

Akustiniai putinių ir poringųjų medžiagų tyrimo metodai

V. Minialga, A. Petrauskas

Kauno technologijos universitetas, Ultragarso mokslo institutas

Studentų g.50, 3031 Kaunas

Ivadas

Putinės ir poringosios medžiagos daugiausiai naudojamos maisto, kosmetikos, baldų pramonėje, šilumos izoliacijos sluokniuose, filtruose. Priklausomai nuo siekiamo tikslo joms keliami skirtingi reikalavimai. Tokių medžiagų parametrus įvertinti naudojami įvairūs metodai: optiniai, elektriniai, radioizotopiniai, mechaniniai, fotografiniai [1-6]. Dėl sudėtingų akustinių bangų sklaidimo sąlygų tokiose akytose struktūrose tiesioginiai akustiniai metodai naudojami retai. Dažnai akustinės bangos tokiose struktūrose gana smarkiai slopinamos. Tačiau taikant kombinuotus metodus ir netiesioginius matavimus, galima gana tiksliai nustatyti reikalingus putinių ir poringųjų medžiagų parametrus.

Putinės medžiagos gaunamos iplakant orą į skystąsias medžiagas arba dideliu statiniu slėgiu švirksčiant skystas medžiagas pro mažas skylutes arba tinklelius [1]. Gaminant putines maistines medžiagas (kremus), skystis (pvz., kiaušinio baltymo pagrindu) iplakant orą suskaidomas į burbuliukų, tarpusavyje atskirtų skysčio plėvele, struktūrą. Tam tikru plakimo momentu gauti burbuliukai būna smulkiausi, o sienelės tarp burbuliukų ploniausios. Tuomet masės tūris tampa didžiausias, o pati masė standžiausia. Praktiniam taikymui šis momentas yra labiausiai pageidautinas. Toliau plakant putas pradeda veikti sinerezės reiškinys [1], kai burbuliukai pradeda iš dalies irti, o skystis sienelėmis teka į plakimo indo dugną. Išplaktos masės tūris pradeda mažėti. Putų burbuliukų skersmuo šiuo atveju kinta nuo 1 iki 100 μm .

Poringosiose medžiagose storesnės ar plonesnės sienelės tarp burbuliukų yra kietos fazės. Jos gali būti elastingos (poliuretanai, porolonas) arba palyginti kietos (putų polistirolas). Pagrindinės tokių medžiagų, kaip poringų struktūrų, savybės yra dispersiškumas, kartotinumumas ir tankis.

Peržvelgsime kai kuriuos putinių ir poringųjų medžiagų parametrų įvertinimo metodų trūkumus.

Putų parametrus tirti, kai oras iplakamas į skystas mases, taikyti optinį metodą sudėtinga dėl taškymosi ir metalinių plakimo indo sienelių, kurios neleidžia peršviesti indo. Be to, optinių signalų perėjimą riboja plakimo indo dydis, nes šviesa sugerama, išsklaidoma ir pereina tik maža jos dalis. Perėjęs signalas dar moduluojamas besisukančios maišyklės.

Poringosiose medžiagose optinis metodas leidžia ištirti tik paviršinių sluoksnių, tačiau nesuteikia informacijos apie giluminę struktūrą.

Nors ir jautrūs, giluminiai radioaktyvieji metodai visose srityse ir ypač maisto pramonėje nepageidautini.

Mechaninio tyrimo ir fotografiniai būdai netechnologiški ir negali būti pritaikomi nepertraukiamame gamybos procese.

Tinkamiausi gali būti elektrinis ir akustinis tyrimo metodai.

Putoms elektrinis metodas nelabai tinka, nes gaminamoje putų masėje sukasi elektrai laidi maišyklė. Todėl jos sukimaši būtina sinchronizuoti su masę pereinančiais elektriniais signalais. Be to, besisukanti maišyklė virpa ir lankstosi. Dėl to susidaro gana didelės putų elektrinio laidumo matavimo paklaidos. Mūsų bandymai parodė, kad dėl putų cheminės sudėties kitimo tekant per jas elektros srovei tarp elektrodų ir maišymo indo sienelių plakimo metu susidaro papildomi laidūs kanalai. Dėl to atsiranda didelės matavimo paklaidos.

Panašiai susidarantys laidumo kanalai trukdo elektrinį metodą naudoti poringosioms medžiagoms tirti.

Taigi lieka akustiniai metodai ir šiuo atveju jie gali būti taikomi sėkmingiausiai. Plakant putas, indo sienelėje galima sužadinti Lembo bangas [7-32] arba, panaudojant indo sienelės kreivumą, siųsti susieinančias akustines bangas ir matuoti, kaip keičiasi perėjusių akustinių signalų parametrai [6,33-40]. Akustiniuose bandymuose vidinės plakimo indo sienelės išlieka nepaliestos, mechaninis įsikūsimas į plakimo procesą yra minimalus.

