлы или набор узлов для жесткого тела могут находиться в любом месте, даже вне этого тела, но при этом считается, что они являются его частью.

3. Решение уравнений движения

Расчет производился при помощи трехмерного высоконелинейного решателя LS-DYNA. Для описания поведения наконечника зонда использовалась карта *MAT_RIGID, для оболочечной части зонда *MAT_ELASTIC. Зонд рассчитывался в переменных Лагранжа, грунт и приземный слой воздуха – в переменных Эйлера (формулировка 5). Для грунта использовалась модель GEOLOGIC_CAP_MODEL.

Решение было проведено на компьютере с 12 ядерным процессором Intel Xeon CPU E5-2630; 2.3 GHz. ОЗУ: 32 Гб. Жесткий диск: 10 ТБ.

4. Результаты расчетов

Как видно из рис. 3 за счет заданной постоянной осевой скорости, зонд непрерывно погружается в массив грунта. На рис. 3 показано постоянство скорости за время всего расчета (отрицательная величина объясняется противоположным направлением вектора скорости относительно положительного направления оси).

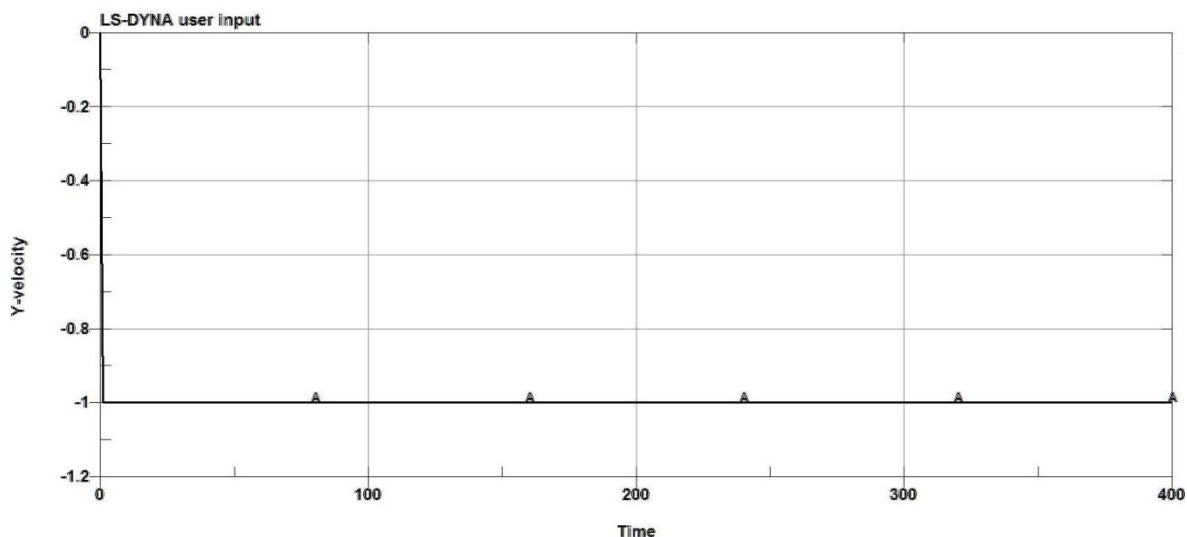


Рис.3. Постоянная осевая скорость погружения (м/с)

Изменение силы лобового сопротивления (в дальнейшем по тексту, давление) было определено в элементах, находящихся на пути погружения зонда. Типичная зависимость изменения давления (кПа) в элементе при прохождении через него зонда показана на рис. 4, пиковые величины давления в элементе являются искомыми величинами давления на конкретной глубине. Подобные зависимости получены для грунтов с другими модулями упругости. На рис. 5 изображен сводный график (пиковых величин) зависимости «Давление-глубина». Как видно из рис. 5 лобовое сопротивление зависит от жесткости грунта и возрастает с ростом модуля упругости. Однако, после определенной величины погружения зонда оно становится постоянным и практически не зависит от глубины погружения.

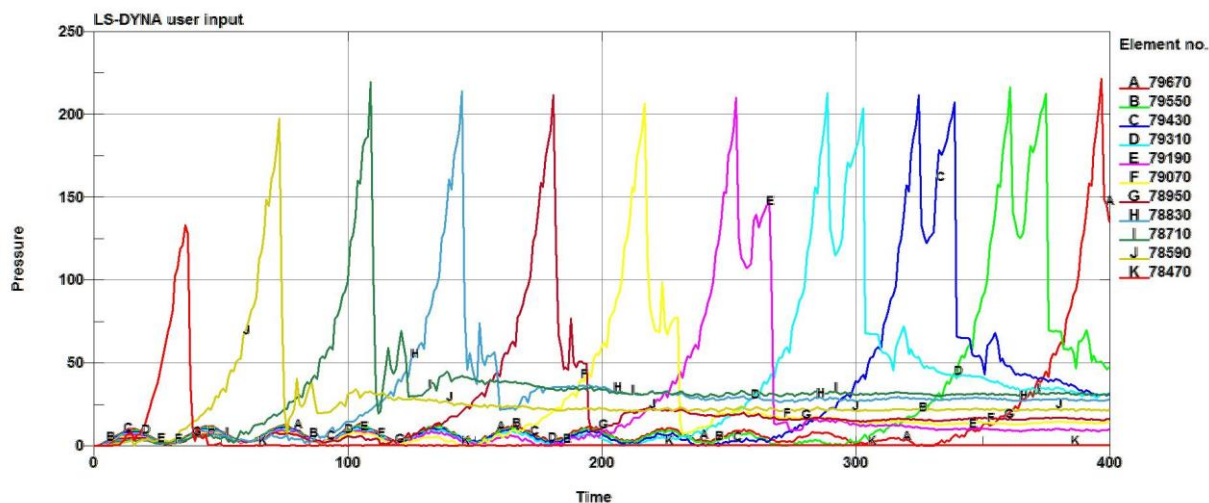


Рис. 4. Изменение давления (кПа) при прохождении зонда через элементы массива грунта с модулем упругости 5 МПа

