Научно-производственное предприятие «Геотек»
(ООО НПП «Геотек»)

ОТЧЕТ
О РАБОТЕ

Программы и эксперименты

Автор: Мельников А.В.

Технический директор
ООО НПП «Геотек»
д.т.н. профессор _____ Г.Г. Болдырев
(подпись, дата)

Пенза 2012

Содержание.

1. Лабораторные испытания в АСИС 3.3. 2
2. Эксперименты в малом лотке с глинистым основанием....2
3. Разработка ПО для метода PIV....12
4. Обзор программ по обработке результатов CPTU....13
Список литературы. 24

1. Лабораторные испытания в АСИС 3.3.

Для тестирования новой программы обработки результатов испытаний были проведены все необходимые на данный момент испытания в срезных устройствах и устройствах компрессионного сжатия с достаточным количеством образцов, в том числе на набухание по всем методам:

- ГОСТ 12248-2010 Немерзлый грунт. Метод компрессионного сжатия.
- ГОСТ 12248-2010 Немерзлый грунт. Испытание по прямому методу определения давления набухания (Метод компенсирующих нагрузок).
- ГОСТ 12248-2010 Немерзлый грунт. Свободное набухание. Прямой метод определения давления набухания.
- ГОСТ 12248-2010 Немерзлый грунт. Испытание по косвенному методу определения давления набухания (Метод компенсирующих нагрузок).
- ГОСТ 24143-80 Набухание под нагрузкой.
- ГОСТ 12248-2010 Метод одноплоскостного среза НН.
- ГОСТ 12248-2010 Метод одноплоскостного среза КД.
- ГОСТ 12248-2010 Метод одноплоскостного среза НН с возможностью непрерывного нагружения.
- ГОСТ 12248-2010 Метод одноплоскостного среза КД с измерением вертикальной деформации.
- ГОСТ 12248-2010 Метод одноплоскостного среза с постоянной скоростью деформации и измерением вертикальной деформации.
- ГОСТ 12248-2010 Метод повторного одноплоскостного среза.

2. Эксперименты в малом лотке с глинистым основанием.

Эксперимент проводится с целью изучения процесса деформирования глинистого основания под жестким штампом в условиях плоской деформации. Используется лоток с прозрачными стенками из оргстекла. Штамп жестко прикреплен к нагрузочному штоку устройства силового нагружения.

Нагружение проходило ступенями перемещиний 0,2 мм со стабилизацией 5 мин. Такой способ был выбран, т.к. заранее неизвестно какое очередное перемещение получит штамп при нагружении степенями давления. Для обработки метом PIV важно ограничить перемещения между парой последовательных кадров.

Рис. 1. Проведение эксперимента в малом лотке с глинистым основанием

Фотокамера использовалась в полностью ручном режиме, т.к. была нужна неизменная фокусировка, светочувствительность, открытие диафрагмы и выдержка. Подбор яркости проводился по гистограмме яркости. Формат фотографий RAW для исключения потерь при сжатии.

Для создания текстуры на лицевой поверхности после формирования глинистого основания снималась одна стенка. Поверхность была посыпана промытым и просеянным песком фракции 0,1-0,25 мм.

В одной из стенок лотка на внутренней стороне на станке были сделаны отверстия диаметром 0,3 мм и в среднем такой же глубины. Отверстия использовались для калибровки. 9 отверстий позволили применить нелинейную (полином 2-й степени) калибровку для перевода координат из пикселей в мм и учета погрешностей дисторсии, искажения стекла и др.

Оценка точности измерения перемещений показала точность около 3 мкм.

После первого эксперимента обнаружились некоторые недоработки:

1. Штамп неплотно касался торцами стенок лотка. Грунт выдавливался в этот зазор, из-за чего занижалась величина вертикальных перемещений и объемных деформаций грунта под штампом. Простейшим решением стало утолщение штампа наклейкой слоев изоленты на обратной стороне (рис. 2)

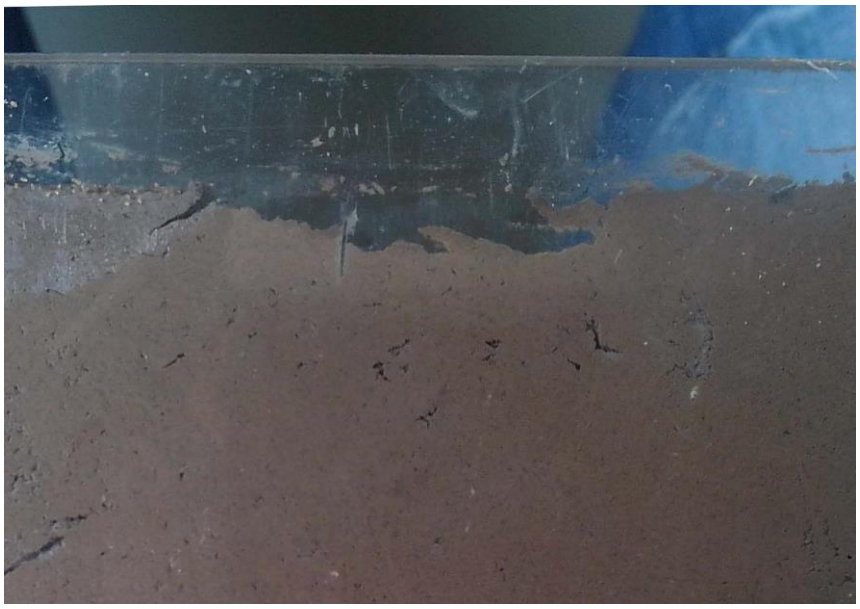

Рис. 2. Выдавливание глины в зазор между штампом и стеклом

2. Глинистый грунт слабо уплотнялся статической нагрузкой, выдавливался. Для уплотнения динамической нагрузкой и одновременного выравнивания поверхности была сделана металлическая пластина с отверстием с резьбой и вырезами (рис. 3). Отверстие с резьбой позволило вкрутить в него штырь от устройства стандартного уплотнения и уплотнять грунт падающим с постоянной высоты грузом.

а) пластина б) процесс уплотнения

Рис. 3. Послойное формировании основания с уплотнением динамической нагрузкой

3. В конструкции штампа не было предусмотрено вообще никакого крепления, в результате штамм опрокинулся. В следующий раз было сделано резьбовое отверстие для жесткого крепления штампа к нагрузочному штоку устройства силового нагружения.

После окончания эксперимента наблюдались значительные трещины на лицевой, боковой, горизонтальной поверхностях (рис. 4).