Atskira akustinių matavimų sritis - aidolokaciniai putų lygio inde matavimai per orą. Juose putų ir poringųjų medžiagų kartotinumumas matuojamas bekontakčiu metodu iš viršaus [41-51]. Tai leistų automatizuoti plakimo procesą, nes matavimai greitaveikiai, vyksta keliolika kartų per sekundę. Siekiant išvengti lygio matavimams trukdančio maišyklės judėjimo poveikio, įvertinamas tik vidutinis putų lygis, nes plakimo metu putų paviršius būna nelygus ir ilgainiui keičiasi.

Didelio tikslumo lygmatį pavyko pritaikyti ir poringųjų medžiagų vidinei struktūrai tirti [6, 33-40]. Šiuo atveju matavimas netiesioginis, nes įvertinamas į poringąją medžiagą įsiskverbiančio skysčio kiekis, ir iš jo kiekio bei kitimo sprendžiama apie paviršinę ir vidinę tiriamojo pavyzdžio struktūrą.

Lygio matavimams šiuo atveju gali būti panaudotos akustinės antenos su skenuojama kryptingumo diagrama. Norint pasiekti ypač mažas paklaidas, reikia parinkti geriausią vietą akustiniam lokatoriui įrengti [6, 33-40].

Putų ir poringųjų medžiagų fizinės-mechaninės charakteristikos ir jų įvertinimas

Pagrindinės putų ir poringųjų medžiagų fizinės-mechaninės charakteristikos yra dispersiškumas, kartotinumumas (tankis), o putinių medžiagų - dar ir išsilaukimo trukmė [1]. Poringosios medžiagos

kartotinumai yra atvirščias dydis tankiui ir apibūdina santykinį dujų ir burbuliukų sienelių tūrį dispersinėje sistemoje. Poringosios medžiagos tankis [1]

$$\rho_P = (m_d + m_{sk})/V_P = [\rho_d V_d + \rho_{sk} V_{sk}] / V_P, \quad (1)$$

čia m_{sk} ir m_d - atitinkamai sienelės medžiagos ir dujų masė; ρ_{sk} , ρ_d - sienelės medžiagos ir dujų (oro) tankiai.

Kadangi sienelės medžiagos tankis daugiau kaip tūkstantį kartų didesnis už oro tankį ($n > 1000$), tai

$$\rho_P \approx \rho_{sk} V_{sk} / V_P = \rho_{sk} / n. \quad (2)$$

Paprasčiausias būdas putų tankiui nustatyti yra tiesioginis gautų putų tūrio matavimas ir skysčio tūrio (arba masės) putose matavimas.

Poringųjų medžiagų kartotinumai:

$$n = V_{Pmaks} / V_{sk}. \quad (3)$$

Poringųjų medžiagų tankis:

$$\rho_P = (\rho_{sk} V_{sk0}) / V_{pm} = m_{sk0} / V_{pm}, \quad (4)$$

čia V_{pm} - poringosios medžiagos tūris, putų atveju - didžiausias putų tūris; V_{sk0} , m_{sk0} - kietosios medžiagos tūris ir masė, putų atveju - tirpalo tūris ir masė.

Poringųjų medžiagų kartotinumai nustatomi netiesioginiu elektros laidumo matavimo metodu [4,5]:

$$n = X_{sk} / (X_P B), \quad (5)$$

čia X_{sk} , X_P - atitinkamai kietosios medžiagos ir poringosios medžiagos santykinis laidumas, putų atveju - atitinkamai skysčio ir putų santykinis laidumas; B (=1,5...3) - poringosios medžiagos arba putų formos koeficientas.

Poringosios medžiagos arba putų kartotinumai nustatomi netiesioginiu radioizotopiniu metodu [2,3]:

$$n = \rho_{sk} / \rho_P = [\ln(N_0 / N_{sk})] / [\ln(N_0 / N_P)], \quad (6)$$

čia N_0 , N_P , N_{sk} - atitinkamai impulsų skaičius, perėjęs per tuščią indą, poringą medžiagą užpildytą tarpą ir kietą medžiagą arba skystį užpildytą tarpą.

Poringosios medžiagos ir putas taip pat apibūdinamos porų arba burbuliukų sudarančių putas, dydžiu. Vienas iš tiesioginių jo įvertinimo būdų yra poringosios medžiagos mikrofotografavimas. Šiuo būdu galima gauti informaciją ne tik apie porų ir burbuliukų pasiskirstymą pagal skersmenį, bet ir porų formą bei jų briaunų ilgį. Poros ir putas fotografuojamos tiesioginėje arba atspindėjusioje šviesoje padidinant 10...100 kartų. Metodas labai gaislus.

