

DETERMINATION OF THE RELAXATION TIME AT STATIC COMPRESSION OF IDARED APPLES VARIETY

/

DETERMINAREA DURATEI DE RELAXARE LA SOLICITARI STATICE DE COMPRESIUNE A MERELOR DIN SOIUL IDARED

Ph.D.Eng. Veringă D.¹⁾, Ph.D.Eng. Vintilă M.¹⁾, Ph.D.Eng. Popa L.²⁾,
Ph.D.Stud.Eng. Ștefan V.²⁾, Ph.D.Stud.Eng. Petcu A.S.²⁾

¹⁾ I.C.D.I.M.P.H. – HORTING Bucharest / Romania; ²⁾ INMA Bucharest / Romania
Tel: 0745.148.071; E-mail: veringa.daniela@yahoo.com

Abstract: Paper presents an experimental method of determining the static compression relaxation time of Idared apples variety, by preserving their integrity. Using the yield test by taking into account the viscous and elastic behaviour of the bodies described by physical rheological model of Burgers body made of elastic and viscous linear elements, the method theoretical groundwork was emphasized. A mathematical model and the suitable rheological equation describing the apples behaviour at steady static strain, has been found. Theoretical relations and experimental data are useful for evaluating (predicting) the storing time in packages which height is known.

Keywords: apples, compression stress

INTRODUCTION

During the technological flow storing, the apple commercial value and quality are affected because of mechanical damage by crushing (contusion) of pulp tissue and also by apparition of deformations and deviations from characteristic shape.

Apple cellular tissue damage by contusion and remaining deformations visible through the geometrical shape modification, represent major causes of quality decrease and, consequently, of reduction of value and trading of fresh apples [7,8,12].

Value of losses represent 10 – 12% out of the quantity stored [5,7], and for diminishing it, a suitable package should be chosen. Therefore, researches on finding the best solution between the package height, apple variety stored, ripening degree, time and conservation conditions, were performed.

Apple arranging height in packages has to be chosen so that any damage of fruits from lower rows do not produce, thus being detrimental to apples quality and class. Height limits depend on apple variety and ripening stage, characterized by a mechanical feature that can be a measure of rigidity („firmness”) of fruit pulp [7,8,12].

MATERIAL AND METHOD

Theoretical aspects

As rheological material, fruits do not react to mechanical stress in terms of elasticity, their reaction combining an elastic component to a viscoelastic one [1,4].

When they are stored in bulk or arranged as a high pile for a longer period of time, the fruits are subject to a static load and, therefore deformation and damage may appear when pressure values are much smaller than those determined during the usual compression tests. For getting detailed data on apples deformation, a new technique allowing the automated time registering of continuous deformation under static load, has been drawn up.

Rezumat: Lucrare prezintă o metodă de determinare experimentală a duratei de relaxare la solicitări statice de compresiune a merelor din soiul Idared, cu menținerea integrității lor. Utilizând testul de fluaj prin considerarea comportării liniar vâscoelastice a corpurilor descrise de modelul fizic reologic al corpului Burgers format din elementele elastice și vâscoase liniare s-au evidențiat bazele teoretice ale metodei. S-a găsit un model matematic și ecuația reologica corespunzătoare care să descrie comportarea merelor la solicitări statice constante. Relațiile teoretice și datele experimentale sunt utile la evaluarea (predicția) duratei de depozitare în ambalaje de înălțime cunoscută.

Cuvinte cheie: mere, solicitare la compresiune

INTRODUCERE

Pe fluxul tehnologic de depozitare de lungă durată, valoarea comercială și calitatea merelor sunt afectate datorită vătămarilor mecanice prin strivirea (contuzia) țesutului pulpei cât și prin apariția deformațiilor și abaterilor de la forma geometrică caracteristică.

Vătămarea prin contuzia țesutului celular la mere și deformațiile remanente vizibile cu modificarea formei geometrice constituie cauzele majore a pierderilor de calitate și în consecință a reducerii valorii și a gradului de comercializare în stare proaspătă a merelor [7,8,12].

Valoarea pierderilor reprezintă 10 – 12% din cantitatea depozitată [5,7], iar pentru reducerea acestora este necesară alegerea adecvată a ambalajului utilizat. În acest sens s-au realizat cercetări privind obținerea corelației între înălțimea ambalajului, soiul de măr depozitat, gradul de coacere, durata și condițiile de păstrare.