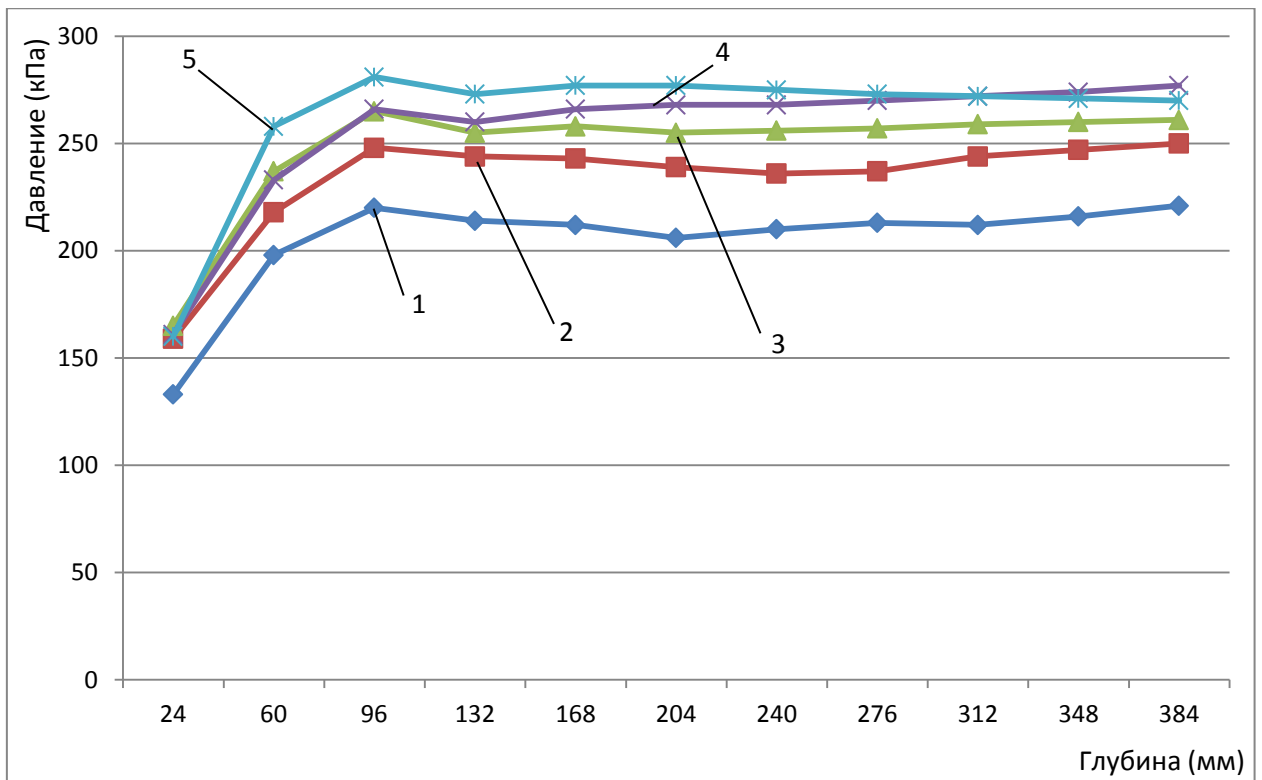


Рис. 5. Сводный график пиковых величин давления (кПа) с модулем упругости: 1, 2, 3, 4, 5 – 5, 10, 15, 20 и 30 МПа соответственно

Для дальнейшего описания процесса погружения зонда рассматривался оболочечный элемент, расположение которого показано на рис. 6. Как уже было сказано ранее, контакт между оболочечной частью зонда и его наконечником задавался картой *CONSTRAINED_EXTRA_NODES, поскольку при помощи данного элемента предполагалось определить силы трения на боковой поверхности, препятствующие погружению. Для этого необходимо было убрать влияние соседних элементов на него. Для этого при помощи той же карты *CONSTRAINED_EXTRA_NODES, были прикреплены к жесткому телу все узлы находящиеся выше и ниже рассматриваемого элемента, видимые для этой стороны зонда узлы также показаны на рис. 6. Чтобы окончательно убрать с элемента дополнительное внешнее влияние, всей оболочечной части зонда была задана начальная скорость при помощи карты *INITIAL_VELOCITY_GENERATION, тем самым были сняты растягивающие усилия на элемент в начале расчета.

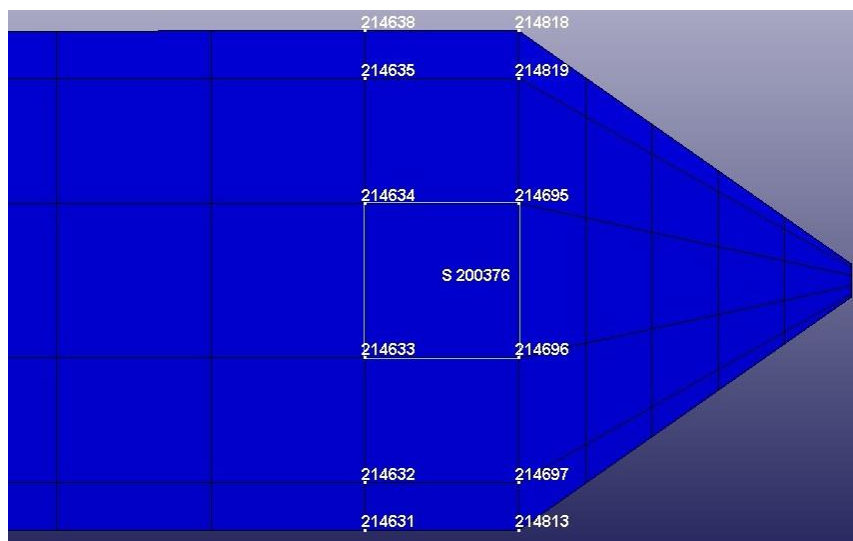


Рис. 6. Расположение элемента и видимые узлы, участвующие в карте *CONSTRAINED_EXTRA_NODES

Ниже, на рис. 7 показан типичная зависимость изменения касательных напряжений в элементе, на основе которых были определены силы трения на боковой поверхности зонда.

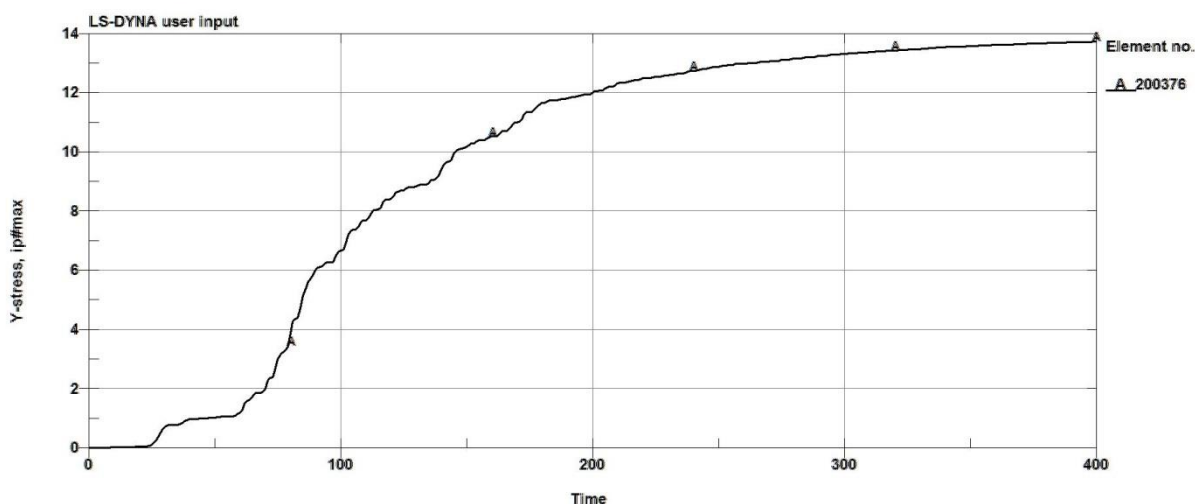


Рис. 7. Изменение касательных напряжений (кПа) в элементе при погружении в грунт с модулем упругости 5 МПа

Расчеты с различным модулем деформации показывают на уменьшение касательных напряжений в элементе с ростом модуля упругости грунта. Возможно, это связано с тем, что грунт с меньшим модулем упругости более подвержен деформации, за счет чего, часть грунта в зоне стенок скважины выдавливается вверх и в стороны выше наконечника зонда. Это явление подтверждается опытами, результаты которых приведены в работе Мельникова А.В. [6].

На графике ниже (рис. 8) показано давление, оказываемое на элемент боковой поверхности, со стороны грунта за время проведения расчета. Подобные зависимость получена и при других значения модуля упругости. Давление уменьшается по мере увеличения модуля упругости.

