

РАЗРАБОТВАНЕ НА ОПИТНА ПОСТАНОВКА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ПАРАМЕТРИ, ОПИСВАЩИ ДЕФОРМАЦИОННОТО ПОВЕДЕНИЕ НА СТРОИТЕЛНИ ПОЧВИ.

Н. Керенчев¹

Ключови думи: компресионен апарат, одометър, АЦП, LVDT

Научна област: земна механика

РЕЗЮМЕ

Компресионните опити са често използвани методи за определяне на деформационните параметри на строителните почви. Въпреки наличието на по-нови и съвременни методи за определяне на тези параметри, компресионните апарати (одометри) остават едни от най-евтините и разпространени в практиката. Оптимизирането на тези апарати често води до много по-точно определяне не само на деформационните, а и на филтрационните свойства на почвите. В статията се описва процедура за оптимизация и модернизация на съществуваща установка за одометрични тестове. Разглеждат се сензорите за отчитане на основни и второстепенни физични параметри, както и процесът на дигитализиране с непрекъснат запис. Описват се основните външни смущения и методи за отстраняването им. Предлагат се методи за механична и температурна калибровка на апаратурата.

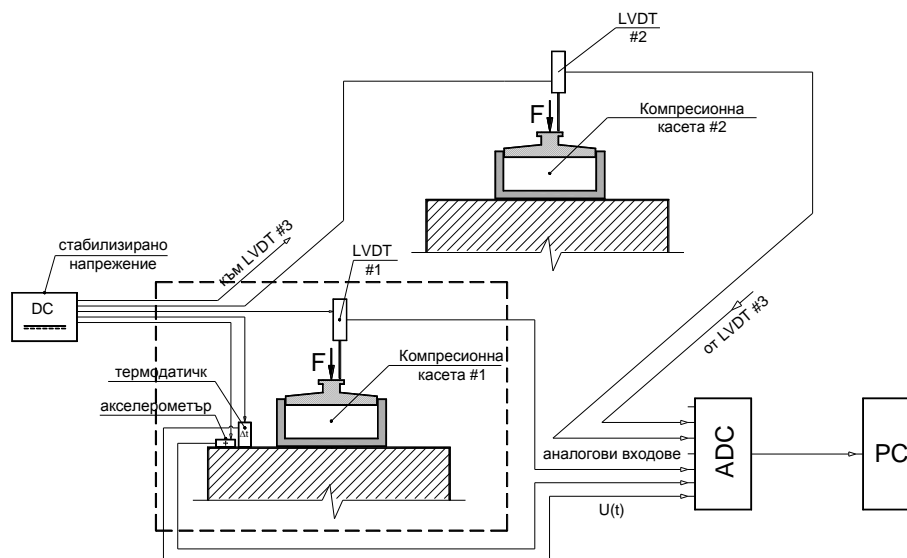
1. Въведение и принципно решение

При стандартните одометри (компресионни апарати) се изпитва цилиндричен почвен образец в условията на забранени напречни деформации ($\sigma_x = \sigma_y = 0$). Филтрацията на водата и разсейването на порния натиск (u) се допуска в двата края на образеца, като това обуславя и граничните условия в аналитичния модел. Наличните в лабораторията по земна механика одометри, са оборудвани със стандартни индикаторни часовници с директна точност 0,002 mm (съгласно изискванията на БДС EN-ISO 17892-5) и два типа компресионни касети – за одометрично изпитване с

¹ Николай Керенчев, асистент, инж., кат. „Геотехника”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски 1”, 1046 София, kerenchev@hotmail.com

диаметър 75 mm без уплътнения и без възможност за измерване на порен натиск, и такива с диаметър 35 mm – за консолидационен тест, позволяващи отчитането на възникващия порен натиск [1].

За нуждите на изследване на деформационните параметри на почвите тази инструментална осигуреност не е задоволителна, поради което е изготвена концепция за усъвършенстване и автоматизация на наличните уреди, за да бъдат пригодени за дълготрайни изпитвания, отчитащи допълнителни показатели на средата (температура, кинематични смущения). Основният недостатък е, невъзможността отчитането на деформациите да става непрекъснато с малък интервал на дискретизация. Компресионните изпитвания отнемат значително време (седмици и месеци) и изискват непрекъснато и често отчитане на слягането на изпитваните образци. Затова и разработената концепция включва индуктивни датчици за преместване от типа LVDT, заменящи индикаторните часовници, плюс съпътстващото им закрепване, захранване, АЦП блок и компютърна конфигурация за снемане и запис на данните.