Înălțimea de aranjare a fructelor în ambalaje, trebuie astfel aleasă, încât să nu se producă defecte fructelor din rândurile inferioare și să afecteze calitatea și clasa merelor. Limitele de înălțime sunt funcție de soiul de mere și de stadiul de coacere caracterizat printr-o proprietate mecanică ce poate fi o măsură a însușirilor de rigiditate (fermitate „firmness”) a pulpei fructelor [7,8,12].

MATERIAL ȘI METODĂ

Aspecte teoretice

Ca materiale biologice fructele nu reacționează la tensiuni mecanice, într-o manieră pur elastică, reacția lor combinând o componentă elastică și una vâscoelastică [1,4].

La depozitarea în vrac sau în stivă înaltă pentru o durată mare de timp fructele sunt supuse unei sarcini statice și în acest caz deformarea și vătămarea pot apare la valori ale presiunii, cu mult sub cele determinate la testele obișnuite de compresie. Pentru a obține date detaliate despre fluajul (deformarea) merelor, s-a elaborat o tehnică care permite înregistrarea automată în timp a deformației continue sub sarcină statică.

Tests on Idared variety apple behaviour during compression strain have emphasized, by deformation-time curves, the effect of time of application of deformation force and speed, demonstrating that the time effect is of practical importance in case of fruit deformation under static load. [1,4,7]. It has been tried to find out a mechanical model and its appropriate rheological equation which be suitable to experimental flow curve, similar to that from fig. 1.(through Burgers model (fig. 1a), where deformation-time curves obtained with this model are overlapping. Consequently, this curve simulates apple behaviour under static load. Following the compression tests made on whole apples located between two plane plates, the deformation-time curves have had the same profile as the curve from fig. 1 b, concluding that this curve might be described through a Burges model type, fig. 2, [2,8]. This new model type has been obtained from the classical model, by replacing: $\epsilon \rightarrow \delta$, $\sigma \rightarrow F$, $E \rightarrow K$, $\eta \rightarrow \eta^*$, as one can see in fig.2. Appropriate experimental tests have the advantage of being performed more easily along with preserving the fruit integrity [9,11,12].

Testele privind comportarea la solicitarea de compresiune a merelor din soiul Idared au evidențiat, prin curbele forță-deformație efectul timpului de aplicare a forței și a vitezei de deformare, dovedindu-se că efectul timpului este de importanță practică pentru cazul de fluaj al fructului sub sarcină statică [1,4,7].

S-a încercat să se găsească un model mecanic și ecuația reologica corespunzătoare care să se potrivească curbei de fluaj experimentală, similară celei din fig.1.(b) prin considerarea modelului Burgers (fig.1a), în care curbele deformație – timp obținute cu acest model se suprapun. În consecință, această curbă simulează comportamentul fructelor de măr sub sarcină statică.

Din testele de compresiune realizate pe merele întregi amplasate între două plăci plane s-au obținut curbe de deformație – timp cu același profil cu curba din fig. 1 b, fapt ce a permis ipoteza că se poate descrie această curbă printr-un model tip Burgers, fig. 2, [2,8]. Acest nou tip de model s-a obținut din modelul clasic prin înlocuirile: $\epsilon \rightarrow \delta$, $\sigma \rightarrow F$, $E \rightarrow K$, $\eta \rightarrow \eta^*$, așa cum se poate urmări în fig.2. Testele experimentale corespunzătoare au avantajul că se pot efectua mai comod, cu menținerea integrității fructului [9,11,12].

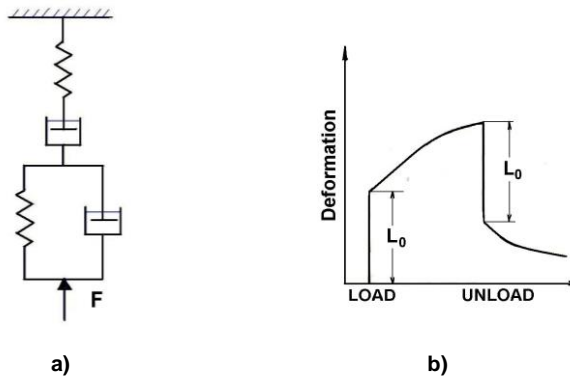


Fig. 1 - Burgers physical model(a) and its deformation-time curve (b)

Establishing the rheological equation suitable to fruit behaviour at static compression was performed by taking into account the physical model of Burgers type and also the fact that equations appropriate to ideal elements state are:

- for the ideal elastic element, Hooke:

$$F = K \cdot \delta \tag{1}$$

- for ideal viscous element, Newton:

$$F = \eta^* \cdot \dot{\delta} \tag{2}$$

where

δ is deformation;
 K -rigidity of elastic element [N/m];
 η^* - size similar to viscosity of ideal viscous element [Ns/m].