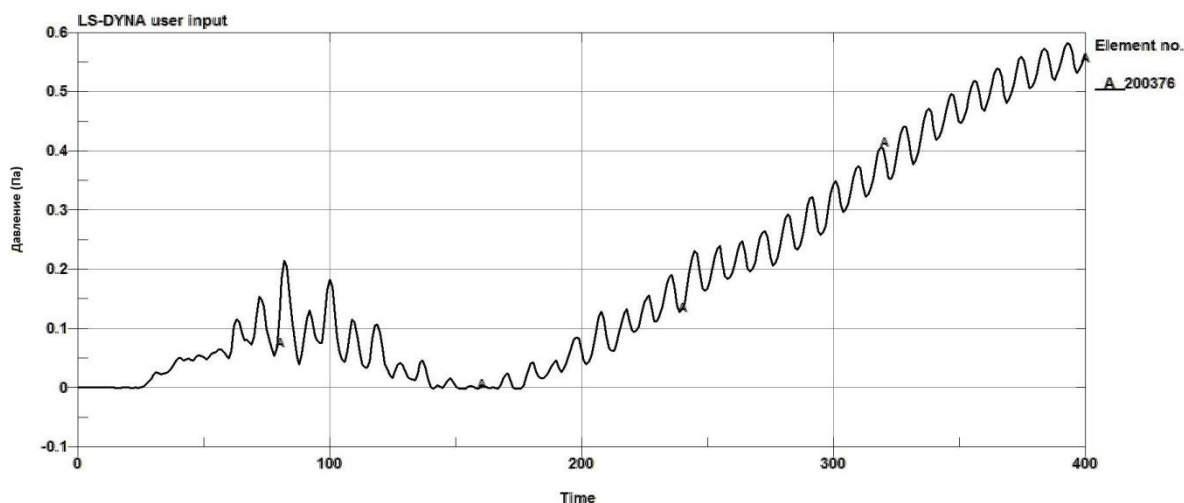


Рис. 8. Изменение давления (Па), оказываемое на элемент боковой поверхности, со стороны грунта с модулем упругости 5 МПа

Зная величину касательного и нормального напряжений, площадь действия нагрузки несложно определить силы трения. Типичная зависимость изменения сил трения на боковой поверхности зонда приведена на рис. 9.

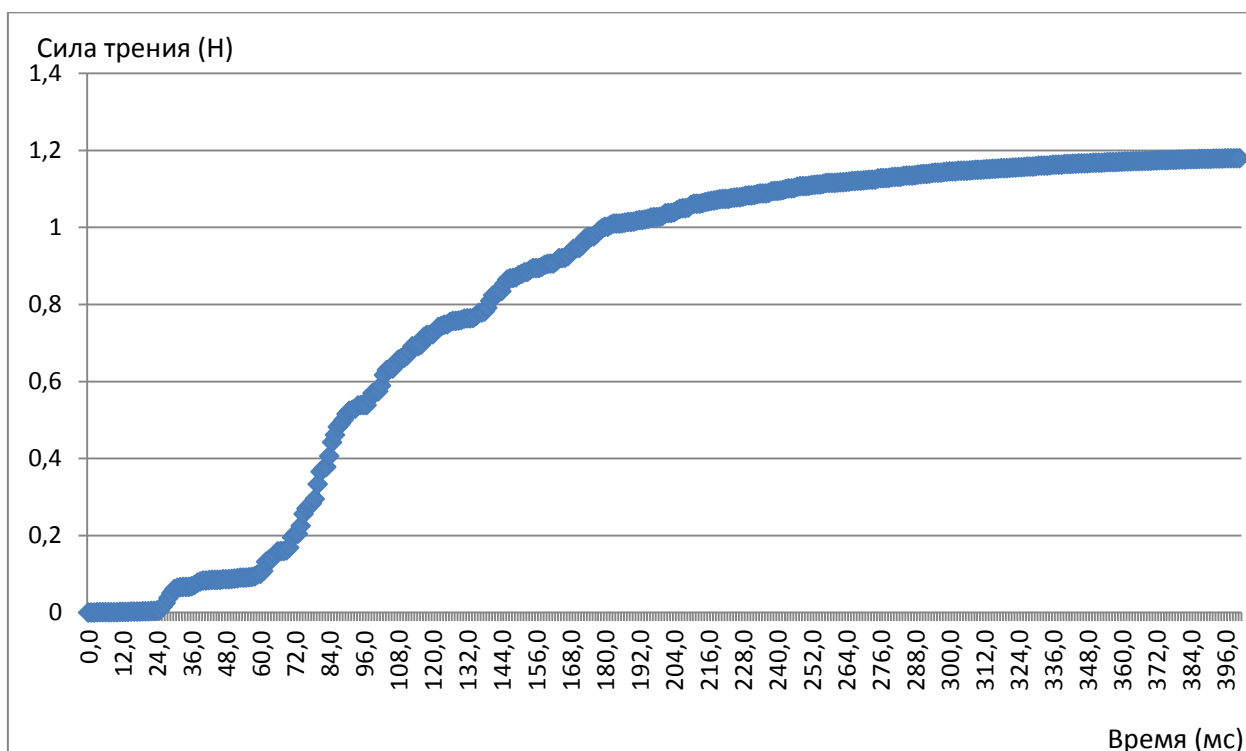


Рис. 9. Изменение силы трения на боковой поверхности зонда при погружении в грунт с модулем упругости 5 МПа

Для более подробного описания поведения массива грунта при статическом зондировании, ниже приведены поля деформации сдвига и распределения давления при начальном внедрении зонда (рис. 10, 11).

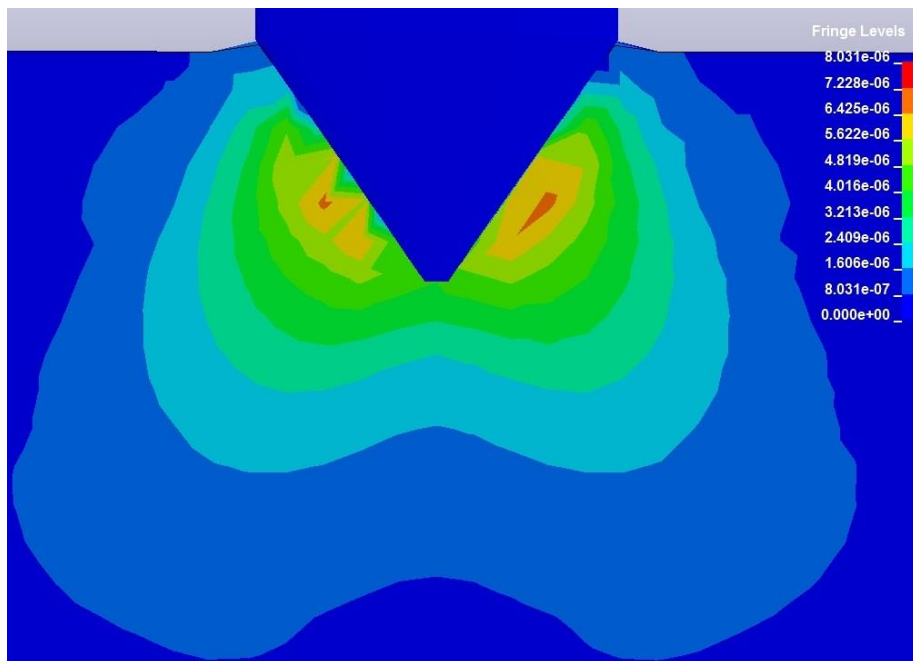


Рис. 10. Поле деформации сдвига в массиве грунта с модулем упругости 5 МПа на момент начального внедрения зонда