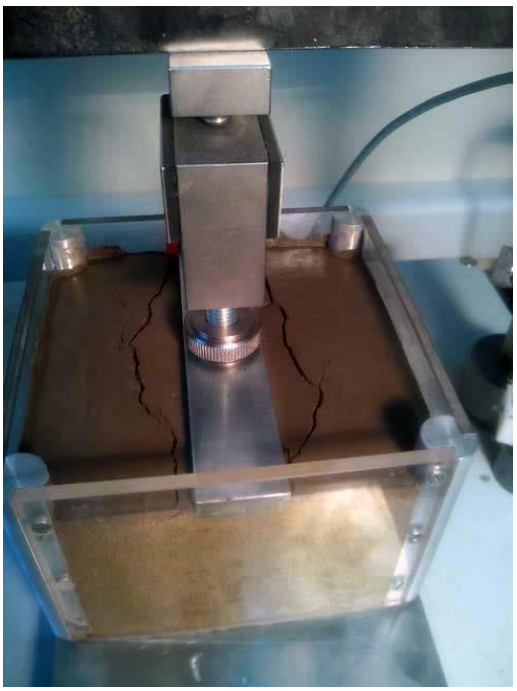

Рис. 4. Трещины на поверхности

Рис. 5. Трещины на лицевой поверхности

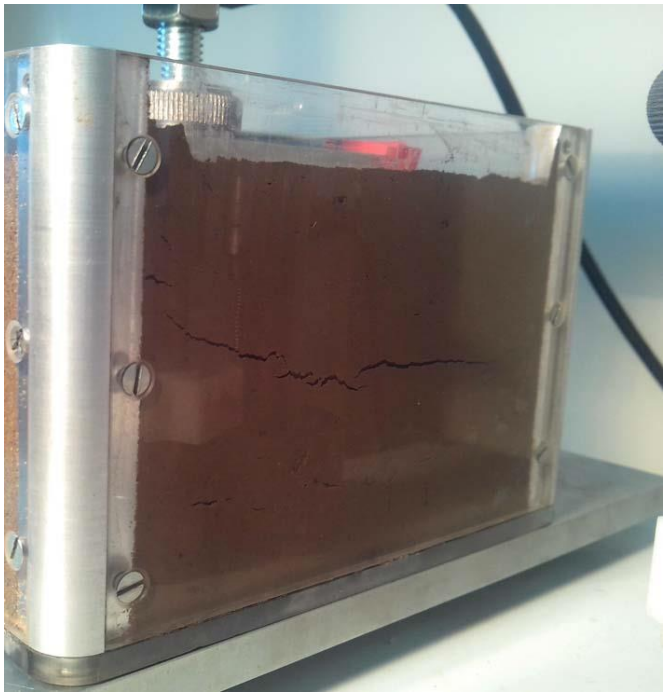

Рис. 6. Трещины на боковой поверхности

Траектории трещин совпадают с траекториями развития максимальных деформаций сдвига (рис. 7).

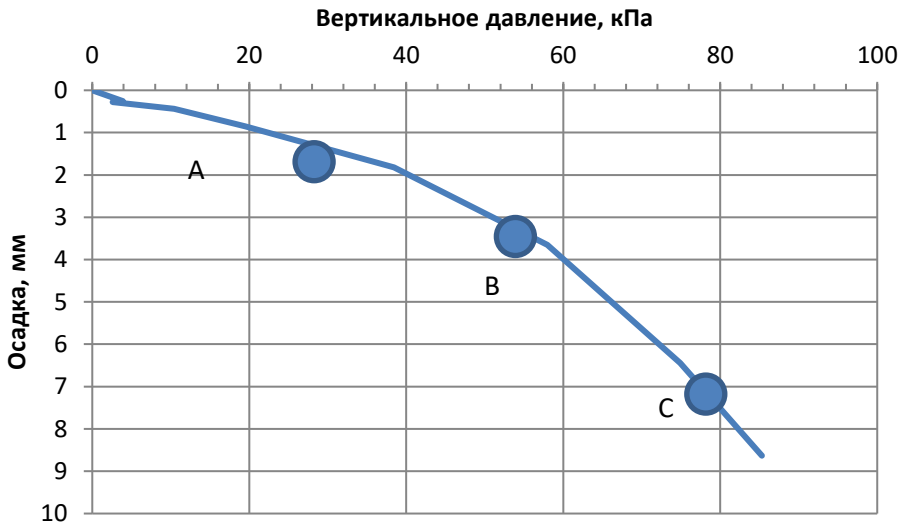

Рис. 7. График зависимости осадки штампа от вертикального давления и точки анализа методом PIV

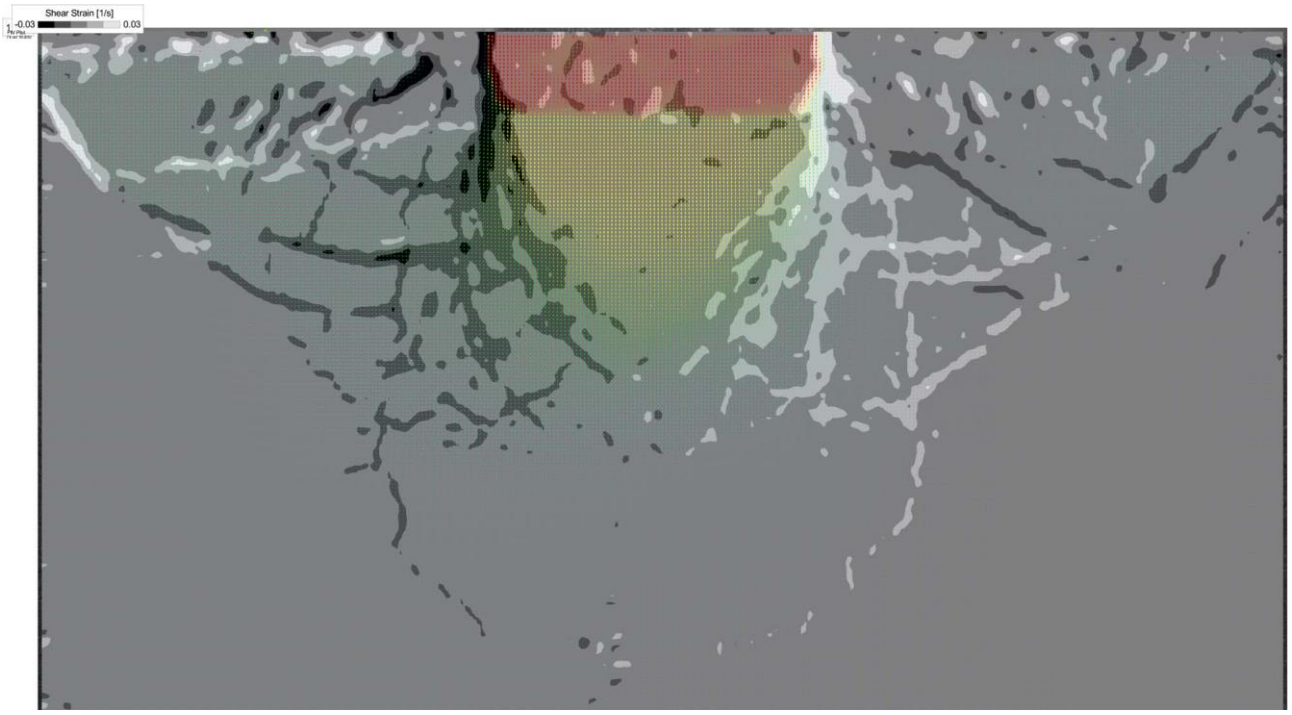

Рис.8. Векторы перемещений (увеличение значения от синего до красного) и поле деформаций сдвига (точка B)

Из рис. 7 хорошо видно «прорезку» основания. Из под краев штампа на глубину около 8 мм вертикально распространяются максимальные деформации сдвига.

Заметно, что сдвиг проходит не по одной, а по нескольким плоскостям. Как будет видно из последующих рисунков после некоторой деформации по одной их этих линий с каждой стороны начинают преобладать над другими. Их расположение совпадает с видимыми трещинами с боков лотка.