Stabilirea ecuației reologice corespunzătoare comportării fructului la solicitarea de compresiune statică, s-a făcut ținând cont de modelul fizic tip Burgers și s-a avut în vedere că ecuațiile de stare corespunzătoare elementelor ideale sunt:

- pentru elementul ideal elastic, Hooke:

- pentru elementul ideal vâscos, Newton:

unde

δ este deformația;
 K -rigiditatea elementului elastic [N/m];
 η^* - mărime similară vâscozității elementului ideal vâscos [Ns/m].

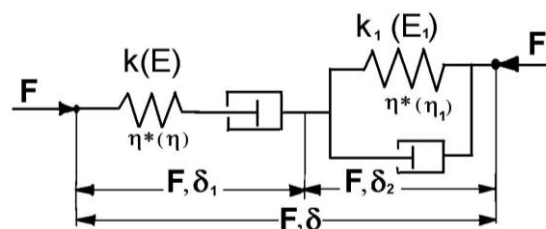


Fig. 2 - Burgers type physical model for describing the compression behavior of the whole apple

Body represented by Burgers model, subject to a constant compression force, $F = F_0 = \text{const.}$ will have a time deformation given by equation:

$$\delta = \frac{F_0}{K} + \frac{F_0}{\eta^*} t + \frac{F_0}{K_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right) \quad (3)$$

Working method

For performing the experiments, The Idared apple variety, coming from Institute of Research-Development for Tree Growing Pitești - Mărăcineni Argeș, was chosen, the harvesting being manually made when fruits were completely ripen.

Apple samples chosen were of different sizes, randomly selected, but though, trying to find samples with apples closer of spherical shape. Up to tests performing, apples were kept in refrigerating cells at 3-4⁰ C temperature and 80 – 85% relative humidity.

Before performing the tests, the apples were taking out from the cells and kept in laboratory at ambient temperature during, at least 4 – 5 hours, for reaching environment temperature.

In order to perform the deformation tests for finding out the elasticity module relaxation to apple static compression strain and relaxation time, the apparatus whose scheme is shown in fig 3a), has been designed and manufactured. In fig. 3(b,c) are presented images of apparatus aimed to perform the measurements. According to testing procedure, the apple is subject to static compression by pressing down, with a steady load, either with a rigid plane plate, fig.3(c), or with another half of apple fig. 3(b) and deformation is measured by means of a comparing clock, at different time moments, at the beginning of feeding.

Corpul reprezentat prin modelul tip Burgers, supus acțiunii unei forțe de compresiune constante, $F = F_0 = \text{const.}$ va avea o deformație în timp dată de ecuația:

Metoda de lucru

Pentru efectuarea experimentărilor s-a ales soiul de măr Idared, provenit de la Institutul de Cercetare – Dezvoltare pentru Pomicultură Pitești - Mărăcineni Argeș, recoltarea s-a făcut manual când fructele s-au aflat în stadiul deplinei maturității.

Probele de mere au fost de diferite dimensiuni, selectate în mod aleatoriu, căutându-se totuși probele cu o formă apropiată de cea sferică. Până la efectuarea experimentărilor merele au fost păstrate în celule frigorifice la o temperatură de 3-4⁰ C și o umiditate relativă de 80 – 85%.

Înainte de efectuarea experimentărilor, fructele au fost scoase din celule și ținute în laborator la temperatura camerei o durată de cel puțin 4 – 5 ore pentru a avea temperatura mediului.

În scopul efectuării testelor de fluaj în vederea determinării relaxării modulului de elasticitate și a duratei de relaxare la solicitări statice de compresiune a merelor a fost conceput, proiectat și realizat aparatul a cărui schemă este prezentată în fig. 3a. În fig. 3(b,c) sunt prezentate vederi ale aparatului pregătit pentru efectuarea măsurătorilor. În conformitate cu procedura de testare, mărul este supus la solicitarea de compresiune statică prin apăsarea, cu o sarcină constantă, fie a unei plăci plane rigide fig.3(c) fie a unei alte jumătăți de măr fig. 3(b) iar deformația este măsurată cu ajutorul unui ceas comparator, la diferite momente de timp la începutul încărcării.

