

COMPACTAREA PĂMÂNTURILOR COEZIVE ȘI SLAB COEZIVE, MODELE DINAMICE PENTRU STUDIUL INTERACȚII RULOU-TEREN

*conf.univ., dr. Sergiu BEJAN
drd. Andrei BURAGA*

Universitatea Tehnică a Moldovei

ABSTRACT

Compaction embodies a complex phenomenon dimensioned both technically and in value, with major implications for construction stability, and represents a considerable problem in research, design and execution. A correct compaction can increase the load-bearing capacity of the entire construction, the economic efficiency and the durability in exploitation.

Obiectivele generale

Terenul natural utilizat în umplutură, este caracterizat de următorii factori: umiditate, porozitate, compactitate. Pentru anumite valori ale factorilor ce descriu starea pământurilor, se remarcă o anumită comportare a terenului sub acțiunea forțelor exterioare aplicate prin mijloace mecanice statice sau dinamice.

Astfel, stabilirea unor metode empirice de calcul a anumitor parametri care descriu comportarea în timp, sub acțiunile externe, a unui anumit tip de pământ se face pe baza unui volum mare de încercări, de cele mai multe ori fără a putea cuprinde toate cazurile care pot apărea în practică, cu rezerva că prelucrarea informațiilor obținute prin testele experimentale pot prezenta și incertitudini. Pe de altă parte, complexitatea și necunoașterea multor aspecte din comportarea mecanică a pământurilor impun folosirea unor modele reologice cu număr mare de grade de libertate și de aceea, de multe ori, rezolvarea ecuațiilor constitutive ale modelului prezintă dificultăți uneori destul de mari.

Altfel spus, gradul de compactare reprezintă raportul dintre densitatea aparentă în stare uscată efectivă a terenului și densitatea de referință determinată prin metoda Proctor, în conformitate cu prevederile SR 1913-13-83.

De-a lungul timpului, numeroși cercetători au corelat metoda de compactare cu principalii parametri care influențează comportamentul la compactarea solurilor precum: conținutul optim de apă, energia de compactare și

tipul solului. Influența metodei de compactare utilizate se poate observa în Figura 1.1 [4], unde același tip de sol este compactat prin diferite metode tehnologice.

Stabilirea metodei de compactare depinde în principal de tipul de sol și de disponibilitatea echipamentelor aflate pe șantierul de construcții [1]. Nu există reguli fixe pentru selectarea celei mai adecvate metode de compactare, ci doar linii directe justificabile de determinările efectuate „in situ”, pe teren. Sunt recunoscute, ca fiind cele mai frecvente metode de compactare folosite în construcții cele care se bazează pe îndesare, frământare, presiune, vibrație și compactare dinamică [1].

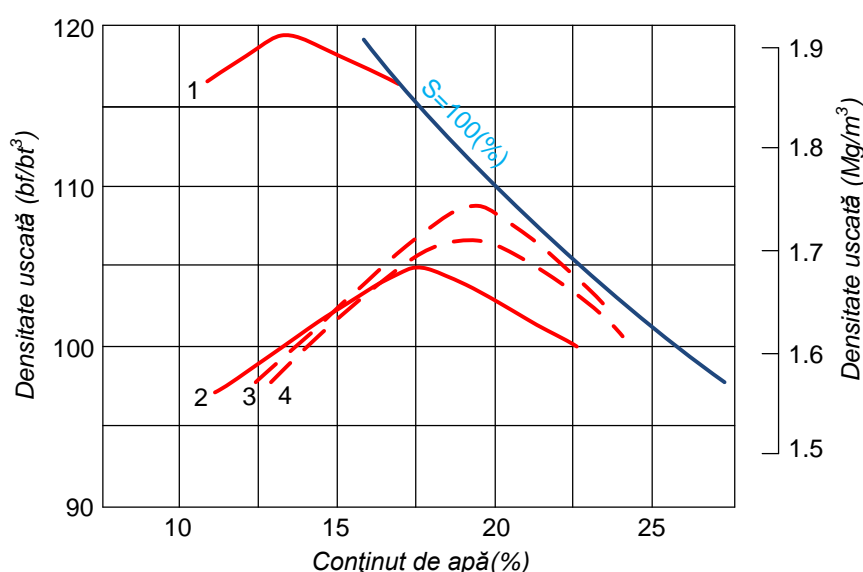


Fig. 1. Curbe de compactare obținute astfel [4]:

- 1, 2 - în laborator prin compactare statică (cu forță constantă sau variabilă);
- 3 - pe teren prin compactare cu tren de pneuri după 6 treceri;
- 4 - pe teren prin compactare cu rulou cu crampoane după 6 treceri;
- S- curba de saturație.