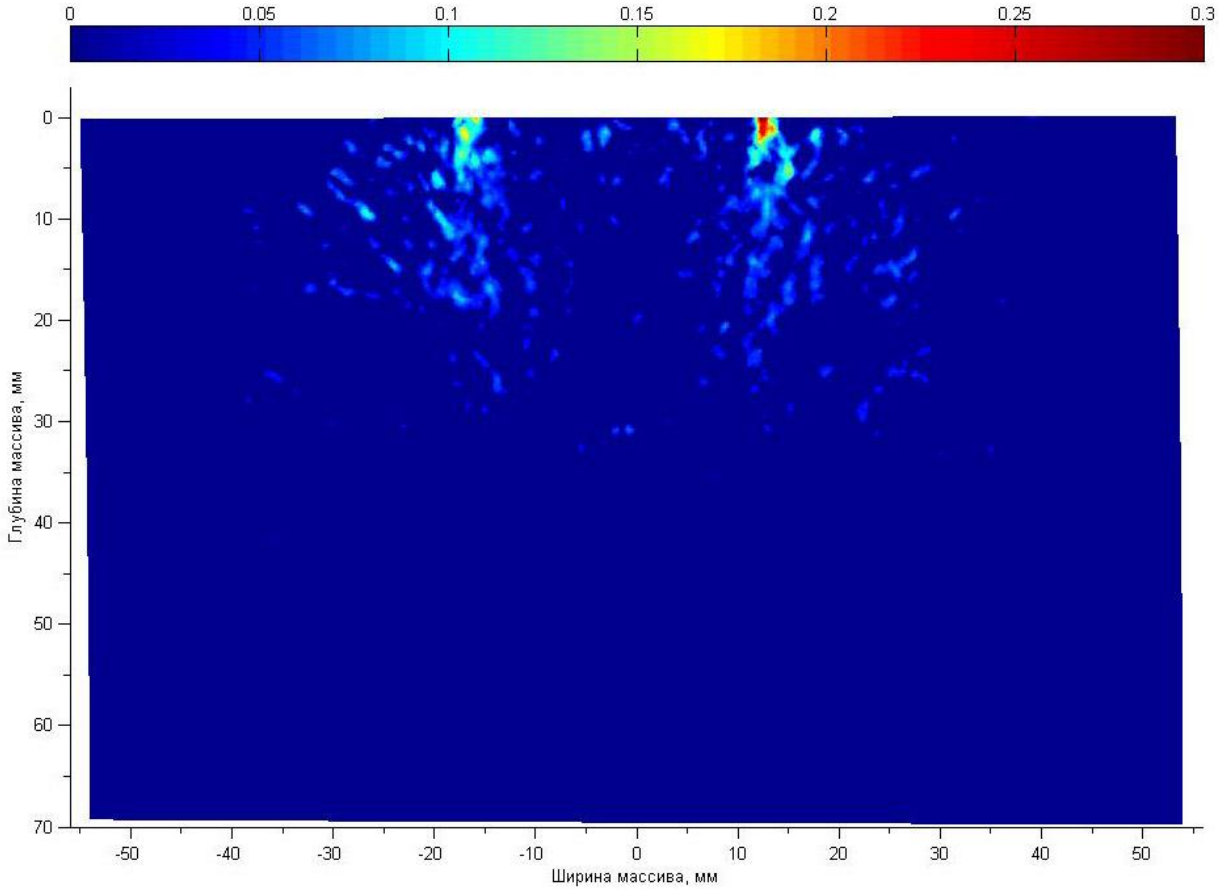

Рис. 9. Изополе деформаций сдвига, точка А

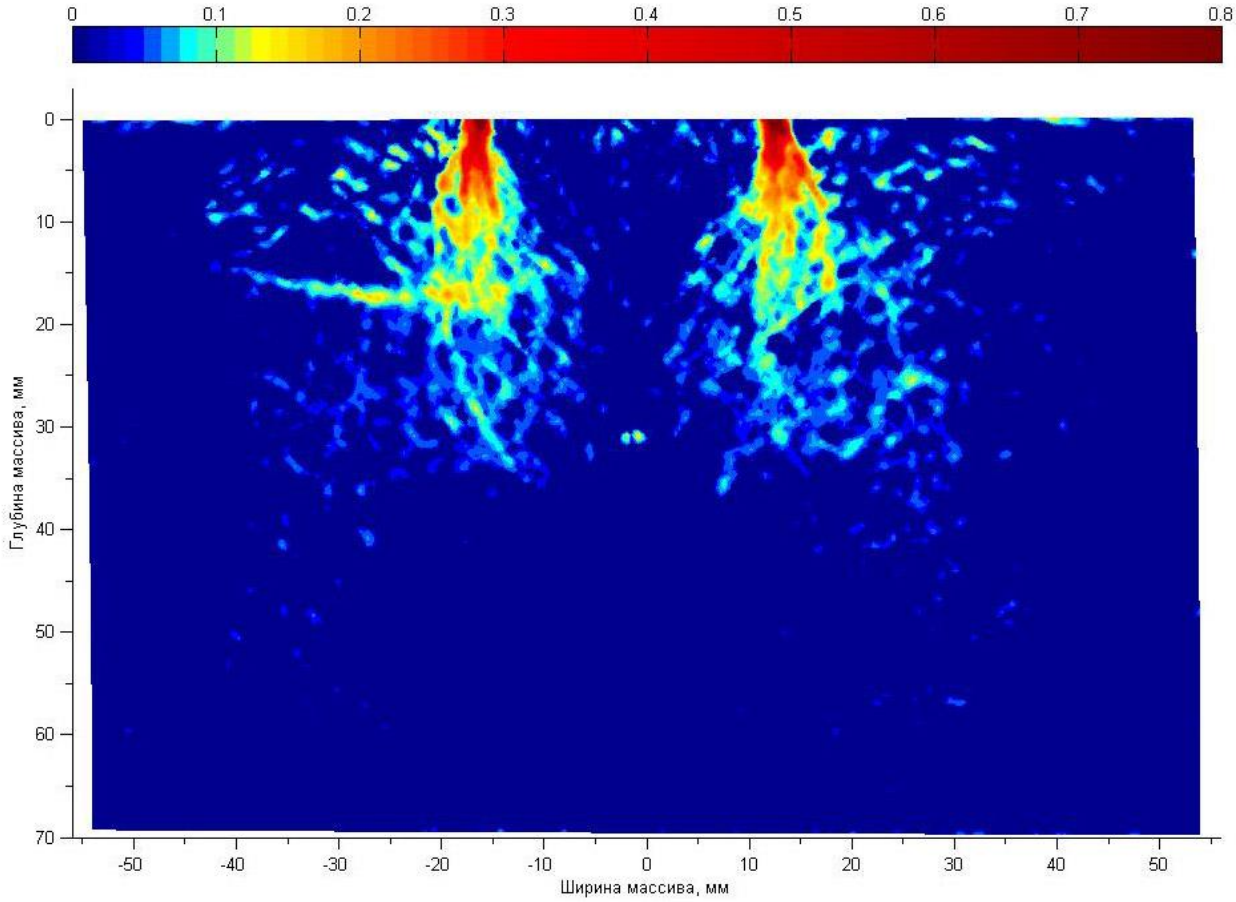

Рис. 11. Изополе деформаций сдвига, точка В

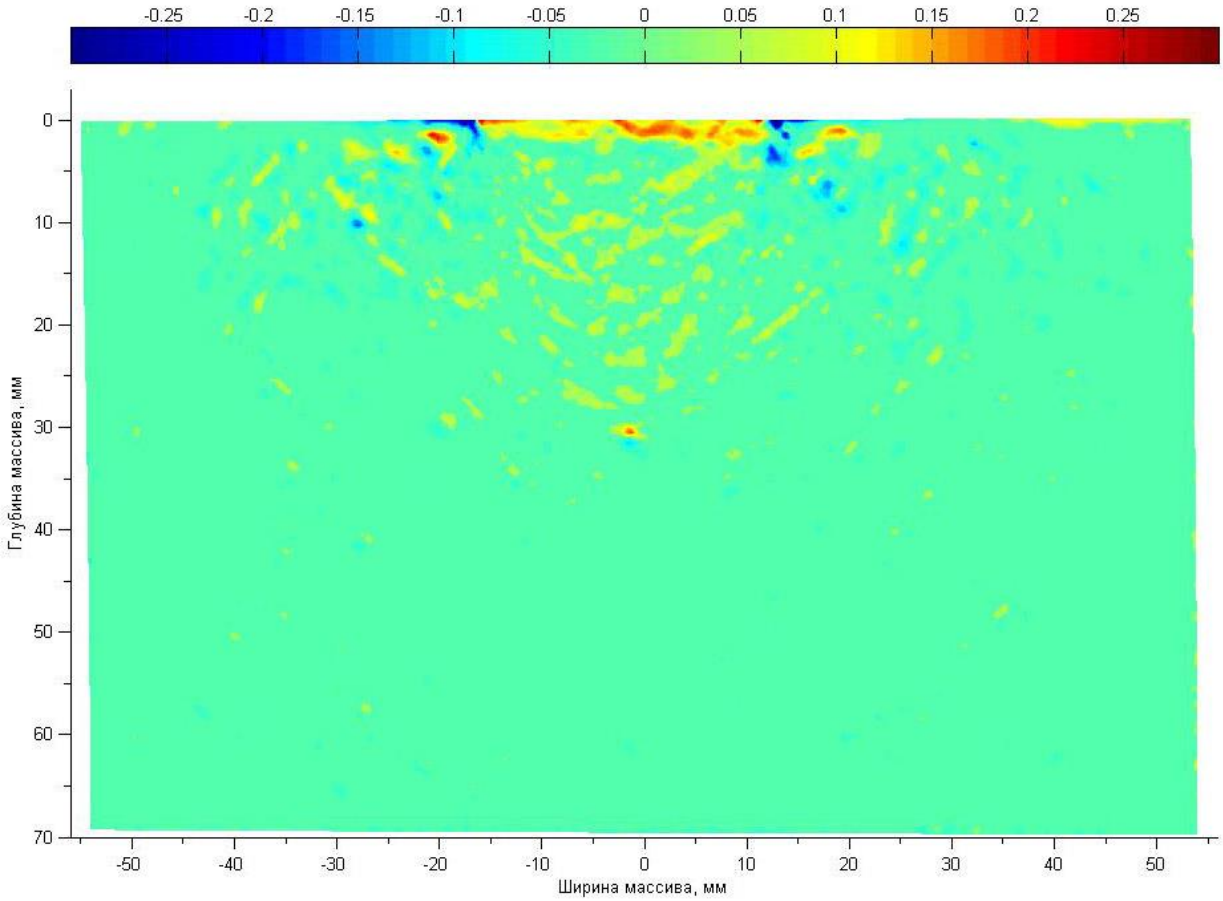

Рис. 12. Изополе деформаций объема, точка В

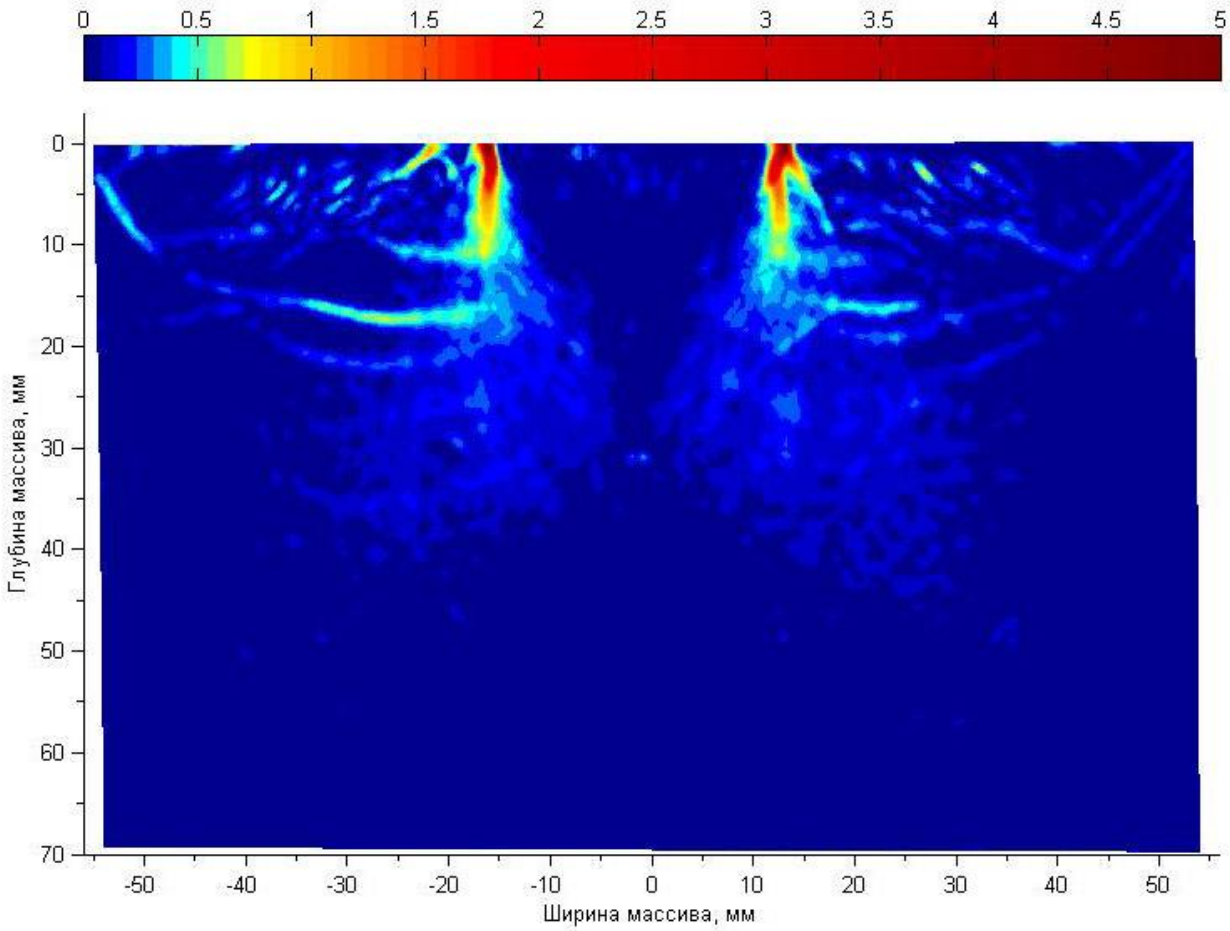

Рис. 13. Изополе деформаций сдвига, точка С

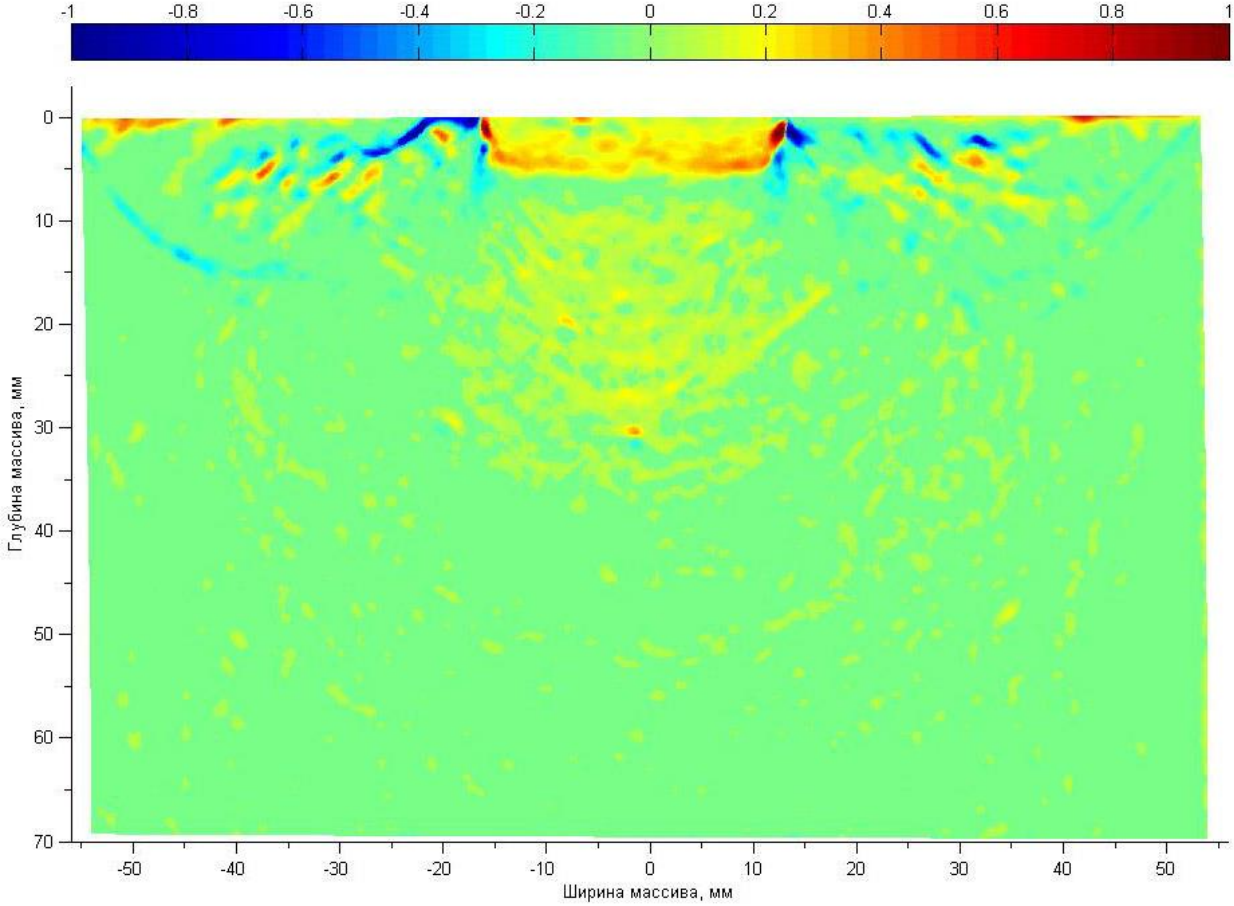

Рис. 14. Изополе деформаций объема, точка С

3. Разработка ПО для метода PIV

Для автоматизации процесса обработки методом PIV с применением последних наработок различных авторов этой области и вывода данных в удобном виде **разрабатывается ToolBox** для программы MatLab. **После завершения разработки его нужно будет переписать на *C Sharp* и получить