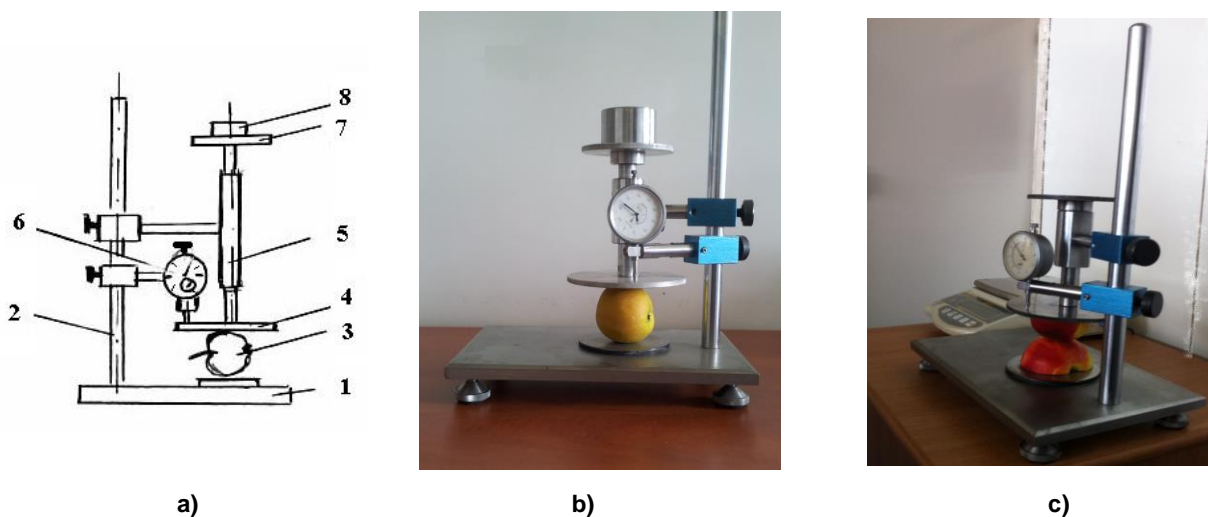


Fig. 3 – Scheme of apple compression deformation testing apparatus

1- main plate; 2-support; 3-apple 4- rigid pressing plate; 5- guidance; 6- comparing clock; 7-pan 8-load

Tests were performed in two variants, namely with the whole fruit (fig.3 b) and with halves of fruit (fig.3c). The apple was divided by a sharp knife with rigid blade and one apple half was laid on fixed surface of apparatus. The upper cup was charged with the mass appropriate to a constant pressing force $F=15$ N. The rigid plate was brought into contact with apple surface and cup rod was released for compression performing.

Deformation $\delta(t)$ at different moments of time was measured in seconds, starting from the beginning of

Experimentările au fost efectuate în două variante cu fructul întreg (fig.3 b) și cu jumătăți de fruct (fig.3c). S-a secționat mărul într-un plan axial cu ajutorul unui cuțit bine ascuțit cu lama rigidă și una din jumătăți s-a așezat pe suprafața fixă a aparatului. S-a încărcat platanul superior cu masa de încărcare corespunzătoare unei forțe constante de apăsare $F=15$ N. S-a adus placa rigidă în contact cu suprafața mărului și s-a eliberat tija platanului pentru realizarea solicitării la compresiune.

S-a măsurat deformația $\delta(t)$ la diferite momente de

strain, from 15 seconds to 15 seconds for 10 readings, from 30 seconds to 30 seconds for 5 readings, at 1 minute for 5 readings, from 5 to 5 minutes for 5 readings, from 10 minutes to 10 minutes for 5 readings and from 15 minutes to 15 minutes for 5 readings, which required a period of 2.5 hours for each experiment for which 35 values have been measured.

The elasticity module E was calculated in each point..

RESULTS AND DISCUSSIONS

Compression deformation experiments have been performed at pressing loads of 12.5 N; 15 N; 17.5 N for the two variants. Deformations δ for different times have been measured and values of Young elasticity modules have been calculated.