Actualitate și problema lucrării

O problemă recentă vine de la compactarea pământurilor stabilizate cu lianți organici sau neorganici, și nu numai, pentru care ”compactarea excesivă” sau în alt caz ”neatingerea gradului de compactare” vine să aducă neconformități a stabilității terasamentului și în deosebi cazul când aceste suprafețe îndeplinesc funcția de strat de bază, făcând parte din structura îmbrăcămintei rutiere.

Se știe că fiecare tip de sol are o anumită limită de compactare, în funcție de umiditatea optimă. Dacă, gradul de compactare poate fi atins *ex: după 5 treceri* cu un compactator cu cilindru vibrator, după a șasea trecere pe o urmă, va avea loc

compactarea excesivă solului - moment în care structura solului va pierde elementele de legătură între particule, diminuând astfel și capacitatea portantă a sa. Într-un fel, compactarea excesivă este mai diminuantă decât neatingerea gradului de compactare. Dacă solul necompactat suficient, poate să se stabilizeze în cele din urmă și să obțină o densitate bună, solul compactat excesiv se va distruge în cel puțin două cicluri sezoniere. Conform recomandărilor normative, gradul de compactare a solului se determină din numărului de treceri a ruloului compactor, un număr *ex: de cinci*. În condițiile actuale, această abordare a compactării pare să fie un fel de loterie: aproximativ 50% că solul va fi compactat, aproximativ 50% - că va fi necompactat. În ambele cazuri, calitatea drumului lasă mult de dorit, dar principalul moment este, că apare cerința revizuirii acestei lucrări. Sistemele moderne de monitorizare (SMM) (*ex: sistemul vario-control de la Bomag*), permit operatorului să gestioneze numărul de treceri, prin urmare, compactarea solului fiind monitorizată sub forma unei hărți digitale, sau diagrame corective [1]. SMM indică numărul de treceri pe întreaga suprafață compactată și nu într-un singur punct – variantă de măsurare clasică/normată, dar instantaneu și continuu - deoarece sistemul funcționează în timp real. Astfel, pe harta digitală sau diagrame, nu există suprafețe majore necompactate, iar toată lucrarea se face în mod uniform și cu aceeași calitate. Acest lucru permite obținerea unui coeficient de compactare prestabilit, dar și costuri semnificativ mai mici pentru monitorizarea de laborator a probelor de sol.

O altă problemă apărută pe șantierele experimentale din RM, în care terasamentul este utilizat și în calitate de element a îmbrăcămineti tuiere este compactarea excesivă a straturilor pe fâșiile de suprapunere a urmelor în procesul compactării fig. 2.1

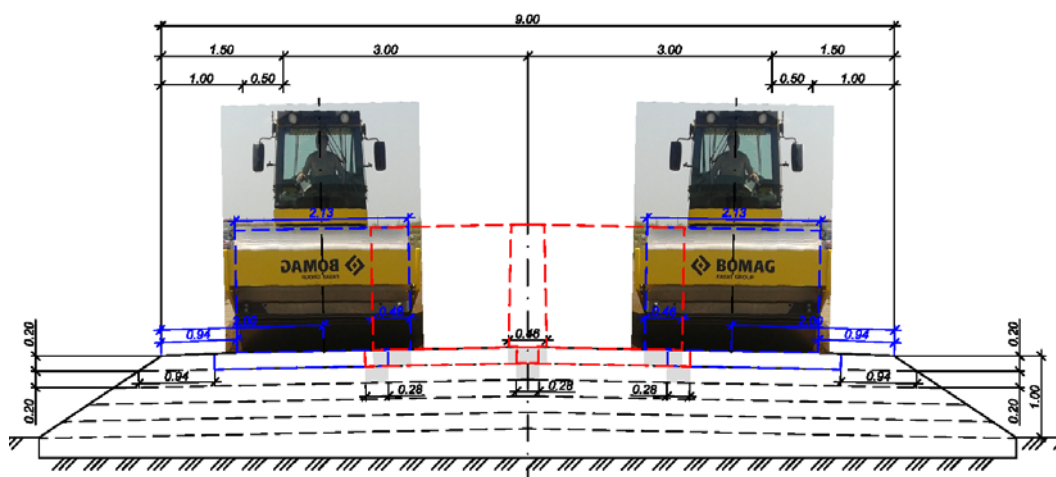


Fig.2. Cartograma compactării straturilor imbracamintii rutiere, zone compactate în exces, pentru drum de categoria tehnică a IV-a.