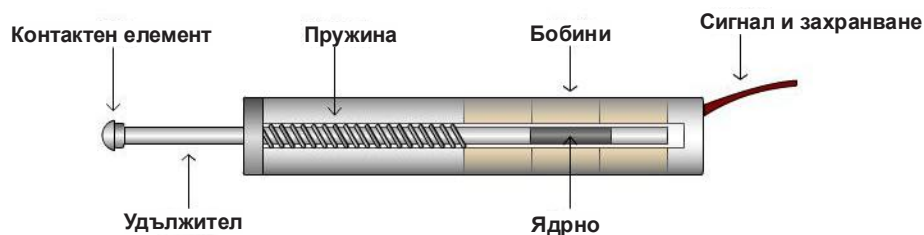
Фиг. 1. Принцилна схема на опитната постановка

2. Основни датчици за преобразуване на параметрите

Поради необходимостта, физичните параметри, като преместване, температура, кинематични смущения и др. да бъдат непрекъснато представени в електронен запис, е необходимо, първо сигналът от „физически“ да бъде преобразуван в електричен. Най-модерният подход в областта е използването на датчици, позволяващи директното преобразуване на изменението на физичната величина (Δx) в изменение на напрежението (ΔU).

- **Индуктивни датчици за преместване (LVDT)**

При разработването на опитната постановка са използвани два броя датчици за преместване, производство на Measurement Specialties (MEAS), с общ работен ход ± 25 mm и директна точност 800 mV/mm [2]. За разлика от по-разпространените модели, тези датчици дават изход по напрежение (DC) и не изискват мостове, операционни усилватели, сигнал-генератори и блокове за управление, тъй като всички тези елементи са вградени в самия датчик като електронни елементи. Единственото изискване е подаването на стабилизирано захранване (постоянно напрежение) от $\pm 15V$. Тази конфигурация спестява нуждата от скъпо оборудване за трансформация на сигнала при записа.



Фиг 1. Принципна схема на индуктивен датчик за преместване

Всеки един от датчиците разполага със собствена калибрираща скала, която дава информация и за линейността на изходното напрежение спрямо преместването. В случая датчиците имат коефициент на нелинейност под 0,8%.

- **Термодатчик**

Поради установеното драстично влияние на температурата при отчитането на резултатите, е необходимо въвеждането на непрекъснато измерване и на температурните флукуации в помещението. В опитната постановка се използва нискобюджетен температурен датчик с директна точност до $\pm 1^\circ C$, който при подаване на постоянно (стабилизирано) захранване от +3.3V постига линейна грешка до 0.5% в работната си зона от 0 до 100 $^\circ C$. Датчици от този тип дават особено задоволителни резултати, когато търсената величина е изменението на температурата (ΔT), а не самата абсолютна температура T $^\circ C$.

- **Акселерометър**

Дълготрайността на опитите, които описват както деформационните, така и реологичните явления в почвите, изисква особен контрол за надеждност на резултатите. Вибрации породени от външни явления или случаен досег на лаборант с апарата биват лесно установени посредством акселерометър. За целта се използва нискобюджетен триаксиален (X, Y, Z) сензор за ускорение. Разпространените сензори от този тип най-често отчитат ускорения до десет пъти земното ускорение (10g). В конкретният случай е използван датчик, който поддържа 2 обхвата 1.5g и 6g. Захранването на датчика отново е с постоянно стабилизирано напрежение +3V, а изходът е напрежение, което е линейна функцията на отчетеното ускорение. Важно е да се отбележи, че датчици от този тип изискват специална калибровка и не са практични за *in situ* тестове.

3. Закрепване и помощна апаратура.