Data obtained are shown in Tab.1.

timp măsurate în secunde, de la începutul solicitării din 15 în 15 secunde pentru 10 citiri, din 30 în 30 secunde pentru 5 citiri, la 1 minut pentru 5 citiri, din 5 în 5 minute pentru 5 citiri, din 10 în 10 minute pentru 5 citiri și din 15 în 15 minute pentru 5 citiri, ceea ce a necesitat o durată de 2,5 ore pentru fiecare experiment pentru care s-au măsurat 35 de valori.

S-a calculat în fiecare punct modulul de elasticitate E.

REZULTATE SI DISCUTII

Experimentările de fluaj la compresiune au fost efectuate la sarcini de apăsare de 12,5 N; 15 N; 17,5 N pentru cele două variante. Au fost măsurate deformațiile δ pentru diferiți timpi și calculate valorile modulelor de elasticitate Young.

Datele obținute sunt prezentate în Tab.1.

Table 1

Data of deformation test at constant force compression, deformation $\delta(t)$ at different time intervals t and elasticity longitudinal module – selective data

Time t [s]	F= 12,5 N				F= 15 N				F= 17,5 N			
	apple between plates		apple/apple		apple between plates		apple/apple		applebetween plates		apple/apple	
	δ [mm]	$E \cdot 10^6$ [Pa]	δ [mm]	$E \cdot 10^6$ [Pa]	δ [mm]	$E \cdot 10^6$ [Pa]	δ [mm]	$E \cdot 10^6$ [Pa]	δ [mm]	$E \cdot 10^6$ [Pa]	δ [mm]	$E \cdot 10^6$ [Pa]
15	0.48	4.07	0.66	8.62	0.60	3.81	0.77	7.82	0.64	4.12	0.74	8.61
45	0.51	3.69	0.73	7.45	0.66	3.30	0.83	6.95	0.66	3.89	0.83	7.34
75	0.53	3.51	0.77	6.91	0.68	3.14	0.86	6.56	0.69	3.68	0.87	6.84
105	0.54	3.37	0.79	6.56	0.70	3.03	0.88	6.34	0.71	3.51	0.89	6.58
135	0.56	3.25	0.81	6.39	0.71	2.95	0.90	6.15	0.73	3.39	0.91	6.35
180	0.57	3.17	0.83	6.17	0.74	2.80	0.92	5.93	0.75	3.22	0.93	6.11
240	0.58	3.06	0.85	5.97	0.76	2.65	0.94	5.75	0.77	3.14	0.96	5.88
300	0.59	2.99	0.86	5.85	0.78	2.54	0.96	5.58	0.78	3.08	0.98	5.71
420	0.6	2.89	0.87	5.68	0.81	2.40	0.98	5.41	0.82	2.90	1.00	5.52
540	0.61	2.81	0.89	5.50	0.84	2.30	1.00	5.26	0.83	2.77	1.02	5.36
900	0.64	2.64	0.92	5.28	0.88	2.15	1.01	5.16	0.87	2.60	1.06	5.07
1500	0.67	2.46	0.93	5.18	0.92	2.01	1.02	5.10	0.90	2.49	1.09	4.86
2100	0.69	2.35	0.94	5.12	0.94	1.95	1.03	5.05	0.92	2.40	1.11	4.72
3300	0.72	2.21	0.95	4.99	0.96	1.87	1.04	4.95	0.94	2.30	1.14	4.52
4500	0.74	2.12	0.98	4.80	0.99	1.80	1.06	4.81	0.97	2.21	1.16	4.42
6000	0.76	2.03	1.01	4.58	1.01	1.74	1.09	4.61	0.99	2.11	1.18	4.29
7800	0.79	1.89	1.05	4.32	1.03	1.69	1.10	4.53	1.04	2.00	1.20	4.19
9600	0.80	1.88	1.08	4.11	1.06	1.62	1.11	4.47	1.07	1.90	1.22	4.10

Based on the data obtained following the experiments, deformation δ depending on time (t) was represented by points, in fig.4 – fig.6 for stress scheme apple between plates and in fig.7 – fig.9 for apple/apple stress scheme..

By means of Microcal Origin program, experiments data were processed, testing the equation (4) for module relaxation through non-linear regression with experimental data and appropriate curves were represented comparing to experimental data in the same graphics – fig.4 – fig.9.