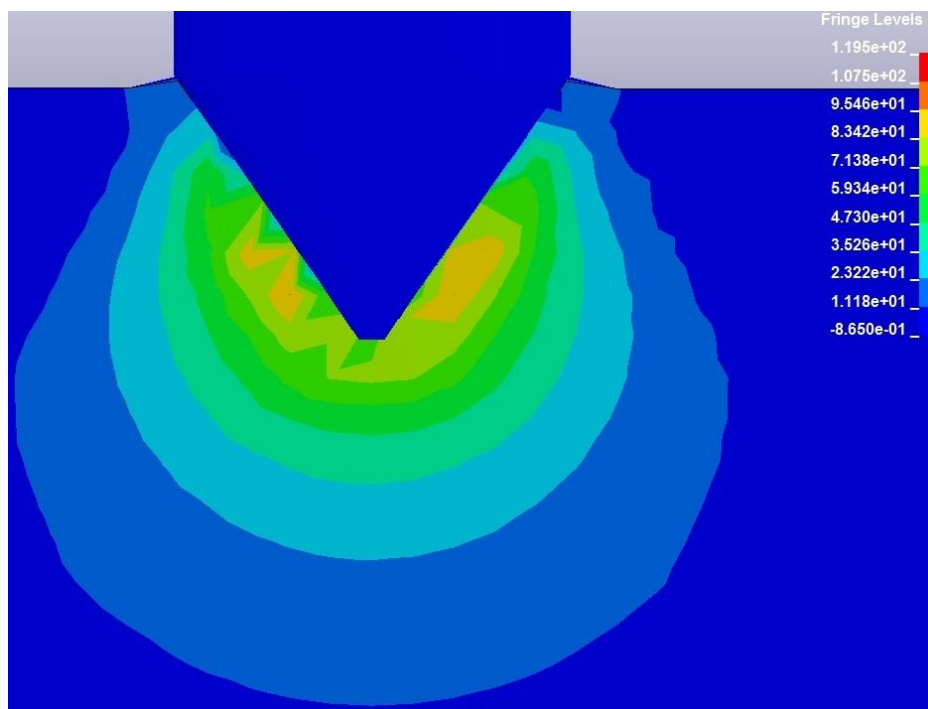


Рис. 11. Поле распределения давления (кПа) в массиве грунта с модулем упругости 5 МПа на момент начального внедрения зонда

На рис. 12 -14 приведено распределение плотности в массиве грунта на различной глубине погружения. Изменение плотности является следствием действия деформаций сдвига и объема. В массиве грунта под наконечником грунт сжимается, а в области, примыкающей к его наклонным граням расширяется по направлению в стороны и вверх. Несколько отличный механизм деформирования был выявлен в опытах и в решении программой PLAXIS [8]. Решение было получено в условиях плоской деформации с использованием модели грунта с упрочнением. На рис. 15 **Ошибка! Источник ссылки не найден.** показаны изолинии деформаций сдвига и объема, построенные по результатам

измерений перемещений частиц песка методом цифровой обработки образов. По интенсивности деформаций в массиве песка можно выделить три области, которые разделены на рис. 3 **Ошибка! Источник ссылки не найден.** прямыми АВ и СD. Различия в выявленных механизмах деформирования (рис. 14а и рис. 15) объясняются не только принятыми моделями грунта, но и видом напряженного состояния. Для условий плоской деформации (рис. 15) более характерно явление локализации деформаций в предельном и запредельном состояниях. Явление локализации деформаций в песчаном основании было обнаружено также и в решении задачи о жестком штампе [3, 9], что наглядно видно на рис. 16. Однако, как видно из рис. 14а и рис. 15, в случае трехмерной деформации не наблюдается явной локализации деформаций, что также было отмечено в работе [19]. По всей видимости, здесь сказывается влияние промежуточного главного напряжения (сигма 2) на прочность грунтов. Следует отметить, что все опыты подтверждающие явление резкой локализации деформаций были проведены в условиях плоской деформации методами фотограмметрии или цифровой обработки образов через прозрачную стенку лотка [2,7,8]. Измерить поля деформаций в условиях трехмерной деформации технически очень сложно. В последнее время делаются попытки использовать для этого рентгеновскую томографию [19,20]. В этих трехмерных опытах получена форма зоны деформации под конусом в виде луковицы, подобная той, что показана на рис. 13, 14.

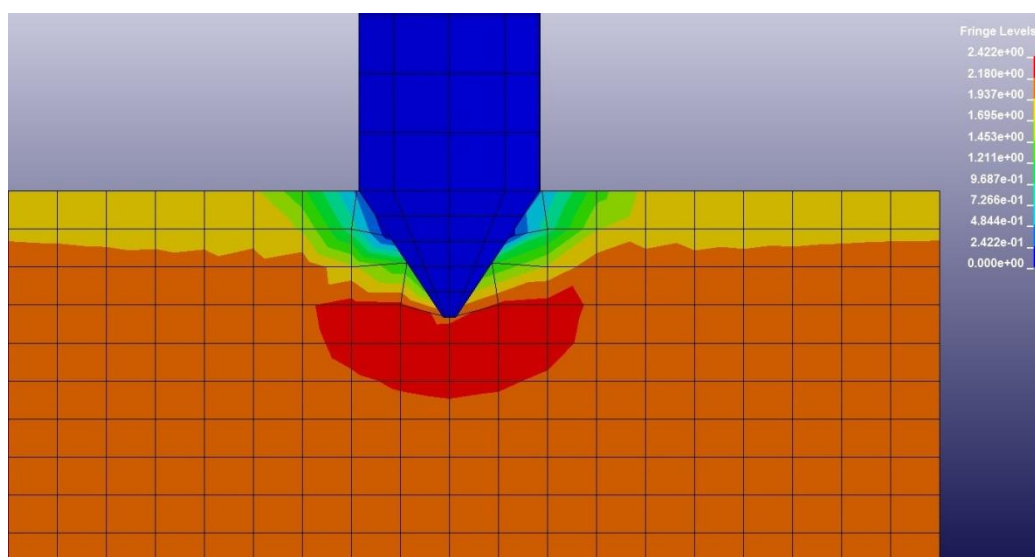


Рис. 12. Распределение плотности ($\text{кг} \times 10^3/\text{м}^3$) в массиве грунта с модулем упругости 5 МПа в момент начального внедрения