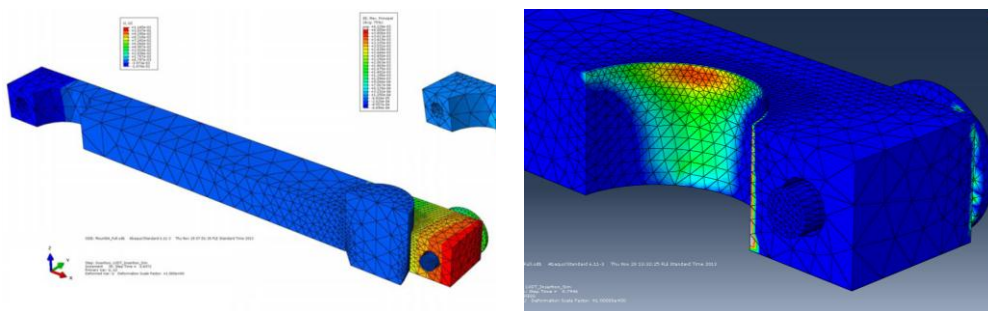
В хода на разработване на опитната установка се наложи проектирането и изработването по поръчка на специални детайли за закрепване на датчиците за преместване (LVDT), поради това че предлаганите от производителя закрепващи елементи не отговарят на конкретната опитна постановка. Изборът на материал се диктува от естеството на работа на LVDT датчиците – немагнитен, непроводим и със сравнително нисък еластичен модул за избягване на нарушаване целостта на датчика. Като материал за изработката беше избран полипропилен кополимер (PP Copolymer) на листове (плочи) с дебелина $t = 10,2 \text{ mm}$.

Проектирането на детайла се състои в разработване на концепция, проучване на различни варианти, които гарантират:

- пренебрежимо малка собствена деформируемост;
- относителни деформации под 0,5% навсякъде в детайла за избягване на пълзене на полимера (полипропиленът показва изразено пълзене при деформации над 0,5-1%);
- сравнително малко влияние на температурното разширение;
- лесен и сигурен механизъм на закрепване;
- форма постижима за изработка с конвенционална триосна ЦПУ фреза.

• Пространствен модел на закрепващ елемент. Контакт.

Разработен е пространствен цифров модел, който служи за основа за програмиране на фреза с компютърно управление. Подобна фреза позволява изпълнението на детайла с точност $\pm 0.1 \text{ mm}$, което предопределя и необходимостта от числено изследване на механичното поведение на детайла. Същият пространствен модел се използва и за числените симулации за доказване на посочените по-горе качества. Елемент от нелинейния анализ, отчитащ контакта и съединенията, както и нормалното напрежение по вътрешния контур (действащо върху корпуса на LVDT-то) са показани на фиг. 3.

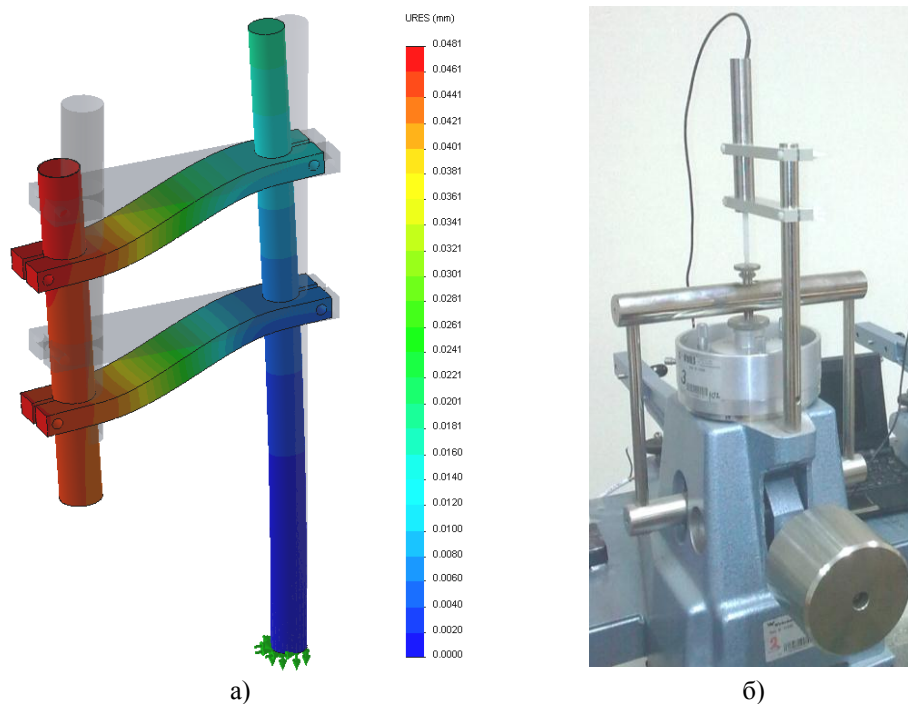


Фиг. 3. Пространствен модел - решение на контактна задача

Отчетеното натоварване върху корпуса на LVDT-то е в допустими граници (максимално нормално напрежение 2 МПа) и няма да наруши работата на датчика. Същевременно макар невисокия коефициент на триене между стоманата и полипропилена (0.4 - стойност приета по литературни данни [3]), тази контактна сила

е достатъчна, да задържи датчика в установената позиция дори при големи външни въздействия.