Pe baza datelor obținute din experimente s-au reprezentat prin puncte deformația δ în funcție de timp (t) în fig. 4 – fig.6 pentru schema de solicitare măr între plăci și în fig.7 – fig.9 pentru schema de solicitare măr/măr .

Cu ajutorul programului Microcal Origin s-au prelucrat datele obținute din experimentări, testându-se ec.(4) pentru relaxarea modulului prin regresie neliniară cu datele experimentale și curbele corespunzătoare au fost reprezentate, comparativ cu datele experimentale, pe aceleași grafice – fig.4 – fig.9.

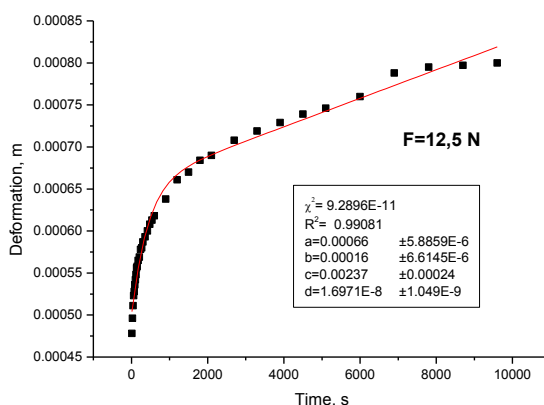


Fig.4 – Deformation curve $\delta(t)$ depending on time, for Idared apples at F=12,5 N

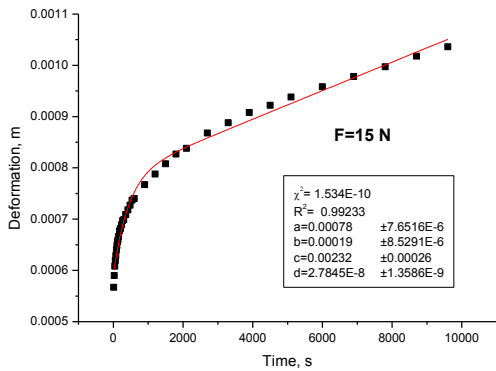


Fig.5 - Deformation curve $\delta(t)$ depending on time, for Idared apples at $F=15$ N

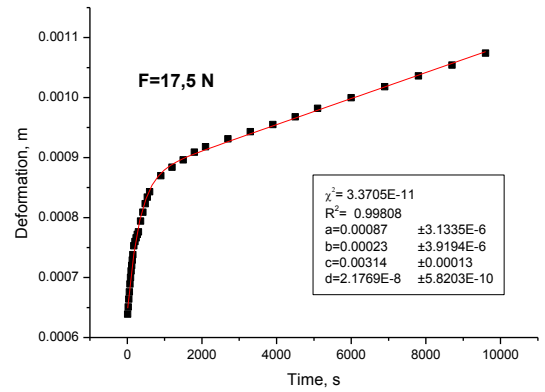


Fig.6 - Deformation curve $\delta(t)$ depending on time, for Idared apples at $F=17,5$ N

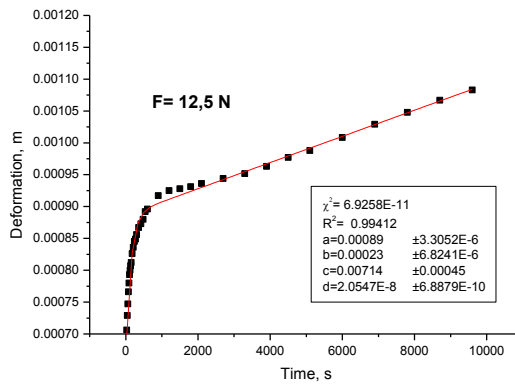


Fig.7 – Curve of deformation $\delta(t)$ depending on time for Idared apples at $F=12,5$ N

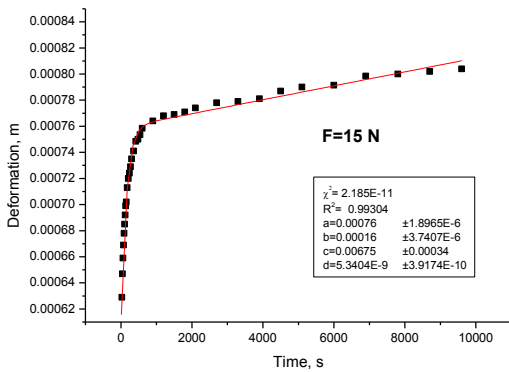


Fig.8 - Curve of deformation $\delta(t)$ depending on time for Idared apples at $F=15$ N