În rezultatul compactării excesive apare fenomenul de "clivaj" a suprafețelor compactate pe orizontală, rezultat care duce la diminuarea capacității portante a sistemului rutier și minimizarea perioadei de exploatare.

Monitorizarea și verificarea continuă a gradului de compactare este necesară nu numai pentru a îmbunătăți calitățile portante a drumului dar și atingerea uniformității gradului de compactare, care poate suporta sarcini suplimentare la creșterea intensităților de trafic *ex: trafic sezonier*. Astfel, respectarea exactă a densității, uniformitatea ei, va permite creșterea durabilității și fiabilității construcțiilor rutiere și de cale ferată, dar și eficientizarea costurilor execuției.

Influența metodelor de compactare asupra pământurilor coezive

Actualmente rezultatele compactării sunt evaluate prin mărimea gradului de compactare, prin schimbarea volumului și scheletului structural, presupunându-se ca acești indici într-o formă integrală, consideră caracteristicile de rezistență și deformabilitate a pământului compactat. Cercetările [5], au demonstrat că indicele de rezistență a solului depinde de metoda de compactare, procesul tehnologic ales, densitate și umiditate optimă (W_{op}) proprie. În rezultatul încercărilor sa construit dependența coeziunii vâscoase și constructive a particolelor de umiditatea optimă, pentru o aceeași densitate a pământului.

$$\tau_W = \rho \cdot tg\varphi_W + v_W + C_C; \quad (1)$$

în care: τ_W – rezistența la forfecare, pentru umiditatea determinată;

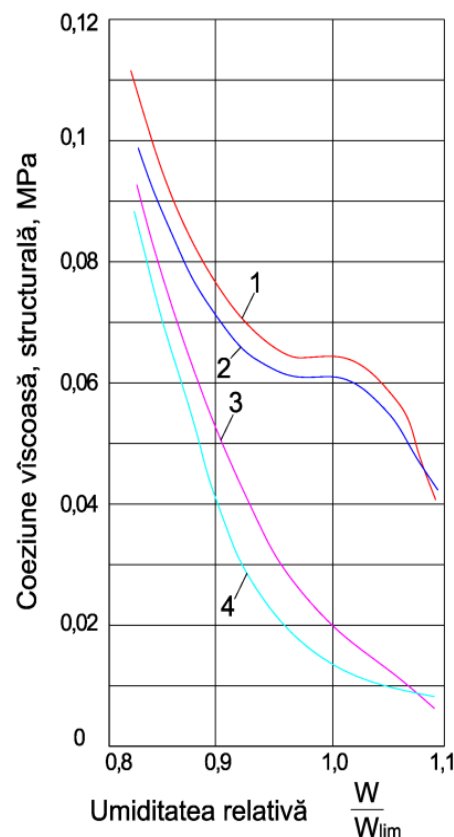
ρ – presiunea, densitatea, g/cm³;

φ_W – unghiul de frecare internă;

v_W – coeziune vâscoasă/primară, MPa;

C_C – coeziune structurală, MPa.

Fig. 3. Dependența coeziunii vâscoase și structurale față de umiditatea solului, pentru diferite metode de compactare: **1, 2**- coeziunea vâscoasă respectiv pentru compactare dinamică și statică; **3, 4** – coeziunea structurală respectiv pentru compactare dinamică și statică.



Analiza rezultatelor experimentale permit următoarele concluzii. Rezistența probelor încercate de pământ compactat este diferită, datorată lipsei omogenității dar și a influenței umidității, cât și a metodei de compactare, tabelul 1.