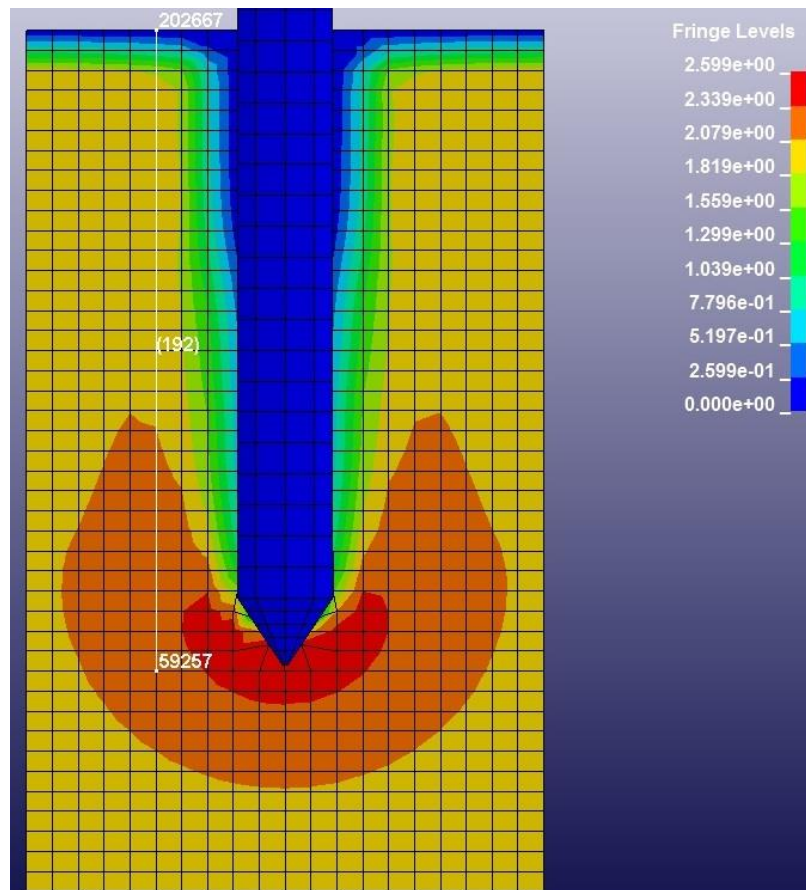
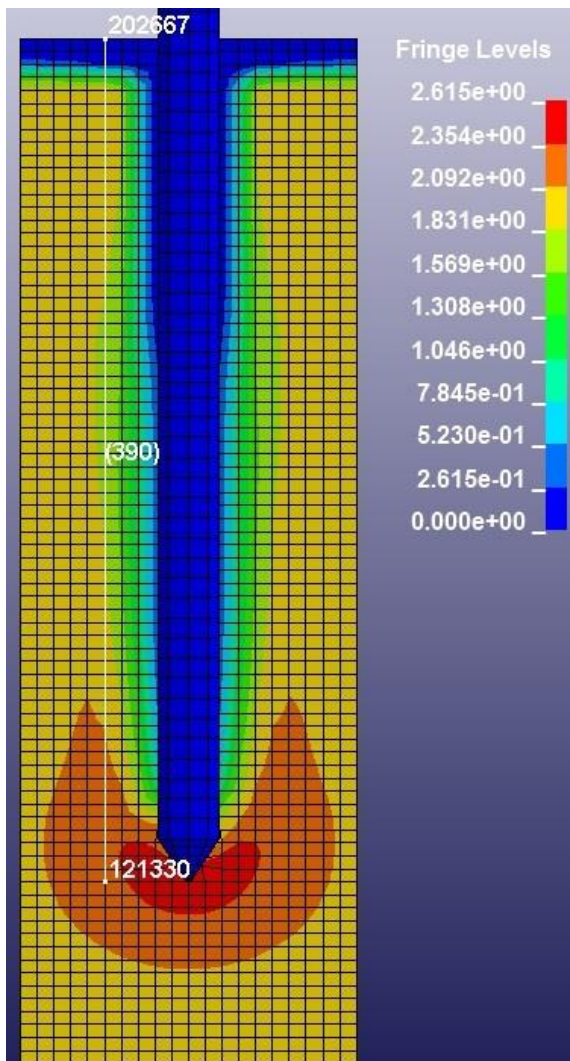
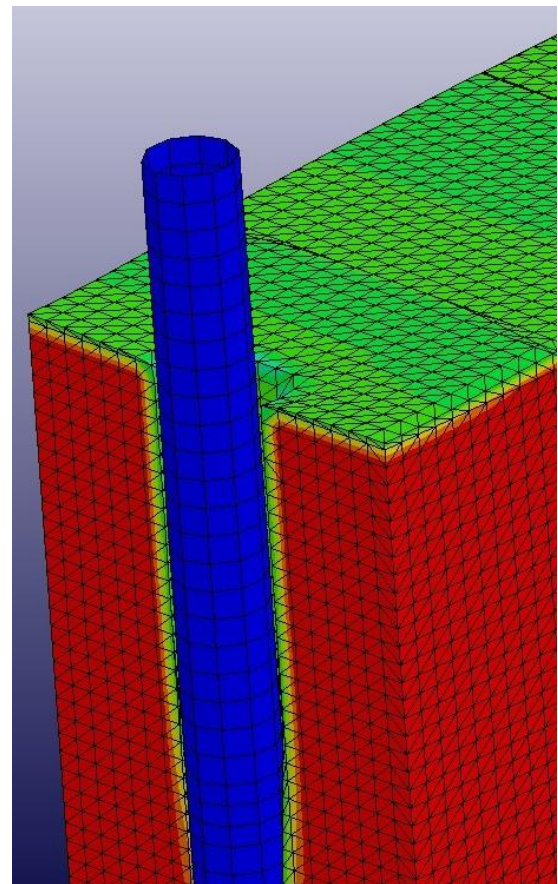


Рис. 13. Распределение плотности ($\text{кг} \times 10^3/\text{м}^3$) в массиве грунта с модулем упругости 5 МПа на глубине 192 мм



a)



б)

Рис. 14. Распределение плотности ($\text{кг} \times 10^3/\text{м}^3$) в массиве грунта с модулем упругости 5 МПа на момент окончания расчета (390 мм) (а) и деформация грунта вокруг зонда (б)