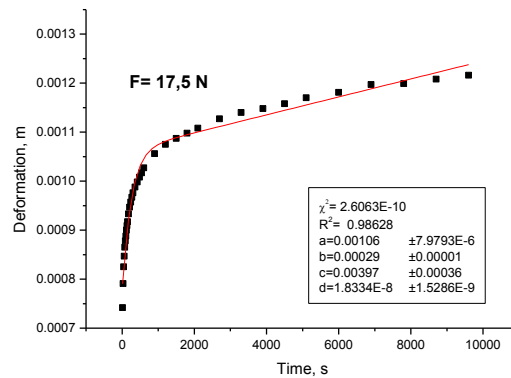


Fig.9 - Curve of deformation $\delta(t)$ depending on time for Idared apples at $F=17,5$ N

CONCLUSIONS

In technological flow, from harvesting to market, including the log time storing, operations which fruits are subject may produce mechanical damages (harvesting, sorting, storage, etc.) that affect their quality [6]. Damages are produced when strains surpass the elastic limit of fruit pulp, reaching its breaking resistance, fact manifested by crushing the fruit pulp tissue or apparition of deformations and deviations from characteristic geometrical shape.

CONCLUZII

In lanțul tehnologic de la recoltare la comercializare, inclusiv cu păstrare de lungă durată, operațiile la care sunt supuse fructele (recoltare, sortare, depozitare, etc.) pot produce vătămări mecanice ce le afectează calitatea [6]. Vătămările se produc când tensiunile depășesc limita elastică a pulpei fructului, atingând rezistența la rupere a acesteia, fapt manifestat prin strivirea țesutului pulpei fructului sau apariția unor deformații și abateri de la forma geometrică caracteristică.

Considering the linear viscoelastic behaviour of bodies described by physical rheological model of Burgers body, the paper substantiates an experimental determination method of relaxation time at static compression strains. At the same time, using the deformation test, a mathematical model describing the static compression behaviour of apples is presented; it is necessary to prognosis of fruit package height, so that mechanical damages during the storing-conservation period be avoided and allow the prediction of storing time in certain packages.

A mechanical model and its appropriate rheological equation were found in order to match to experimental deformation curve, similar to that from fig.1.b, by considering the Burgers model (fig.1a), where the deformation time curves, obtained with this model are overlapped. Consequently, this curve simulates the apple behaviour subject to static load [3,10,13].

REFERENCES

- [1]. Abbott J.A., R. Lu. (1996), *Anisotropic mechanical properties of apples*, Transactions of the ASAE, vol.39(4), pp.1451-1459;
- [2]. Căsândroi T., Oprea N. (1994), *Experimental researches on evaluation of compression and penetration behaviour of certain apple varieties*, Scientific research report at Ctr.no.1530/25.05.1994, UPB Bucharest - ICDVPH- Bucharest);
- [3]. Căsândroi T., Ivănescu D. (2009), *Theoretical aspects on mathematical modelling of the maximum allowable static compression received to no mechanical injury in apples*, MOCM, volume 15 (2), Alma Mater Publishing House, Bacău, pp.29-38;
- [4]. Fridley R.B., Adrian P.A. (1966), *Mechanical properties of peaches, pears, apricots and apples*, Trans. Of the ASAE, volume 9(1), pp.135-138;
- [5]. Gherghi A., Iordăchescu C., Burzo I. (1979), *Maintaining quality of fresh vegetables and fruits*, Tehnica Publishing House, Bucharest;
- [6]. Milică C. I., Bărbat I. (1977) – *Vegetal physiology*, Didactical and Pedagogical Publishing House, Bucharest;
- [7]. Mohsenin N.N. (1970), *Physical properties of plant and animal materials*, Gordon and Breach Science Publishers, N.Y.;
- [8]. Nelson C.W., Mohsenin N.N. (1968), *Maximum allowable static and dynamic loads and effect of temperature for mechanical injury in apples*, J. Agric. Engng. Res., vol.13(4), pp.305-317;
- [9]. Ross J.J., Isaacs G.W. (1961), *Forces acting in stacks of granular materials (part I)*, Trans. Of the ASAE, 4(1), pp.92-96;
- [10]. Roudot A.C., Duprat F., Weinian C. (1991), *Modelling the response of apples to loads*, J. Agric. Eng. Res., vol.48, pp.249-259;
- [11]. Rumsey T.R., Fridley R.B. (1977), *Analysis of viscoelastic contact stress in agricultural products using a finite element method*, Transactions of the ASAE, vol.20(1), pp.162-167;
- [12]. Shahabasi Y., Segerlind L.J., Carroll N.J. (1995), *A simulation modal to determine the allowable depth for apples stored in bulk*, Transactions of the ASAE, vol.38(2), pp.587-591
- [13]. Yang W.H. (1966), *The contact problem for viscoelastic bodies*, Applied Mechanics Journal, pp.395-401.