Kita metodų grupė putų dispersiškumui nustatyti pagrįsta priklausomybe tarp santykinio putų paviršiaus ir vidutinio perteklinio kapiliarinio slėgio putų burbuliukuose [1]. Santykinis putų paviršius apskaičiuojamas pagal formulę

$$\varepsilon = 3\Delta p_\infty / 2\sigma, \quad (7)$$

čia Δp_∞ - slėgis išmatuotas manometru po putų suirimo; σ - paviršinio įtempimo koeficientas.

Pažymėtina, kad daugelis išraiškų poringųjų medžiagų ir putų fiziniams-mechaniniams charakteristikoms apskaičiuoti, koreguojamos pataisos koeficientais, įvertinančiais pasirinktą matavimo metodą. Išraiškos

geriausiai tinka palyginimams tiriant, kaip keičiasi medžiagų fizinės-mechaninės savybės. Tačiau jos netinka poringųjų ir putinių medžiagų gamybos automatizavimo ir valdymo skaičiavimams.

Putinių medžiagų tankis (kartotinumai) nustatomas pagal masės tūrio padidėjimą. Kai medžiaga yra pastovios žinomos formos inde, jos tūris gali būti nustatomas pagal putų lygį inde. Toks tankio matavimo būdas yra paprastas ir palyginti patogus. Galima paminėti kontaktinius būdus lygiui matuoti, panaudojant plūdes [50-54], kontaktinius mikrometrus ir kontaktinius profilometrus [53-54]. Praktiškesni ir tikslesni yra talpiniai matavimo metodai [35, 50-54]. Talpinių matuoklių davikliai gali būti dviejų lygiagrečių cilindrinės arba plokštelių formos elektrodų. Matuojant putinių medžiagų lygį plakimo induose, vienas elektrodas gali būti plakimo indas arba maišyklė, o kitas elektrodas įtaisomas virš maksimalaus putų lygio. Kondensatoriaus talpa

$$C = \varepsilon_p \cdot \varepsilon_o \cdot Q / [d\varepsilon_p - h(\varepsilon_p - 1)], \quad (8)$$

čia ε_p , ε_o - atitinkamai putų ir oro dielektrinės skverbtys; Q - elektrodų plotas; d - atstumas tarp elektrodų; h - putų sluoksnio storis.

Tačiau dielektrinė skverbtis labai priklauso nuo aplinkos drėgmės, temperatūros, išorinių elektrinių trikdžių, elektrodų užterštumo, todėl putų lygiui matuoti talpiniai metodai netinka.

Atskira grupė išskiriami spektrometriniai matavimų metodai. Tai metodai, sukurti panaudojant matavimo informacijos nešėjus – akustines ir elektromagnetines bangas [36, 40, 51, 55]. Šios grupės metodai pasižymi gana dideliu matavimo tikslumu, kadangi banginių procesų parametrų matavimai yra gerai išsivystę, o pradiniai informacijos nešėjų duomenys (laikas, dažnis, amplitudė, fazių skirtumas) gali būti nesunkiai stabilizuoti ir išmatuoti. Techniniuose matavimuose labiausiai paplitę laikiniai signalų matavimai, signalų amplitudės monochromatiniai ir spektriniai matavimai, signalų interferencijos matavimo metodai. Iš šių metodų sudėtingiausi yra spektriniai ir interferencijos metodai. Tačiau juos sunkoka naudoti gamyboje veikiančių elektromagnetinių ir akustinių trikdžių aplinkoje. Todėl svarbesni yra laikiniai ir amplitudiniai signalų parametrų matavimo metodai. Šie metodai ypač patrauklūs naudojant, pavyzdžiui, įvairaus dažnio akustines bangas, kadangi jų sklaidimo greitis yra palyginti nedidelis [7] (apie 300 m/s dujose, apie 1500 m/s skysčiuose ir apie 5000 m/s kietuosiuose kūnuose).

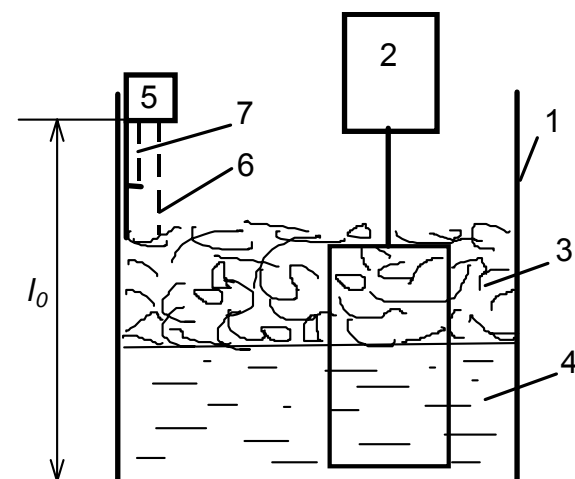
Akustinių metodų taikymas poringosioms ir putinėms medžiagoms tirti