самостоятельную программу, либо внедрить в состав АСИС. Можно предлагать покупателям лотков, и не только, как новый (для отечественных специалистов) мощный инструмент исследования.**

Для реализации возможностей метода PIV исследователям понадобится лишь фотоаппарат и наша программа.

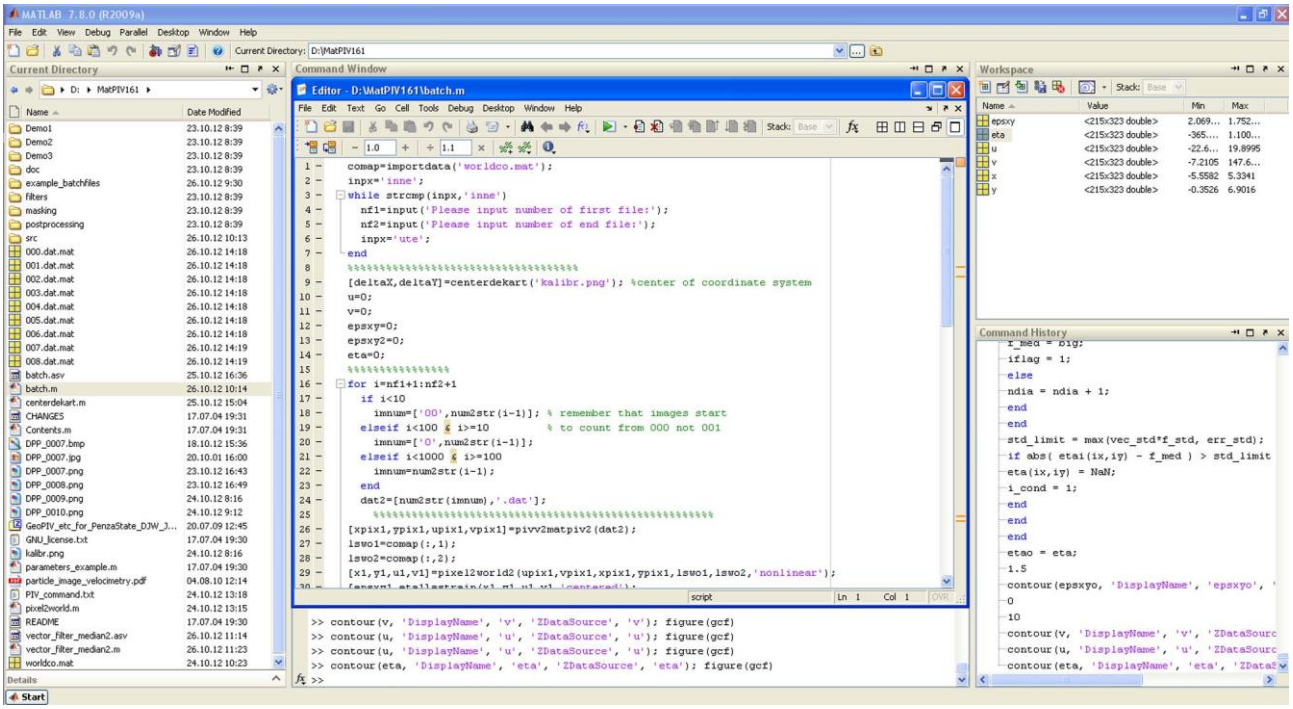

Рис. 8. Среда программирования MatLab

4. Обзор программ *NovoCPT* (Novo Tech Software Ltd, British Columbia, Canada) и *GEOEXPLORER* (ЗАО Геотест, г. Екатеринбург)

NovoCPT

Novo Tech Software Ltd, British Columbia, Canada,

http://www.novotechsoftware.com

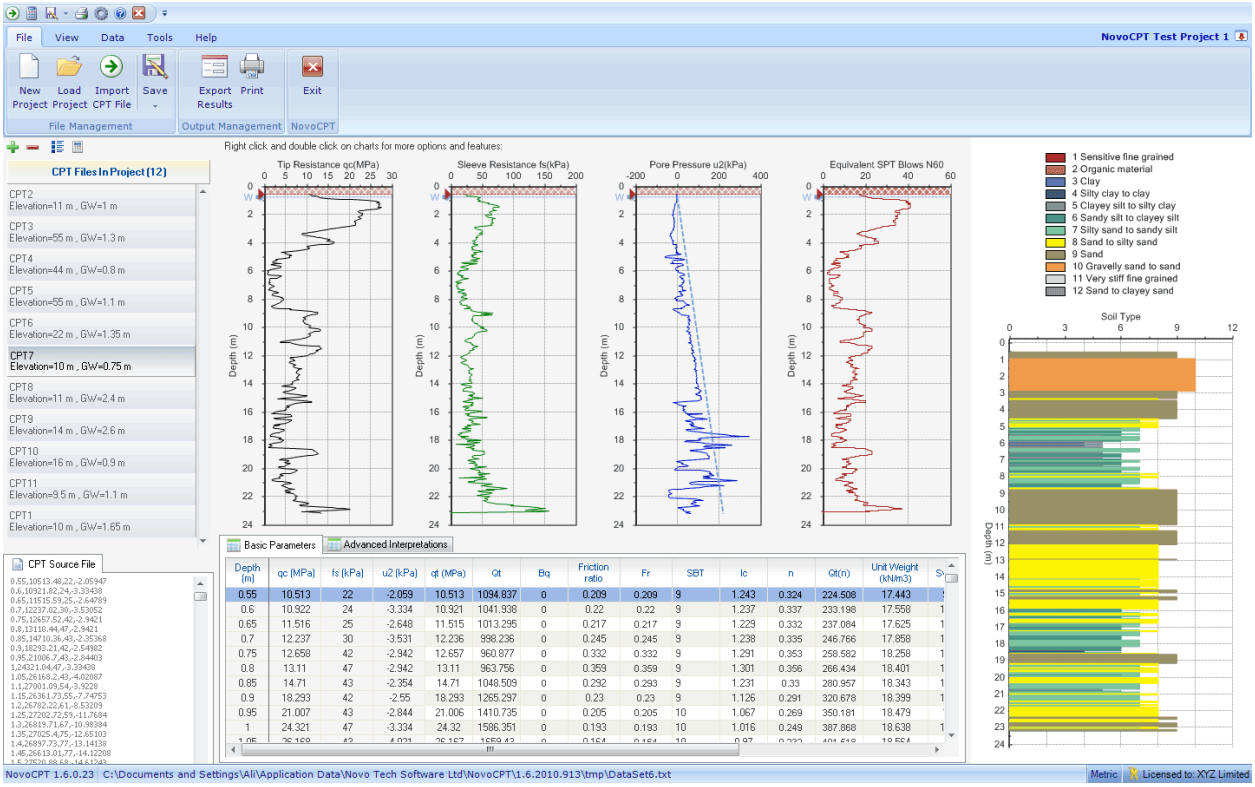

Рис. 9. Главное меню программы

Основные характеристики

Инструменты анализа:

- Несущая способность свай, базируется на методе LCPC
- Оценка разжижаемости грунта (см. рис. 2), в том числе боковое распространение и пост-разжижение и осадка по Zhang and Robertson, 2004
- Анализ упругой осадки / осадки консолидации Анализ несущей способности
- Построение графиков всех параметров грунта по глубине, в том по типам поведения грунта (SBT) на основе:
    1. Robertson, 1986 (12 зон)
    2. Robertson, 1990 (9 зон)
    3. Jefferies и Been, 2006
- Анализ и корреляция более чем 35 параметров грунтов по данным CPT
- Автоматическое определение препятствий (drill-outs) и маркировка их на графиках Расчет осадки консолидации
- Анализ упругой осадки (Schmertmann метод)
- Расширенные возможности отчетности, включая выбор диаграмм для отчета и многое другое ...