Considerând pentru fruct, comportarea liniar vâscoelastică a corpurilor descrise de modelul fizic reologic a corpului Burgers, în lucrare se fundamentează o metodă de determinare experimentală a duratei de relaxare la solicitări statice de compresiune. Totodată utilizând testul de fluaj se prezintă un model matematic pentru descrierea comportării la compresiune statică a merelor necesar la prognozarea înălțimii de aranjare a fructelor în ambalaje, astfel încât să evite apariția vătămărilor mecanice pe durate de depozitare – păstrare, și a predicției duratei de depozitare în anumite ambalaje. S-a găsit un model mecanic și ecuația reologica corespunzătoare care să se potrivească curbei de fluaj experimentală, similară celei din fig.1b prin considerarea modelului Burgers (fig.1 a), în care curbele deformație – timp obținute cu acest model se suprapun. În consecință, această curbă simulează comportamentul fructelor de măr sub sarcină statică [3,10,13].

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Abbott J.A., R. Lu. (1996), *Proprietățile anizotropice mecanice ale merelor*, Transactions of the ASAE, vol.39(4), pag.1451-1459;
- [2]. Căsândroi T., Oprea N. (1994), *Cercetări experimentale privind evaluarea comportării la compresiune și la penetrare a unor soiuri de mere*, Raport șt.de cercetare, Ctr.1530/1994, UPB-ICDVPH-RA;
- [3]. Căsândroi T., Ivănescu D. (2009), *Aspecte teoretice privind modelarea matematică a compresiunii maxime statice permisibile care să nu vătămeze merele din punct de vedere mecanic*, MOCM, vol 15 (2), Ed. Alma Mater, Bacău, pag.29-38;
- [4]. Fridley R.B., Adrian P.A. (1966), *Proprietățile mecanice ale piersicilor, perelor, caiselor și merelor*, Trans. Of the ASAE, vol 9(1), pag.135-138;
- [5]. Gherghi A., Iordăchescu C., Burzo I. (1979), *Menținerea calității legumelor și fructelor în stare proaspătă*, Ed. Tehnica, București;
- [6]. Milică C. I., Bărbat I. (1977) – *Fiziologia vegetală*, Ed. Didactică Pedagogică, București;
- [7]. Mohsenin N.N. (1970), *Proprietățile fizice ale materialelor provenite din plante și animale*, Editura Gordon and Breach Science Publishers, N.Y.
- [8]. Nelson C.W., Mohsenin N.N. (1968), *Sarcinile statice și dinamice maxime permisibile și efectul temperaturii asupra vătămării mecanice a merelor*, J. Agric. Engng. Res., vol.13(4), pag.305-317;
- [9]. Ross J.J., Isaacs G.W. (1961), *Forțele care acționează asupra materialelor granulare sub forma de stivece acționând în stivece de granulare (partea I)*, Trans. Of the ASAE, 4(1), pag.92-96;
- [10]. Roudot A.C., Duprat F., Weinian C. (1991), *Modelarea răspunsului merelor asupra sarcinilor*, J. Agric. Eng. Res., vol.48, pag.249-259;
- [11]. Rumsey T.R., Fridley R.B. (1977), *Analiza solicitării de contact vasco-elastice asupra produselor agricole prin folosirea metodei elementelor finite*, Jurnalul Transactions of the ASAE, vol.20(1), pag.162-167;
- [12]. Shahabasi Y., Segerlind L.J., Carroll N.J. (1995), *Un model de simulare pentru a determina adâncimea permisibilă pentru merele depozitate în vrac*, Jurnalul Transactions of the ASAE, vol.38(2), pag.587-591
- [13]. Yang W.H. (1966), *Problema de contact pentru corpurile viscoelastice*, Revista de Mecanica Aplicata, pag.395-401.