За пълната сглобка на закрепването на LVDT датчика е направено изследване за провисване от собствено тегло и външно влияние на температурата. На графиката на фиг. 4а са показани начално положение и деформациите от собствено тегло на системата. Провисването в оста на датчика е 0,048 mm, а отклонението на самата ос от вертикалното положение е 0,00065 rad. На фиг. 4б е показана практически изпълнената постановка на закрепване.



Фиг. 4 – Закрепване на датчика за преместване – а) деформации от собствено тегло на системата – числен модел; б) практическо изпълнение и опитна постановка.

• **Захранване и окабеляване.**

Особено внимание трябва да се обърне на стабилизираното захранване на всички сензори. Датчиците за преместване се нуждаят от $\pm 15V$ стабилизирано напрежение. В опитната постановка то се осигурява от 2 еднакви стабилизирани електронни токоизправителя. Измереното отклонение на напрежението в тях от 0,1V, не повлиява отчетите на датчици, поради това че разполагат и със собствен стабилизатор, вграден в корпуса. Поради ниската консумация (до 100 mA), захранването на другите елементи става посредством подаване на постоянно напрежение от АЦП-то. То поддържа стабилизирано захранващо напрежение от 0 до 5V, при консумация до 200mA, а самото АЦЦ се захранва от компютър през USB порт.

Поради ниското напрежение на изходните сигнали и ниската консумация на енергия е необходимо, кабелите, които пренасят полезен сигнал (измервана величина -

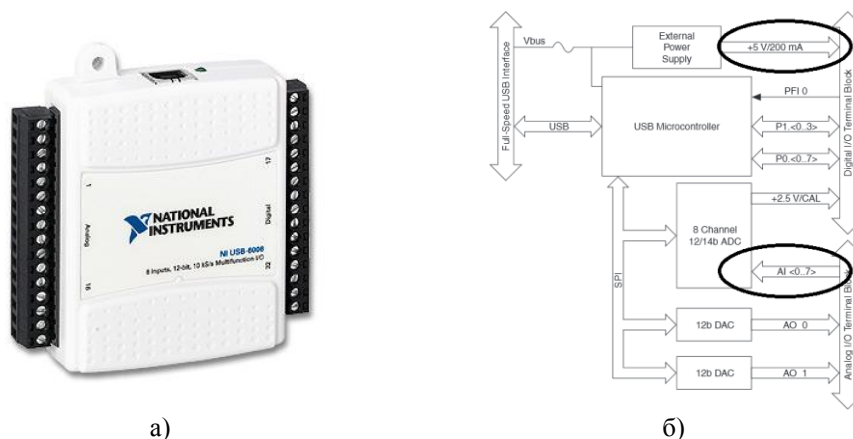
ΔU) да бъдат екранирани и замасени. Дължината им не надвишава 2m, като е избегнат директен контакт с източници на аналогов шум. Особено влияние имат дължината на кабела и външния шум при датчика за ускорение.

4. Аналогово-цифров преобразувател и софтуерно обезпечаване

След като изменението на физичната величина (Δx) вече е преминало в изменение на напрежението (ΔU), е необходимо поминаване от аналогов в цифров сигнал и запис на самото изменение във времето. Това се извършва от аналогово-цифров преобразувател със софтуер за запис и обработка на цифровите данни.

- **Аналогово-цифров преобразувател (АЦП, ADC)**

В опитната постановка е използван АЦП, производство на National Instruments – базов модел, отговарящ на изискванията за нива на квантуване (14-bit) и честота на дискретизация (48 kS/s) – USB 6009 (фиг. 5а), като USB интерфейсът гарантира вариативност и мобилност на компютърната система. Броят аналогови входни канали е 8, като при използване на диференциален режим (значително по-точен) те са 4. Опитната постановка използва основно аналоговите входове и захранването на АЦП (фиг. 5б).