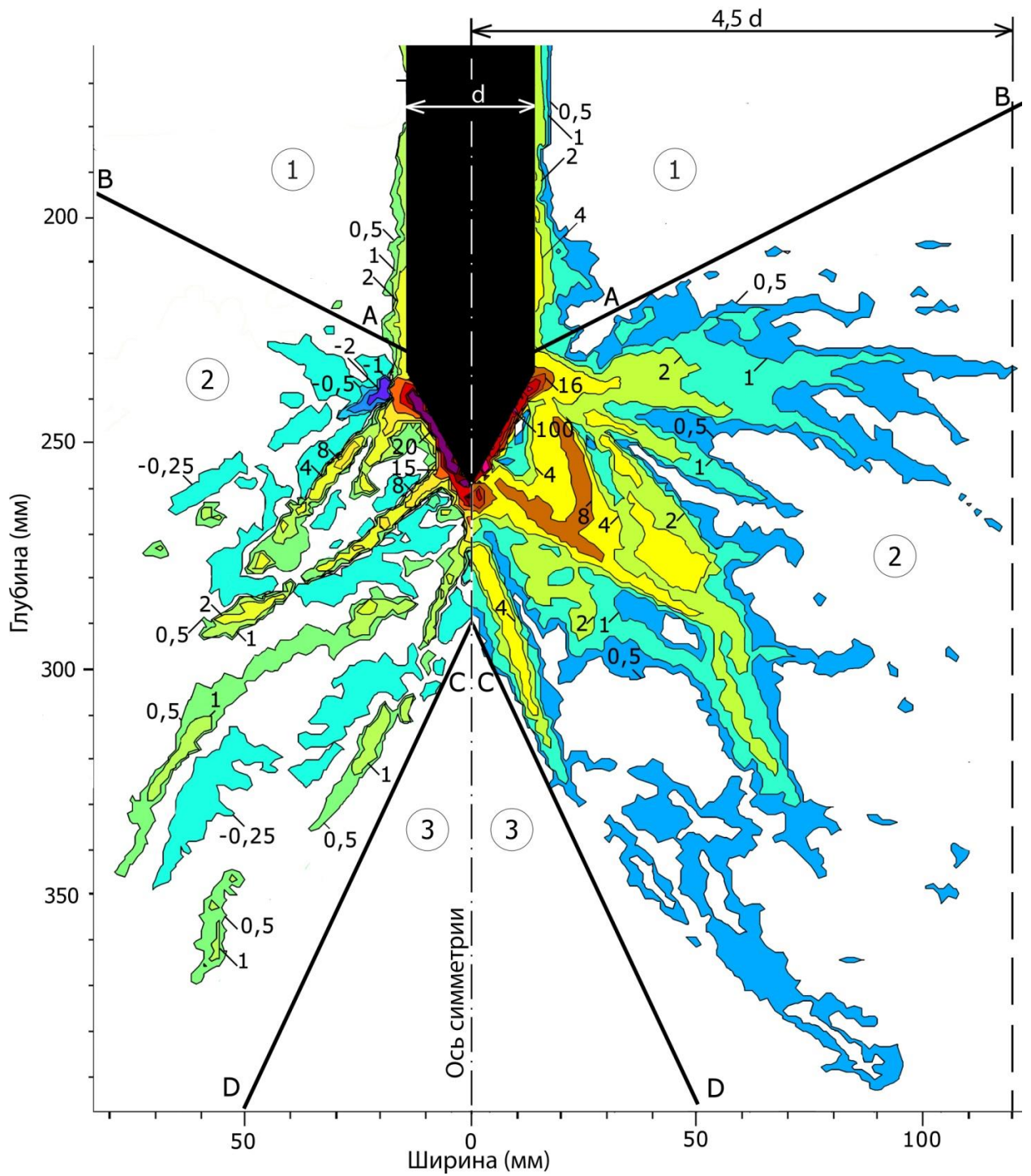


Рис. 15. Зоны деформаций сдвига и объема (%) в песчаном грунте с правой и левой стороны от оси симметрии, соответственно: (+) – сжатие; (-) – расширение; 1 – зона стабилизировавшихся деформаций; 2 – зона активных деформаций; 3 – зона отсутствия деформаций (в пределах точности измерений) [8]

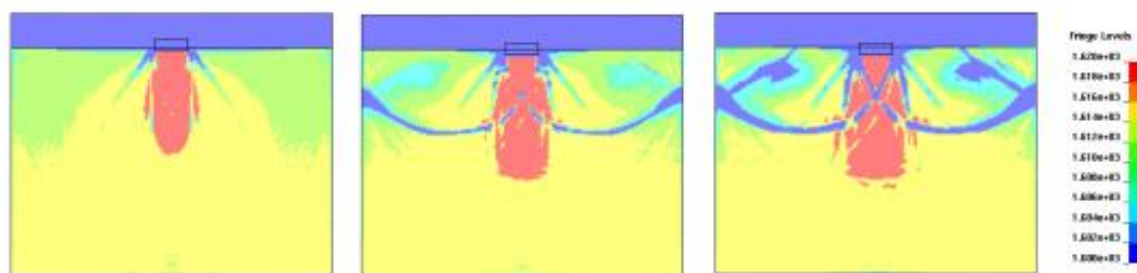


Рис. 16. Распределение плотности (г/см^3) в массиве песчаного основания при различной осадке штампа [3,9]

5. Сопоставление результатов моделирования статического зондирования и бурения шнеком

Для проведения качественного анализа была применена одна и та же модель материала грунта с полным совпадением всех физико-механических свойств, как и для случая бурения скважины шнеком. Ввиду схожести характера изменения искомых величин при моделировании с различной жесткостью грунта (модули упругости), сопоставление было основано на модели грунта с модулем упругости 5 МПа. В таблице 1 представлены начальные условия обоих процессов.

Табл. 1. Начальные условия процессов бурения шнеком и статического зондирования

Параметр	Бурение шнеком	Статическое зондирование
Осевая скорость (м/с)	-	1
Угловая скорость вращения (рад/с)	31	-
Сила тяжести	направлена в сторону погружения	
Коэффициент трения грунт-сталь	0,25	
Размерность конечно-элементной сетки	177922	200500

Одной из основных и показательных характеристик процесса бурения шнеком является стабилизация скорости погружения (рис. 17). Это явление позволяет высказать предположение, что вследствие постепенной стабилизации скорости погружения, дальнейшие значения лобового сопротивления будут неизменны. Это подтверждается также характером зависимости «Давление-Глубина», где колебание величины давления, после стабилизации, становится не существенным и равным 38,9 кПа (рис. 18). Шнек на момент окончания расчета находился на глубине 1500 мм.

В процессе моделирования процесса статического зондирования наблюдалась следующая ситуация: изначально была задана постоянная скорость погружения (см. рис. 2), при этом лобовое сопротивление с увеличением глубины погружения практически не возрастало (см. рис. 5), за исключением начального момента времени.

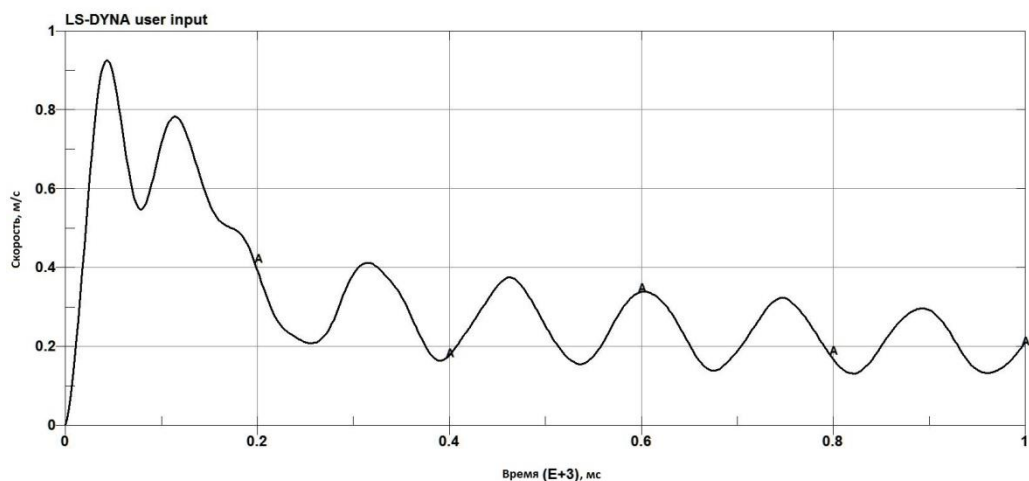


Рис. 17. Стабилизация скорости погружения в процессе бурения шнеком (м/с)

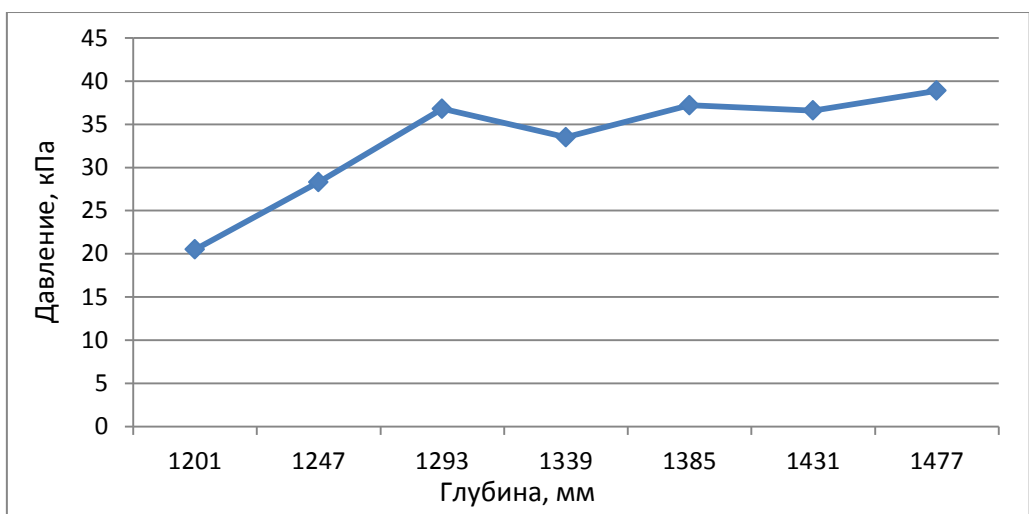


Рис. 18. График зависимости удельного давления от глубины при бурении шнеком

Как и в процессе бурения шнеком, необходимо определить момент стабилизации характера изменения величин. На зависимостях «Изменение касательных напряжений (кПа) в элементе при погружении в грунт с модулем упругости 5 МПа» (рис. 7) и «Изменение давления (Па), оказываемое на элемент боковой поверхности, со стороны грунта с модулем упругости 5 МПа» (рис. 8) прослеживается стабилизация характера изменения величин, примерно, в момент времени 200 мс, что соответствует, приблизительно, глубине 200 мм. Это дало основание полагать, что качественное изменение лобового сопротивления (кПа) с глубиной в процессе статического зондирования стоит рассматривать в промежутке времени от 200 до 400 мс. Рассматриваемая часть зависимости представлена на рисунке 19.