Influența metodelor de compactare asupra pământurilor coezive, corelate cu densitatea și umiditatea optimă. Tabelul 1[5]

| Indicii stării pământului | Valoarea indicilor în funcție de metoda de compactare | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| | statica | | | | dinamică | | | |
| Umiditatea, % | 10,95 | 12,64 | 13,55 | 14,53 | 10,95 | 12,64 | 13,59 | 14,48 |
| Densitatea, g/cm ³ | 1,96 | 1,94 | 1,93 | 1,93 | 1,96 | 1,94 | 1,93 | 1,93 |
| Coeziunea viscosă, MPa | 0,0998 | 0,0624 | 0,0618 | 0,0429 | 0,1144 | 0,0662 | 0,0639 | 0,042 |
| Coeziunea structurală, MPa | 0,0898 | 0,0176 | 0,0129 | 0,0082 | 0,0944 | 0,0283 | 0,0178 | 0,0066 |

Parametrii de compactare a terenului cu grosimea inițială a stratului de 20 cm, obținuți cu utilajul tip Bomag, cu acțiunea dinamică . Tabelul 2[1]

| Numărul de treceri | | 4 | | | | 8 | | | |
|-----------------------------|-------------------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| Numărul de ordine al probei | | 1 | 2 | 3 | media | 1 | 2 | 3 | media |
| Param. | U.M. | | | | | | | | |
| W | % | 15,8 | 15,3 | 18,8 | 16,7 | 15,6 | 15,5 | 15,8 | 15,6 |
| ρ_w | g/cm ³ | 1,85 | 1,86 | 1,88 | 1,86 | 1,9 | 1,79 | 1,91 | 1,87 |
| ρ_d | g/cm ³ | 1,6 | 1,61 | 1,59 | 1,6 | 1,64 | 1,55 | 1,64 | 1,61 |
| D _c | % | 84,2 | 84,7 | 83,7 | 84,2 | 86,3 | 81,6 | 86,3 | 84,7 |

Modulul static de deformare liniară a pământului slab coeziv funcție de densitatea sa în stare uscată

Determinările experimentale pentru stabilirea modulului static de deformație liniară E_{st} a pământului și a densității sale în stare uscată ρ_d au relevat existența unei corelații între valorile acestor doi parametri caracteristici ai acestuia. Pentru trei tipuri principale de terenuri de fundare, cu umidități corespunzătoare, w întâlnite uzual avem:

a) pământuri slab coezive: $w = (12...15)\%$;

Prin aproximarea cu diferite tipuri de funcții (arc de parabolă, arc de hiperbolă, funcții liniare, funcții putere sau exponențiale, etc.), s-au determinat expresiile matematice corespunzătoare $E_{st} = f(\rho_d)$, pe domeniul fizic real de existență, varianta finală fiind selectată dintre acestea pe baza criteriului erorii minime pe domeniul de existență.

Astfel, pentru tipul de pământ enumerat anterior se cunoaște următoarea expresie pentru funcția $E_{st} = f(\rho_d)$, corespunzătoare:

a) pentru pământuri slab coezive:

$$E_{st} = 711,221(1 - 1,3154\sqrt{1,8386 - \rho_d}), [\text{daN/cm}^2]; (*) \quad (2)$$

în care: E_{st} - este modulul static mediu de deformație liniară al pământului, în $[\text{daN}/\text{cm}^2]$;

ρ_d - densitatea uscată medie a pământului, realizată la un moment dat, în $[\text{g}/\text{cm}^3]$.

(*) Notă: $1 \text{ daN}/\text{cm}^2 = 10^{-1} \text{ MPa}$ sau $1 \text{ daN}/\text{cm}^2 = 10^2 \text{ kN}/\text{m}^2$

Curbele $E_{st} - \rho_d$ corespunzătoare relației 2 sunt reprezentate în diagrama din Figura 4.

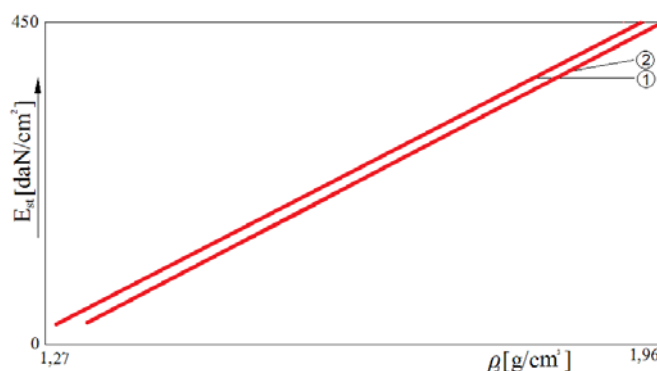


Fig.4. Dependenta modului static de deformație liniară funcție de densitatea în stare uscată. 1. pentru nisip; 2. pentru pământuri slab coezive.