Фиг. 5 – Аналоговоцифров преобразувател - NI USB-6009 външен изглед и блок схема [4]

- **Софтуер за преобразуване и запис**

Прилежащият софтуер за комуникация на USB-6009 - DAQmx (дистрибуция на National Instruments) предлага стандартизиран набор на функции и подпрограми за управление на устройствата на НИ чрез драйвер на ниско ниво. Функциите са капсуловани в DLL интерфейс, който се свързва динамично с потребителската програмата по време на изпълнението и. Използваният потребителски софтуер е разработен на база на отворен код и използва многонишков модел (използване на всички налични процесори) за разделяне на товара при запис и обработка на данните.

Това създава възможност сигналът да бъде записан и обработван в реално време без загуби (освен тези дължащи се на хардуерна неизправност).

За намаляване количеството на записаните данни и подобряване на сигнала е предвиден и модул за блоково осредняване – сигналът се разделя на интервали, като за всеки интервал се изчисляват:

- минималната, максималната и средноаритметичната стойност (S_{min} , S_{max} , $\langle S \rangle$);
- стандартното отклонение (σ) и коефициента на вариация (c_v);
- линейна регресия – $ax + b$.

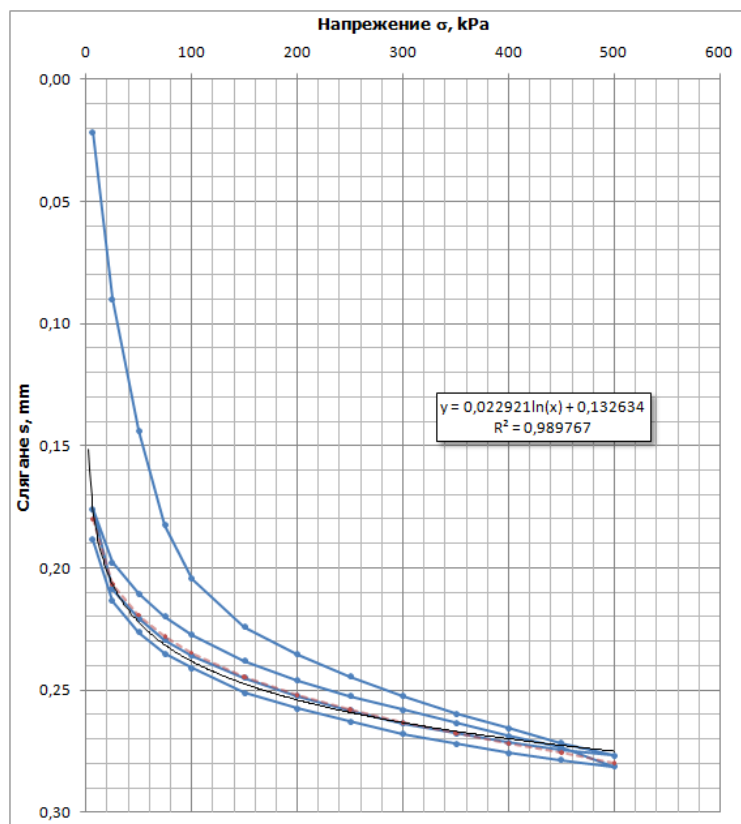
По този начин може да се приложи метод на записване с по-висока от необходимата честота (oversampling), съответно и по-висока точност на резултатите, тъй като осредняването намалява статистическата грешка от случайни вариации (шумове) в сигнала. В конкретният случай при запис с честота на дискретизация 6 kHz и осредняване на блокове по 60 стойности (семпли) директната точност (минималната регистрируема разлика в позицията) на датчиците е в порядъка на 0,00050 – 0,00075 mm, което се потвърждава и от стандартното отклонение на осреднявания интервал.

5. Калибриране на апаратурата

С оглед получаване на достатъчно точна информация за деформационното поведение на свързаните почви, е необходимо, да се отчетат и прецизират несъвършенствата както на измервателната система, така и на средата, в която се извършват лабораторните опити. Основни параметри на измервателната установка, влияещи върху резултатите са механичната деформативност на системата и температурното влияние на околната среда. Второстепенни фактори, чиито влияния също могат да бъдат отчетени, а получените резултати коригирани, са външни кинематични въздействия, нелинейност в скалите на датчиците, несъвършенства в захранването, външни електромагнитни смущения.