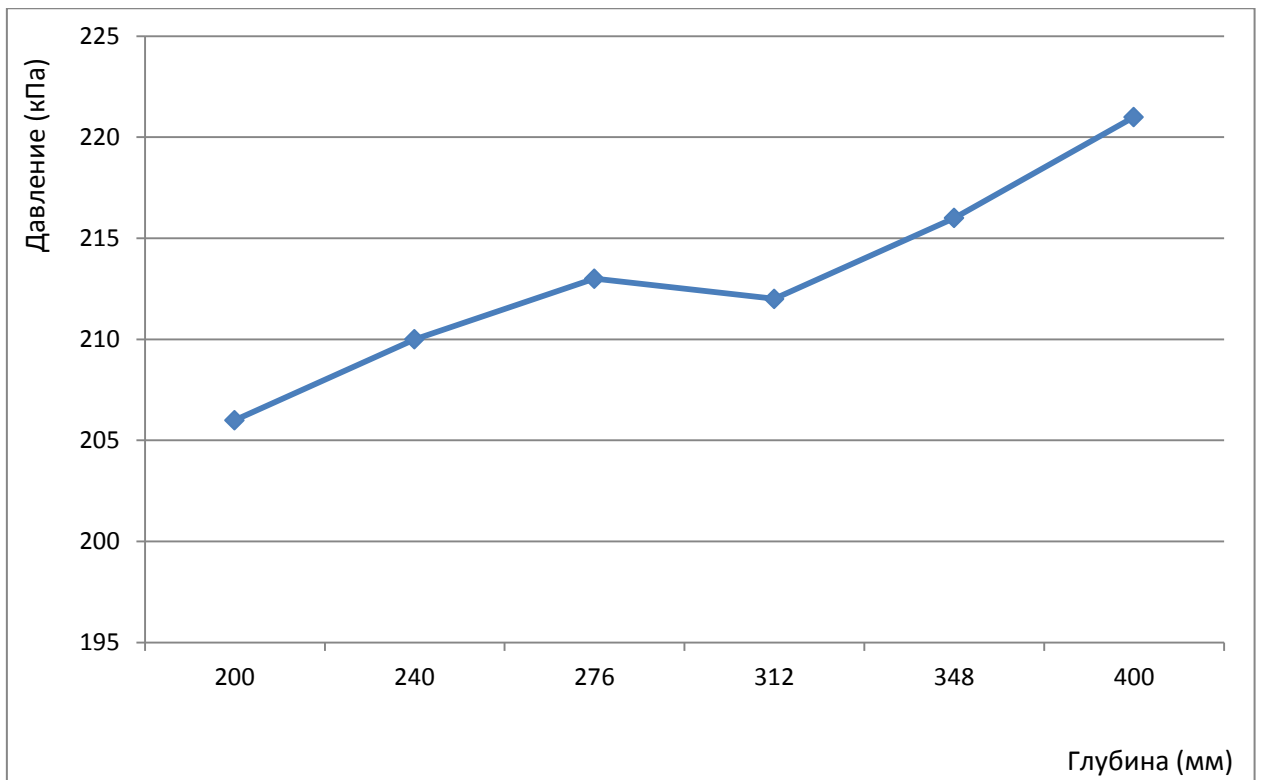


Рис. 19. Сводный график пиковых величин удельного давления (кПа) в процессе статического зондирования в грунте с модулем упругости 5 МПа

Как видно из рис. 19, характер изменения величины лобового сопротивления похож на линейную зависимость. На основании этого предположения, при помощи линейной экстраполяции, была получена величина удельного давления на глубине 1500 мм, которая составила 303,5 кПа. Величина сил трения при этом составляет 1,2 Н (см. рис. 9).

На основе полученных данных при моделировании обоих процессов и для наглядности сопоставления, ниже приведена сводная таблица основных параметров рассматриваемых процессов.

Табл. 2. Параметры бурового и статического зондирования

Характеристика	Буровое зондирование	Статическое зондирование
Рассматриваемая глубина погружения, мм	1500	
Сила трения на боковой/винтовой поверхности, препятствующая погружению, Н	См. [1]. Сила трения на винтовой поверхности способствует погружению	1,2
Удельное давление (лобовое сопротивление), кПа	38,9	303,5
Характер изменения величины силы трения на боковой/винтовой поверхности с глубиной	Остается постоянной после стабилизации скорости погружения	Предполагается незначительное изменение
Характер изменения величины удельного давления (лобового сопротивления) с глубиной	Остается постоянной после стабилизации скорости погружения	Увеличивается по линейному закону

В заключение следует отметить, что решение задачи статического зондирования было получено при одной линейной скорости погружения зонда из-за длительности реализации вычислительного процесса на 12 ядерном процессоре. Этот недостаток может быть преодолен в случае использования более мощных компьютеров.

6. Выводы

1. Сопоставление результатов бурового и статического зондирования свидетельствует о значительном росте лобового сопротивления при статическом зондировании в сравнении с методом бурового зондирования.

2. В обоих методах зондирования индикатором перехода в слой грунта с другой жесткостью, является изменение лобового сопротивления. Это позволяет сделать предположение о возможности применения метода бурового зондирования по аналогии с методом статического зондирования для определения модуля деформации грунтов и выделения слоев грунта.

3. В отличие от метода статического зондирования лобовое сопротивление в буровом зондировании, в пределах слоя грунта с одинаковой жесткостью, остается постоянным и значительно меньшим. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о большей эффективности бурового зондирования, так как при одних и тех же энергозатратах исследования грунтов методом бурового зондирования можно выполнить на большую глубину по сравнению со статическим зондированием.

4. Силы трения в обоих процессах зондирования имеют различный характер поведения, так, если в процессе бурения силы трения способствуют погружению, то в процессе статического зондирования – препятствуют.

Литература

1. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Мягков К.А., Новичков Г.А. Численное решение задачи бурения скважины шнеком. Геотехника, 2015, №5. С. ...40.

2. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Барвашов В.А. Исследование характера деформации песчаного основания с использованием метода цифровой обработки образов. Всероссийская научно-техническая конференция «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» Новочеркасск, 2012, с. 191-197.

3. Болдырев Г.Г., Муйземник А.Ю., Малышев И.М. Численное моделирование оснований при больших деформациях. <http://npp-geotek.com/d/942856/d/modelirovaniyeosnovaniypribolshikhdeformatsiyakh.pdf>

4. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: Прондо, 2014. С. 812.

5. Болдырев Г.Г., Арефьев А., Муйземник А.Ю. Идентификация параметров моделей грунтов. Инженерная геология, №9, 2010, с. 36-41.

6. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Валеев Д.Н. Определение параметров моделей грунтов. Основания, фундаменты и механика грунтов, №3, 2006, с. 20-25.