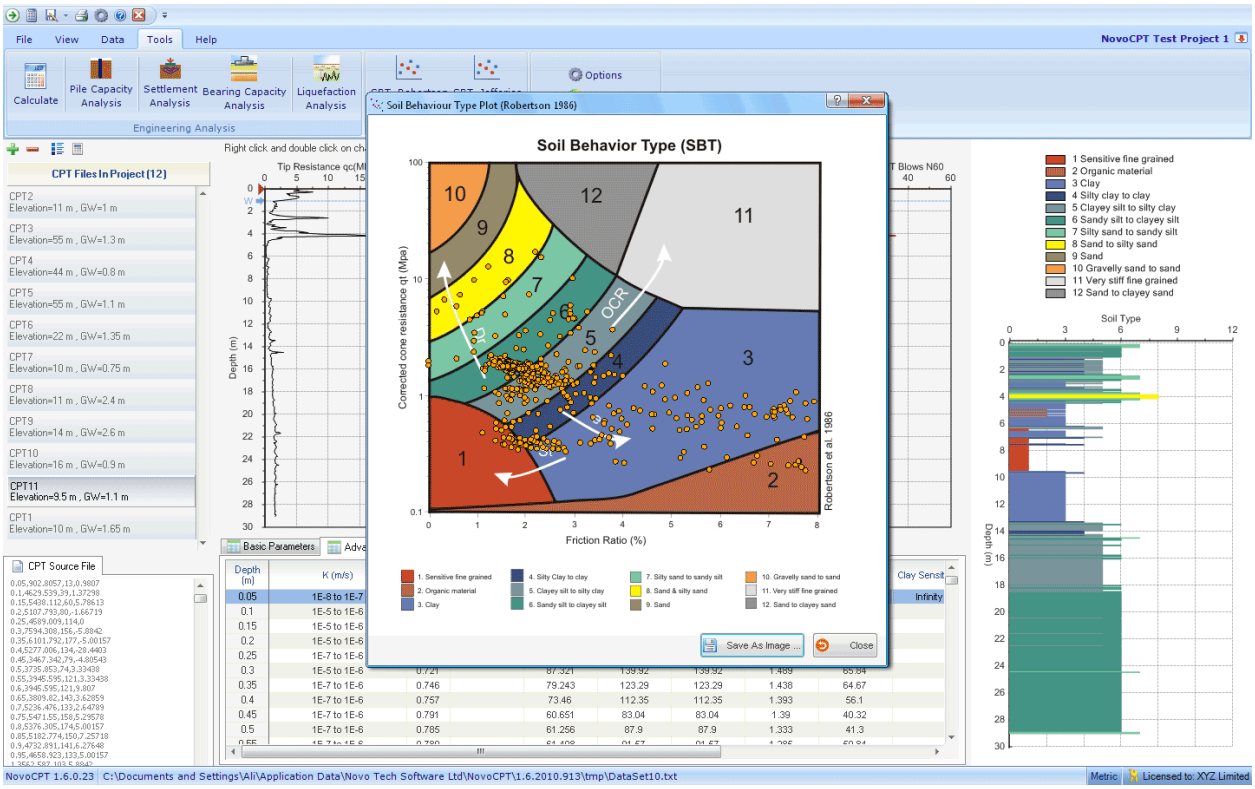

Рис. 10. Определение типа грунта согласно Robertson, 1986 (12 зон)

Особенности оформления:

- Возможность наслоения нескольких графиков, диаграмм на одном рисунке
- Шаблоны диаграмм и графиков
- Возможность пакетной обработки; пользователь может создать проект и добавить несколько файлов CPT для обработки
- Экспорт всех таблиц и графиков в Microsoft Excel, текстовые редакторы, как изображения и т.д.
- Предварительные фирменные настройки, такие как установка более чем 55 методов анализа, включая определение удельного веса по типам грунта и методы корреляции
- Возможности для редактирования первичных (не обработанных) данных CPT и просмотра исходного файла
- Руководство пользователя в формате PDF и файл справки
- Инструмент автоматического обновления, который информирует пользователя о доступности новой версии

Какие характеристики определяются:

- Все основные параметры, включая: Q_t, q_t, Q_{tn}, R_f, f_s, B_q, F_r, G_{max}

q_c – удельное сопротивление грунта под конусом зонда

q_t - корректированное сопротивление конуса, учитывающее поровое давление и некоторые конструктивные

$$q_t = u_2 \times (1 - a)$$

u_2 – поровое давление, измеренное между конусом и муфтой трения

$$a = A_n / A_c$$

A_n – площадь поперечного сечения внутренней части зонда, связанной с конусом, на которой закреплены датчики конуса

A_c – площадь поперечного сечения основания конуса

обычно $a = 0{,}55 \div 0{,}9$ [cone penetration testing geotechnical practice lunne robertson powell]

Q_t – часть силы, расходуемой на преодоление трения между грунтом и поверхностью конуса зонда, безразмерная величина, зависящая от бытовых вертикальных напряжений

$$Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma`_{vo}$$

σ_{vo} – полное природное давление в грунте, аналогично σ_g

$\sigma`_{vo}$ – эффективное природное давление в грунте

Q_{tn} – то же Qt, где показатель напряжения меняется в зависимости от типа грунта

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{P_{a2}}\right) \times \left(\frac{P_a}{\sigma`_{vo}}\right)^n$$

R_f - показатель трения,

$$R_f = \left(\frac{f_s}{q_c}\right) \times 100$$

f_s – удельная сила сопротивления по боковой поверхности

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$$

B_q- параметр порового давления, поровое давление, нормализованное в соответствии с сопротивлением конуса

$$B_q = \Delta u / q_c$$

$$\Delta u = u_2 - u_0$$

u_2 и u_0 - поровое давление, измеряемое соответственно с поверхности конуса и позади конуса

G_{max} – максимальное значение модуля сдвига

- Другие параметры, включая:

Коэффициент фильтрации (Permeability coefficient) K:

Коэффициент фильтрации, K, появляется из закона Дарси (1856), который устанавливает следующее эмпирическое соотношение для потока в водонасыщенных пористых средах:

$$Q = K \times i \times A,$$

где Q - расход воды, объем в единицу времени

i – гидравлический градиент напора,

A - площадь поперечного сечения потока.

Robertson et al. 1986

Недренированное сопротивление грунта срезу (Shear strength) s_u:

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N},$$

где σ_{vo} – природное давление в грунте, аналогично σ_g

N – cone factor, фактор конуса, является коэффициентом, связывающим сопротивление под конусом с сопротивлением грунта срезу

N_c– то же, теоретически в зависимости от применяемой математической модели (практически не используется зарубежными специалистами)

N_k– фактор конуса, определяемый эмпирически на основе сопоставления данных зондирования лабораторными испытаниями по каждому типу грунтов отдельно

N_{kt} – от TSA, stands for Total Stress Analysis, использует недренированную прочность su при решении проблем стабильности и прочности грунтов

N_{ke} – от ESA, stands for Effective Stress Analysis, использует для решения тех же проблем эффективный угол внутреннего трения φ', [1]

Большинство исследователей не привязывает s_u, в отличие от τ_g, к природному давлению

Чувствительность глин S_t:

Robertson and Campanella 1988

Rad and Lunne 1986

Schmertmann

Под чувствительностью глин понимается степень, в которой будет снижаться недренированная прочность на сдвиг, если грунт будет подвергаться любым воздействиям, вызывающим изменение формы/объема. Чем выше чувствительность, тем больше потеря прочности.