• Деформативност на системата от лостове и съпътстващи елементи

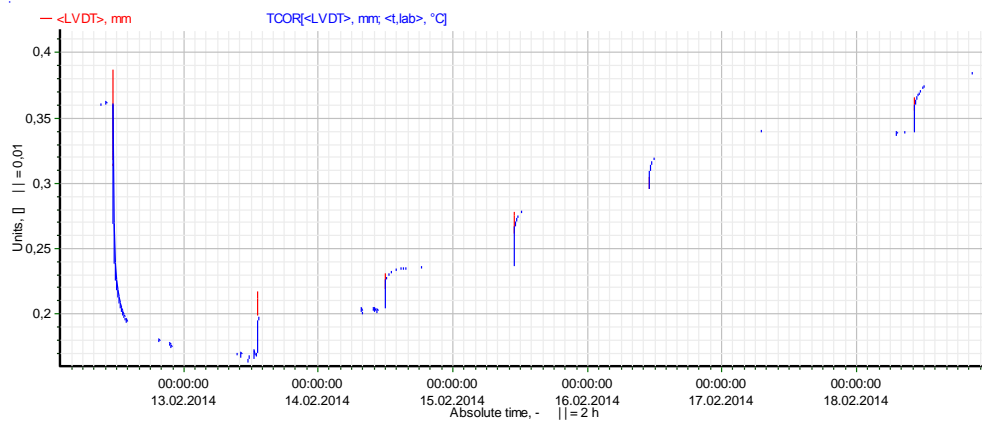
При стандартния компресионен опит (одометър) деформативността на самите елементи, от които е изграден уредът, е различна. Стоманата практически не се деформира, при натоварванията постигани в компресионната касета, същото не се отнася обаче за връзките между отделните стоманени елементи като втулки и винтове. Допълнително съществува деформация на порьозните (филтрационни) плочки под и над самата почвена проба. Тъй като не може количествено да бъде оценена деформативността на всеки елемент и всяка връзка по отделно, се използва практически подход за общо механичното калибриране. Методът заимстван от Рурския университет в Бохум, включва измерване на деформациите на почвата при нормален опит, след разграждане на който, следва повторно натоварване на системата при съблюдаване на същите стъпки. Резултатите от повторното натоварване (на празен ход) се изваждат от натоварването на пробата, така че влиянието на деформативността на целия апарат да не влияе на отчетените деформационните параметри на почвата. Фигура 6 показва резултати от натоварване на „празен ход“.



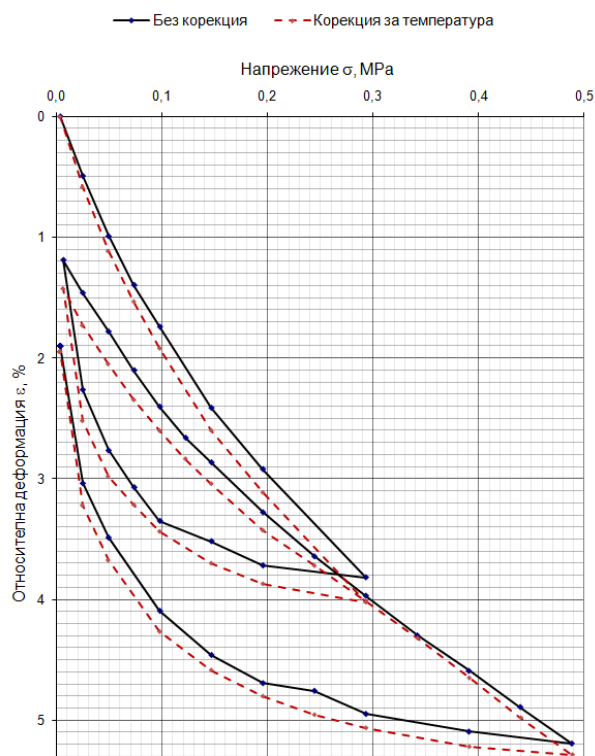
Фиг. 6 – Натоварване и деформации на „празен ход“ на одометричния апарат

• **Влияние на околната температура**

В процеса на опита, посредством термодатчик, се следи за външно температурно влияние, защото лабораториите не разполагат със собствена климатична инсталация. Влиянието от температурно разширение/свиване на системата трябва да бъде отчетено при обработката на резултатите. За целта се следят едновременно промяната на температурата и промяната на отчетите на датчика за преместване при вече консолидирала стъпка (без изменение на деформациите във времето). На база статистическа обработка се извежда корелационна зависимост между 2-те величини за конкретния уред и конкретното разположение на всеки един елемент. По този начин се извеждат резултати лишени от температурна грешка. Графики за коригирани и некоригирани по температура стойности във времето и по деформации са показани на фиг. 7 и фиг. 8.