7. Болдырев Г.Г., Никитин Е.В. Деформация песка в основании полосового штампа. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, 1987, с. 26-28.
8. Мельников А.В., Болдырев Г.Г. Исследование характера деформирования песка в процессе статического зондирования. Основания, фундаменты и механика грунтов, №6, 2014, с. 14-18.
9. Boldyrev G.G., Muyzemnek A.J. The Modelling of Deformation Process in Soils with use of Ansys and Ls-Dyna Programs. Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. August 11-16, 2008, Arlington, Virginia, pp.1-10.
10. Belytschko T., Liu W.K., Moran B., Elkhodary K.I. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley, 2013. 830 p.
11. Di Y., Sato T. Computational Modelling of Large Deformation of Saturated Soils Using an ALE Finite Element Method. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 47, 2004, pp. 1-12.
12. Di Y., Sato T. Remapping Scheme in ALE Method for Liquefaction Simulation. 16 th ASCE Engineering Mechanics Conference. July 16-18, 2003, University of Washington, Seattle.
13. Nazem M., Sheng D. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for Consolidation Problems in Geomechanics. VIII International Conference on Computational Plasticity. COMPLAS VIII. Eds.: E.Onate, D.R.J.Owen, Barcelona, 2005.
14. Aubram D. Development and experimental validation of an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method for soil mechanics. Geotechnik, 2015. Vol. 38, № 3, p. 193–204.
15. Souli M., Shahrour I. Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation for soil structure interaction problems. Soil dynamics and earthquake engineering, 2012.
16. Murakami A., Arimoto S., Setsuyasu T., Nishiyama T. Mesh-Free Method for Predicting the Behavior of Saturated Soil. In: Geomechanics. Testing, Modelling, and Simulation, 2005. 664-672 pp.
17. Kulak R.F., Bojanowski C. Modeling of Cone Penetration Test Using SPH and MM-ALE Approaches. 8th European LS-DYNA® Users Conference, Strasbourg – May 2011, p. 1-10.
18. Kulak R.F. , Schwer L., Effect of soil material models on SPH simulation for soil-structure interaction, 12th international LS-DYNA users conference, Dearborn Michigan USA, June 3-5 2012.
19. Paniagua P., Ando E., Silva M., Emdal A., Nordal S., Viggiani G. Soil deformation around a penetrating cone in silt. Geotechnique Letters 3, 2013, 185–191.
20. Van Nes J.H.G. Application of computerized tomography to investigate strain fields caused by cone penetration in sand. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Department of Applied Earth Sciences. TA/TG/02-03, №229, 2004.

References

1. Boldyrev G.G., Idrisov I.H., Mjagkov K.A., Novichkov G.A. Chislennoe reshenie zadachi burenija skvazhiny shnekom. Geotekhnika, 2015, №5. S. ...40.
2. Boldyrev G.G., Mel'nikov A.V., Barvashov V.A. Issledovanie haraktera deformacii peschanogo osnovanija s ispol'zovaniem metoda cifrovoj obrabotki obrazov. Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Mehanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii» Novoherkask, 2012, s. 191-197.
3. Boldyrev G.G., Mujzemnik A.Ju., Malyshev I.M. Chislennoe modelirovanie osnovanij pri bol'shikh deformacijah. <http://npp-geotek.com/d/942856/d/modelirovaniyeosnovaniypriboldshikhdeformatsiyakh.pdf>
4. Boldyrev G.G. Metody opredelenija mehanicheskikh svojstv gruntov s kommentarijami k GOST 12248-2010. M.: Prondo, 2014. S. 812.
5. Boldyrev G.G., Aref'ev A., Mujzemnik A.Ju. Identifikacija parametrov modelej gruntov. Inzhenernaja geologija, №9, 2010, s. 36-41.
6. Boldyrev G.G., Idrisov I.H., Valeev D.N. Opredelenie parametrov modelej gruntov. Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov, №3, 2006, s. 20-25.
7. Boldyrev G.G., Nikitin E.V. Deformacija peska v osnovanii polosovogo shtampa. Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov, № 1, 1987, s. 26-28.
8. Mel'nikov A.V., Boldyrev G.G. Issledovanie haraktera deformirovanija peska v processe staticheskogo zondirovanija. Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov, №6, 2014, s. 14-18.
9. Boldyrev G.G., Muzzemnek A.J. The Modelling of Deformation Process in Soils with use of Ansys and Ls-Dyna Programs. Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. August 11-16, 2008, Arlington, Virginia, pp.1-10.
10. Belytschko T., Liu W.K., Moran B., Elkhodary K.I. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley, 2013. 830 p.
11. Di Y., Sato T. Computational Modelling of Large Deformation of Saturated Soils Using an ALE Finite Element Method. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 47, 2004, pp. 1-12.
12. Di Y., Sato T. Remapping Scheme in ALE Method for Liquefaction Simulation. 16 th ASCE Engineering Mechanics Conference. July 16-18, 2003, University of Washington, Seattle.
13. Nazem M., Sheng D. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for Consolidation Problems in Geomechanics. VIII International Conference on Computational Plasticity. COMPLAS VIII. Eds.: E.Onate, D.R.J.Owen, Barcelona, 2005.
14. Aubram D. Development and experimental validation of an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method for soil mechanics. Geotechnik, 2015. Vol. 38, № 3, p. 193–204.
15. Souli M., Shahrour I. Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation for soil structure interaction problems. Soil dynamics and earthquake engineering, 2012.

16. Murakami A., Arimoto S., Setsuyasu T., Nishiyama T. Mesh-Free Method for Predicting the Behavior of Saturated Soil. In: Geomechanics. Testing, Modelling, and Simulation, 2005. 664-672 pp.

17. Kulak R.F., Bojanowski C. Modeling of Cone Penetration Test Using SPH and MM-ALE Approaches. 8th European LS-DYNA® Users Conference, Strasbourg – May 2011, p. 1-10.

18. Kulak R.F., Schwer L., Effect of soil material models on SPH simulation for soil-structure interaction, 12th international LS-DYNA users conference, Dearborn Michigan USA, June 3-5 2012.

19. Paniagua P., Ando E., Silva M., Emdal A., Nordal S., Viggiani G. Soil deformation around a penetrating cone in silt. *Geotechnique Letters* 3, 2013, 185–191.

20. Van Nes J.H.G. Application of computerized tomography to investigate strain fields caused by cone penetration in sand. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Department of Applied Earth Sciences. TA/TG/02-03, №229, 2004.

Реферат

В статье рассмотрено численное решение задачи статического и бурового зондирования грунтов. Решения выполнены с использованием программ ANSYS и LS-DYNA и формулировки Лагранжа-Эйлера (ALE). В обоих случаях было определено лобовое сопротивление при погружении зонда и шнека в грунт.

1. Сопоставление результатов бурового и статического зондирования свидетельствует о значительном росте лобового сопротивления при статическом зондировании в сравнении с методом бурового зондирования.

2. В обоих методах зондирования индикатором перехода в слой грунта с другой жесткостью, является изменение лобового сопротивления. Это позволяет сделать предположение о возможности применения метода бурового зондирования по аналогии с методом статического зондирования для определения модуля деформации грунтов и выделения слоев грунта.

3. В отличие от метода статического зондирования лобовое сопротивление в буровом зондировании, в пределах слоя грунта с одинаковой жесткостью, остается постоянным и значительно меньшим. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о большей эффективности бурового зондирования, так как при одних и тех же энергозатратах исследования грунтов методом бурового зондирования можно выполнить на большую глубину по сравнению со статическим зондированием.

4. Силы трения в обоих процессах зондирования имеют различный характер поведения, так, если в процессе бурения силы трения способствуют погружению, то в процессе статического зондирования – препятствуют.