Недренированный модуль упругости для глин E_u:

Duncan and Buchihmami 1976

Модуль упругости для песков E_s:

Bellotti et al. 1989

Угол внутреннего трения песков φ:

Kulhawy and Mayne 1990

Hatanaka and Uchida 1996

Robertson and Campanella 1983

Sunneset et al. 1989

Mayne 2005

Фактор корректировки глубины (Depth correction factor) R_d:

Seed and Idriss 1971 (линейная функция трех переменных)

Показатель типа грунта I_c:

$$I_c = [(3{,}47 - \log Q_m)^2 + (\log F_r + 1{,}22)^2]^{0{,}5},$$

где $F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\%$,

$Q = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_a} \times (\frac{P_a}{\sigma`_{vo}})^n$,

n = 1 для глинистых грунтов, формула может корректироваться в зависимости от полученного значения I_c.

Определение I_c позволяет отнести грунт к определенной категории

Robertson 1990

Аналог одометрического модуля деформации (Constrained modulus) M:

Robertson 2009

$M = 1/m_v = \delta\sigma_v/\delta\varepsilon$

m_v – эквивалентный одометрический коэффициент сжимаемости

По результатам CPT M может быть определён с использованием эмпирической зависимости:

$M = \alpha_m \times (q_t - \sigma_{vo})$

Robertson 2009 предложил зависимость α_m от показателя типа грунта I_c

Equivalent SPT $N_{1(60)}$:

Характеризует энергетическую эффективность CPT системы. Обычно выражается как «коэффициент энергии стержня» (ER_r). Величина этого коэффициента 60% принята в качестве эталонного значения, который представляет собой приблизительную среднюю историческую энергию CPT ???.

Jefferies and Davis 1993

Коэффициент переуплотнения (Overconsolidation ratio) OCR:

OCR определяется как отношение максимального в прошлом напряжения от собственного веса грунта σ'_p к текущему бытовому напряжению σ'_{vo} [3]:

$OCR = \sigma'_p / \sigma'_{vo}$

Различные формулы у авторов для вычисления для разных моделей, типов зондов:

Powel et al. 1998

Lunne et al. 1989

Mayne 2005

Индекс плотности (Sand relative density) D_r:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

Различные формулы у авторов.(http://www.bbri.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=9_TC211_HK_HAMIDI.pdf&lang=en)

Jamiolkowski et al. 1985

Baldi et al. 1986

Tatsuoka 1990

Скорость поперечной волны (Shear wave velocity) V_s:

Mayne 2006c (all soils)

Hegazy and Mayne 1995 (all soils)

Baldi 1989 (sands) and Mayne and Rix 1995 (clays)

Содержание мелких (глинистых) частиц (Fines content) FC:

Robertson and Fear 1995 (FC=1.75*IC3-3.7)

Коэффициент пористости (Void ratio) e:

$$e = 1{,}152 - 0{,}233 \times \log q_{c1} + 0{,}043 \times \log OCR$$

Масштабный фактор (Magnitude scaling factor) MSF:

Robertson 2009

Удельный вес (Unit weight) γ:

Robertson et al. 1986

Коэффициент бокового давления для глины (Clay at-rest earth pressure) K_0:
Kulhawy and Mayne 1990

Коэффициент бокового давления для песка (Sand at-rest earth pressure) K_0:
Kulhawy and Mayne 1990

В комплекте программ от *Novo Tech* есть еще

VisLog

Это компьютерная программа для 3D-моделирования основания по результатам CPT. В модели могут быть отображены необходимые результаты CPT. Вычерчивание профилей происходит простым перетаскиванием скважин. Несколько различных настроек для группировки грунтов и стилей отображения. Возможности:

• Получение 3D-модели основания
• Простое масштабирование, поворот и панорамирование
• Поддержка прозрачности каждого слоя данных
• Импорт файлов в формате gINT
• Экспорт в изображения и файлы DXF
• Автоматическая генерация профилей
• Помимо скважин, отображение результатов полевых испытаний
• Изображение контурных карт (изолиний) для каждого параметра в разрезе: уровень подземных вод, координаты и т.д.

GEOEXPLORER

ЗАО Геотест, г. Екатеринбург, http://geotest.ural.ru/

Специалистами ЗАО Геотест разработана программа обработки данных статического зондирования грунтов, полученных при использовании оборудования компании — ТЕСТ-К4, ТЕСТ-К2-250 и ТЕСТ-АМ-250. Данная программа позволяет строить графики зондирования, разделять грунты по виду и состоянию, оценивать нормативные значения прочностных характеристик и модуль деформации, а также выделять ИГЭ (инженерно-геологические элементы) и получить для них расчётные значения характеристик, строить геологические разрезы скважин в точках зондирования и рассчитывать частные значения предельного сопротивления забивных и буровых висячих свай.

Основу программы составляют следующие нормативные документы: СП II-105-97 (ч. 1) «Инженерно-геологические изыскания для строительства», ГОСТ 20522-96 «Методы статистической обработки результатов испытаний», СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты», СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов, МГСН 2.07-97 «Московские городские строительные нормы. Основания, фундаменты и подземные сооружения».

При обработке результатов программа позволяет построить графики зондирования, разделить грунты по виду и состоянию, оценить нормативные значения прочностных характеристик и модуль деформации. Выделить ИГЭ и получить для них расчетные значения характеристик, построить геологический разрез скважины в точке зондирования и рассчитать частные значения предельного сопротивления забивных и буровых висячих свай.

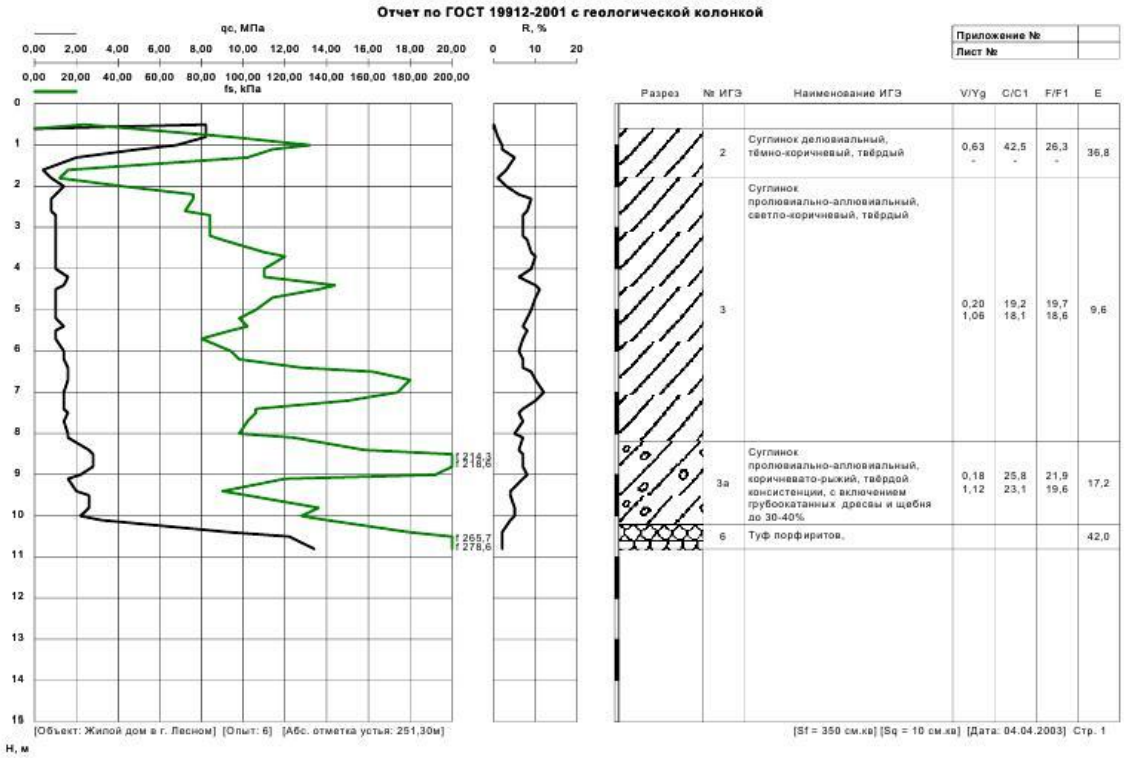

Рис. 11. Отчет с геологической колонкой

При обработке результатов для объекта можно построить геологический разрез площадки по результатам зондирования, получить сводную таблицу нормативных и расчетных характеристик ИГЭ и рассчитать несущую способность забивных и буровых свай.