Фиг. 7 – Коририрани и некоририрани по температура стойности на преместването във времето



Фиг. 7 – Коририрани и некоририрани по температура стойности на относителните деформации

- Калибриране на аналогово цифровия преобразувател по време

Настоящият аналогово-цифров преобразувател поддържа режим на непрекъснато семплиране, използващ вграден импулсен генератор (hardware-clock). Генерираната

честота на семплиране е непостоянна в определени граници, т.е. има и отклонение от точно зададената. Направеният анализ чрез външна синхронизация (с глобален NTP-сървър за точно време) и сравнението на резултатите показва, че отместването по време може да се приеме линейно:

$$\delta T(t) = k_T \cdot t,$$

като k_T варира в зависимост от зададената честота на семплиране, но остава в рамките на $3 \cdot 10^{-5}$, което създава разлика между реалното време и това на импулсния генератор в порядък на 1 минута на месец, което се коригира лесно с мащабен фактор за времето.

• Влияние на други външни фактори

В зависимост от техния характер, кинематичните смущения могат да повлияят самия датчик за преместване, лостовата система или почвената проба. Оценката за това се прави въз основа на засеченото ускорение (посока) и множество други субективни фактори като наличие на човек в лабораторията, преминаване на тежко превозно средство или други антропогенни фактори. Както част от тези смущения, така и високочестотния шум лесно могат да бъдат елиминирани чрез използване на метод на записване с по-висока от необходимата честота (oversampling), описан по-горе. Към момента на прилагане на опитната постановка не беше необходимо да се решава проблема с непостоянното захранване, а именно въвеждане на автономно батерийно захранване (или UPS) в случай на отпадане на основното. При необходимост от такова, основните изисквания са генериране на пълна синусоида, достатъчност на мощност и време на работа, а за желателно може да се приеме наличието на галваничен разделител в захранването.

6. Заключение

Повечето от лабораторните уреди в земно-механичните лаборатории са разработени до 70-те години на 20 век. Въпреки това, те остават често използвани, а резултатите от тях, служат за корелиране на *insitu* тестове. Съвременните технологии обаче позволяват евтино усъвършенстване или модификация на съществуващите апарати. В случая с одометричния тест, усъвършенстването се състои в автоматизация, калибровка и елиминиране на външни смущения. Резултатите от опитите, показват драстично изглаждане на кривите и повишаване на точността на подобен тип изпитване. Опитът от тази установка, може да послужи за основа на модернизация и на други лабораторни тестове, както в земно-механичната, така и в други лаборатории за изпитване на материали или конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN-ISO 17892-5
- [2] <http://www.meas-spec.com/>
- [3] *Ferreira, E.C., Neves, N.M., Muschalle, R. and Pouzada, A.S.* FRICTION PROPERTIES OF THERMOPLASTICS IN INJECTION MOLDING
- [4] <http://see.ni.com/>

Постъпила: март 2014

DEVELOPING AN EXPERIMENTAL LABORATORY SETTING FOR DETERMINING SOIL PARAMETERS RELATED TO DEFORMATION.

Kerenchev¹

Keywords: odometer test, LVDT, ADC

Research area: laboratory soil tests

ABSTRACT

The odometer test is a regular laboratory method for determining soil parameters related to deformation. Although there are more sufficient methods for determining these parameters, the odometer test, based on its low price, is still the most used for such type soil analysis. Much more accurate results for determining deformation parameters, as well as permeability coefficients, can be obtained with some modifications of the odometer apparatus. This paper explains the procedure for modernization and optimization of the available apparatus. Sensors for transformation of physical values into electrical signals, analog to digital conversion procedure and a continuous writing process are applied and described. Some solutions for eliminating the external disturbances, as well as the procedure for mechanical and thermal calibration of the system, are found during the optimization process.

¹ Nikolay Kerenchev, Assistant Professor, Eng., Dept. of Geotechnics, UACEG, Chr. Smirnenski 1 blvd., 1046 Sofia, kerenchev@hotmail.com