Modele dinamice multicorp pentru studiul interacțiunii rulou-teren în procesul de compactare prin vibrații

Studiul mișcării sistemului rulou vibrator – teren poate fi analizat atât pe modele simple cu comportare liniară, dar și pe modele neliniare. Acestea din urmă au fost elaborate cu grade de complexitate graduale (2, 3 sau mai multe grade de libertate).

Dacă se ia în considerare suspensia ruloului compactor, atunci modelul dinamic echivalent pentru studiul mișcării principalelor elemente structurale ale compactorului este prezentat în Figura 5[1].

Cele două ecuații diferențiale ale mișcării maselor care formează sistemul dinamic sunt:

- pentru sasiu:

$$m\ddot{x} - c(\dot{x}_r - \dot{x}) - k(x_r - x) = 0; \quad (3)$$

- pentru rulou:

$$(m_r + m_0)\ddot{x}_r + c(\dot{x}_r - \dot{x}) + k(x_r - x) = m_0 r \omega^2 \cos(\omega t) - F_s. \quad (4)$$

Analitic, deplasarea ruloului se poate exprima sub forma funcției următoare:

$$x_r = \sum_i A_i \cos(i\omega - \varphi_i) \quad (5)$$

în care: φ_i - este faza forței perturbatoare.

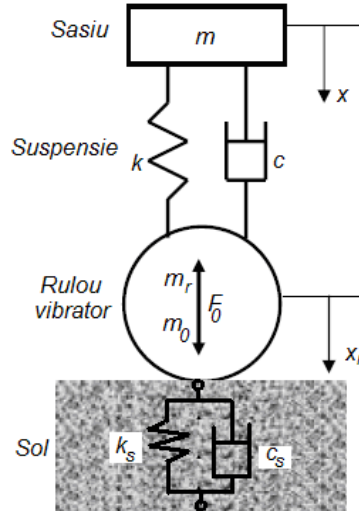


Fig. 5[1]. Model dinamic cu două grade de libertate pentru studiul interacțiunii rului-teren pentru un compactator cu un rulo vibrator

În funcție de tipul contactului, deplasarea x_r are una sau mai multe frecvențe, astfel:

- pentru contact permanent dintre rulo-teren (contact liniar): $i=1$;
- pentru pierderea periodică a contactului (contact neliniar): $i=1, 2, 3$;
- pentru contact haotic (contact subarmonic): $i=1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, 3$.

În prezent, pentru evaluarea și controlul efortului de compactare ca răspuns al gradului de compactare a solului (determinat prin măsurarea rigidității acestuia) s-a implementat tehnologia denumită compactare inteligentă. Sunt cunoscute modelele lui Andereg, Kaufmann, Rahman [6, 7, 108] care simulează comportamentul sistemului analizat în timpul procesului de compactare utilizând caracteristicile dinamice ale sistemului utilaj - sol prezentate în Figura 7.13.

După cum se observă din figurile anterioare, echipamentul de compactare este modelat sub forma a două sisteme vâsco-elastice montate în serie pentru a modela cât mai realist comportamentul dinamic al compactatorului.

Primul sistem vâsco-elastic este conectat în paralel și reprezintă legătura dintre mașina de bază și cadrul metalic la care este montat rulo. Al doilea sistem vâsco-elastic este, de asemenea, montat în paralel și reprezintă rulo vibrator al compactatorului. În final, solul este modelat sub forma unui al treilea sistem vâsco-elastic montat în paralel, iar forța sa de reacțiune la acțiunea ruloului compactator are expresia:

$$F_B = -m_d x_d + m_0 e \Omega^2 \cdot \cos(\Omega t) + (m_f + m_d) \cdot g ; \quad (6)$$

Floss și Kloubert [7] au studiat legătura dintre variația alternativă dintre forța de reacțiune a terenului (notată în Figura 5 cu F_x) și panta curbei specifică încărcării. Aceasta poate fi reprezentată grafic fiind posibilă astfel determinarea rigidității dinamice a materialului compactat.