После обработки и разбиения на ИГЭ всех точек зондирования на данном Объекте, возможна генерация Сводной таблицы физико-механических характеристик грунтов,

таблицы нормативных и расчетных характеристик ИГЭ и таблицы несущей способности свай по объекту. Табличные отчеты могут сохраняться в различных форматах: MS Excel, Adobe PDF, XML, EMF, JPEG и др.

В заключение можно подчеркнуть, что программа Geoexplorer предназначена только для обработки данных зондирования и не учитывает результаты лабораторных определений свойств грунтов, поэтому часто имеет место расхождения результатов, полученных разными методами, так как таблицы СП II-105-97 предложены к использованию на всей территории РФ и не могут учесть особенности грунтов в разных регионах. Программа не выполняет построение полноценных геологических разрезов, поскольку основывается только на данных зондирования. Но в то же время позволяет точно установить границы ИГЭ в пределах площадки и увязать результаты зондирования с бурением и лабораторными определениями вида грунта.

Примеры отчетов можно увидеть на http://geotest.ural.ru/s_geoex.htm.

CPeT-IT

GeoLogismiki, http://www.geologismiki.gr/Products/CPeT-IT.html

CPeT-IT простой в использовании, но подробный, детализированный пакет программного обеспечения для интерпретации CPTU данных. CPeT-IT является результатом совместных усилий с Gregg Drilling Inc. и профессора Peter Robertson, соавтор всеобъемлющего трудов по CPT.

CPeT-IT выполняет основные интерпретации типов грунтов (в терминологии SBT) и других геотехнических параметров с использованием текущих опубликованные корреляции на основе работы Lunne, Robertson и Powell (1997), а также последние обновления профессора Robertson.

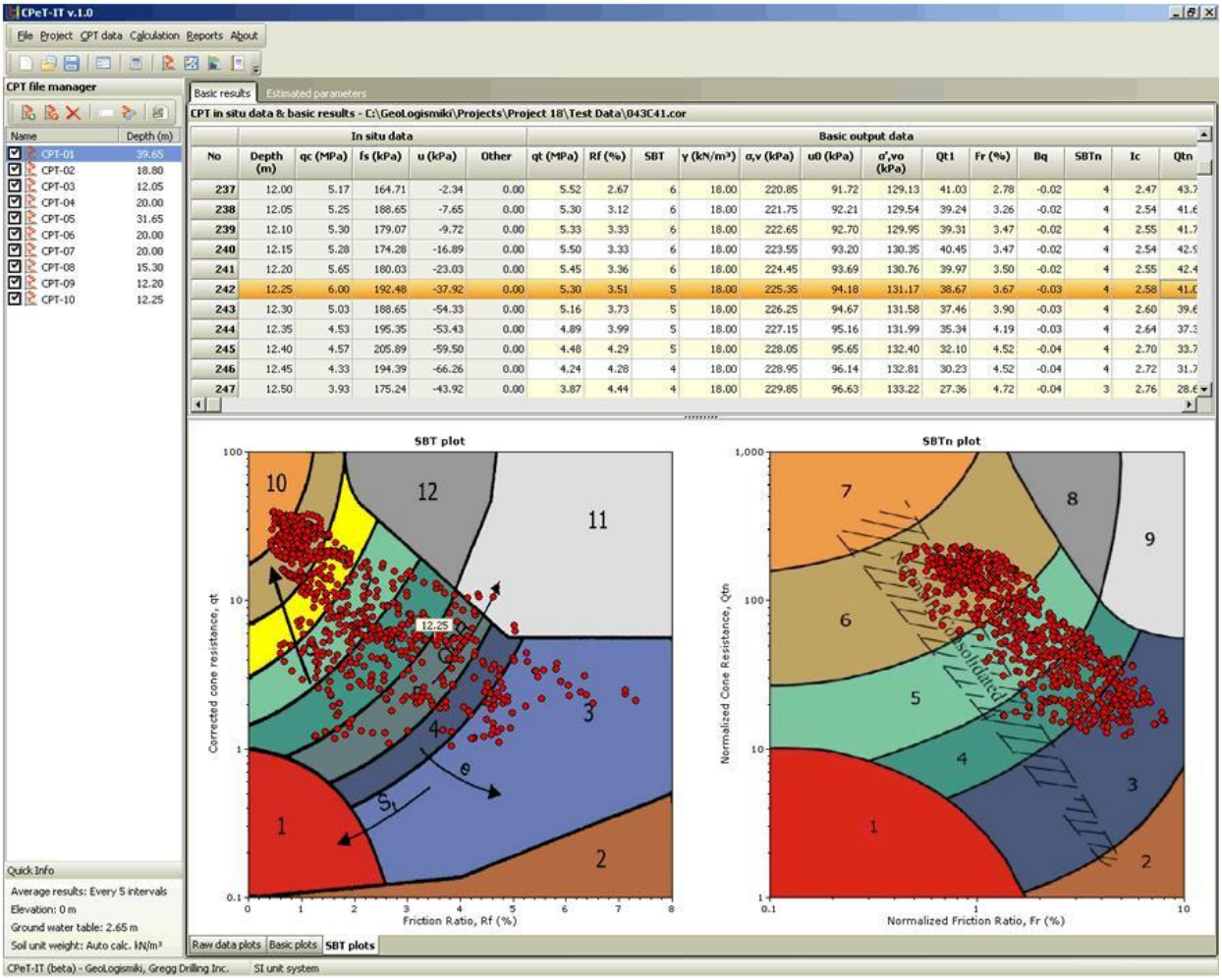

Рис. 12. Программа CPeT-IT

Основные характеристики:

- Импорт CPTU данных из любого текстового файла (формата ASCII)
- Поддержка ввода и вывода информации в системе СИ и в Британской
- интерпретации на основе всеобъемлющего обзора Lunne, Робертсон и Powell (1997)
- Табличное представление всех результатов интерпретации
- Графическое представление всех результатов интерпретации
- Аналитические отчеты по каждому уровню интерпретации
- Поддержка прозрачности каждого слоя данных CPTU
- Модуль интерпретации данных рассеивания порового давления
- Подсчет несущей способности одиночной сваи
- одну кучу расчета несущей способности
- генерация 2D разрезов

Есть встроенный конвертер из GeoExplorer, Hogentogler, Geotech/Geoprobe в формат в удобный для программы CPeT-IT формат.

Вывод.

На зарубежном рынке присутствует множество пакетов программ для обработ результатов CPT. Их производят компании занимающиеся как собственно выпуском своего собственного оборудования для зондирования, так и компании, специализирующиеся на выпуске ПО для геотехники. Существенных различий между программами нет. Среди лучших/самых распространенных NovoCPT, CPeT-IT, Geotech/Geoprobe, отечественный GeoExplorer.

Список литературы.

1. Marciano R. CPT Guide, 4-th ed. - 2010
2. Пылаев Е., Пылаев Д. Geoexplorer для обработки результатов статического зондирования грунтов / Инженерные изыскания. – 2008, С. 52-54.
3. Болдырев Г.Г. Испытания грунтов методами пенетрации. Часть II / Инженерные изыскания – 2010, С. 30-42.
4. http://www.novotechsoftware.com/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=139.