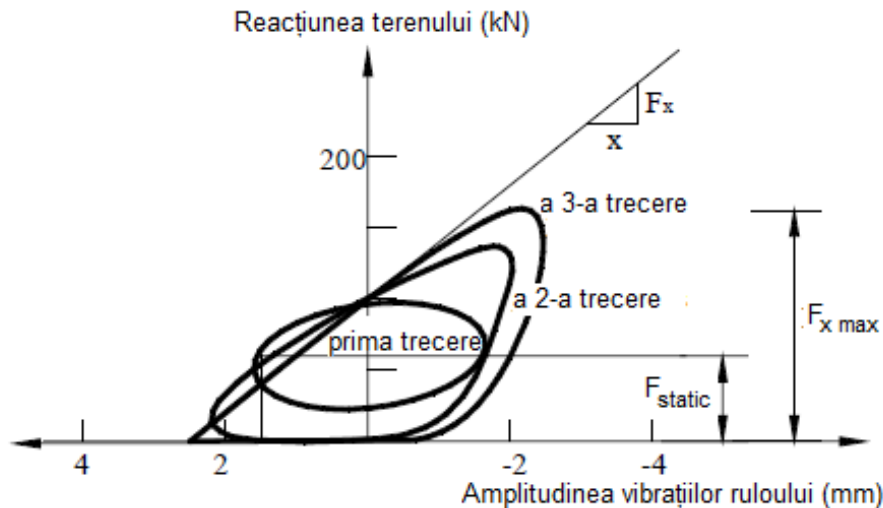


Fig. 6. Reacțiunea terenului funcție de amplitudinea vibrațiilor [6,7]

Din literatura de specialitate studiată de autor se remarcă existența unei game variate de modele reologice pentru studiul interacțiunii rulou-teren supus compactării prin vibrații. Fiecare model reologic are propria identitate în sensul că ține seama de influența anumitor parametri care intervin în procesul tehnologic de compactare, descriși de legi de variație liniară sau neliniară [1, 6, 7].

În paragraful care urmează sunt prezentate modele propuse de autor cu ajutorul cărora se poate studia fie comportarea vâsco-elasto-plastică a unei anumite categorii de pământuri, fie modelarea virtuală a interacțiunii rulou-teren în timpul desfășurării procesului de compactare.

Concluzii finale

Modelele și sistemele de analiză pot fi realizate informatic și numeric, cu integrarea coerentă pentru evoluțiile parametrilor esențiali ce caracterizează procesul tehnologic de compactare dinamică prin vibrație. Evidențierea răspunsului terenului sub acțiunea forței dinamice produsă de ruloul vibrator, împreună cu elementele sale componente în termenii reologiei materialelor

compozite cu comportare complexă de tip elastic, disipativ și plastic, ajută la înțelegerea fenomenologiei specifice interacțiunii echipament – teren și facilitează procesul de optimizare tehnologică prin îmbunătățirea performanțelor funcționale ale echipamentelor tehnologice specifice compactării dinamice. Scopul final al acestei optimizări este obținerea unor valori superioare ale gradului de compactare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Sergiu BEJAN. Analiza performanței procesului de compactare dinamică prin vibrații pentru structuri rutiere. Teza de doctorat, Galați 2015;
- [2] Andrei Pogany, Sorin Zdrenghia. Un procedeu de verificare a compactării terasamentelor prin folosirea cilindrului compactor vibrator. A XVI-a Conferință internațională-multidisciplinară ”Profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidrotehnicii românești”, pag.593-600, Sebeș 2016;
- [3] Dave Dennison. Product Manager Bomang Americas-Kewanee, IL.;
- [4] Holtz, R. D., State of the Art Report 8: Guide to Earthwork Construction, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1990;
- [5] Б.С. Марышев, И.Е. Евгеньев, Ю.М. Васильев. Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд. Союздорнии. Moscova1980.
- [6] Bratu, P., *Viscous nonlinearizing for interval energy dissipation*, IJAV, Vol.4, Issue 4, pp.82-87, 2000;
- [7] Floss, R. and Kloubert, H.-J., *Newest Developments in Compaction Technology*, European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Ponts et Chaussées, Paris, May 19th, pp. 247-261, France, 2000;