Putų gamybos metu, kai į skystį įplakama dujų, putų lygis plakimo inde pradeda kilti ir tam tikru momentu pasiekiamas aukščiausias lygis, atitinkantis geriausią putų masės paruošimą. Lygio padidėjimą labai patogiu matuoti akustinės lokacijos metodu [37 - 39]. Šiuo atveju matavimo keitiklis įtaisomas virš plakimo indo. Esant pastoviam atstumui l_0 nuo keitiklio iki plakimo indo dugno (1 pav.), putų lygis inde gali būti išreiškiamas lygtimi

$$l = l_0 - \tau c_0 / 2, \quad (9)$$

čia τ - akustinio impulso sklidimo trukmė nuo keitiklio iki putų paviršiaus ir atgal; c_0 - akustinio impulso sklidimo greitis dujose.

Matavimo šiuo būdu rezultatas nepriklauso nuo putų fizinių-mechaninių savybių tiesiogiai, nėra mechaninio kontakto su matuojamuoju paviršiumi. Matavimo paklaida, atsirandanti dėl dujų temperatūros, drėgmės, sudėties kitimo, kompensuojama įrengiant pavyzdinį (etaloninį) kanalą.



1 pav. Putų lygio plakimo inde matavimo ultragarsiniu lygmačiu schema; 1 - plakimo indas, 2 - maišyklė, 3 - putų sluoksnis, 4 - plakamas skystis, 5 - aidolokacinis ultragarsinis matuoklis, 6 - matavimo kanalas, 7 - pavyzdinis kanalas

Kadangi plakimo metu putų paviršius nėra stacionarus, tai priklausomai nuo maišyklės formos, greičio ir indo formos, duomenys apie putų lygį kaupiami matuoklio procesoriuje, atsimenant didėjančias reikšmes. Kai putų lygis 10 sekundžių laikotarpiu nebedidėja, plakimas sustabdomas. Šis laikas gali būti nustatytas ir kitoks.

Mūsų sukurtas universalus (procesoriaus 8031 pagrindu) dvikanalis aidolokacinis ultragarsinis matuoklis, turintis programuojamos trukmės žadinimo impulsų generatorių ir grįžtančių signalų imtuvą, pagal pasirinktą algoritmą apdoroja matavimo ir etaloninio akustinių signalų sklidimo trukmės intervalus. Priklausomai nuo naudojamų keitiklių, perprogramuojant matuoklį, gaunamas arba aidolokacinis atstumo matuoklis su etaloniniu kanalu, arba akustinių bangų sklidimo trukmės tiriamosiose terpėse matuoklis. Taigi prietaisas gali būti panaudotas plakimo procesui automatizuoti gamybinėmis sąlygomis.

Remiantis kitu metodu, plonasieniuose induose esančių putinių medžiagų tankiui nustatyti gali būti panaudotos Lembo bangos [11], nes jos gali sklirti įvairios formos plonasienių indų sienelėmis.

Lembo bangų generavimas ir sklidimas plokštelėse, esančiose dujose ir vandenyje, gana plačiai išnagrinėti straipsniuose [9-15, 18-30]. Tačiau Lembo bangų sklidimas plokštelėse, viena puse susiliečiančiose su putomis, mūsų duomenimis, nebuvo nagrinėtas.

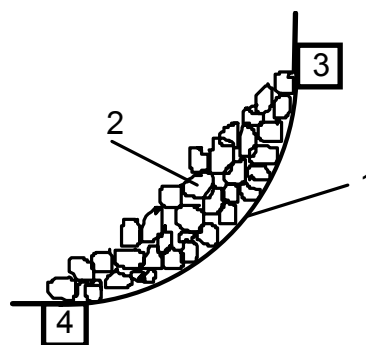
Lembo bangų sklidimą plokštelėje, panardintoje į skystį, galima analizuoti remiantis darbų [11, 18, 58]

rezultatais. Būdingoji lygtis simetrinei bangai gali būti tokia:

$$\begin{aligned} & (k_s^2 + \Psi_s^2)^2 \operatorname{cth}(\Phi d / 2) - 4k_s^2 \Phi_s \Psi_s \operatorname{cth}(\Psi d / 2) = \\ & = i \left[\rho_0 k_T^4 \Phi_s / \rho (k_0^2 - k_s^2)^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Antisimetrinei bangai būdingoji lygtis užrašoma pakeičiant indeksą S į A . Dešinėje lygybės pusėje esantis narys parodo skysčio įtaką bangų sklidimui.

Tiriant putų parametrus, Lembo bangos siunčiamos plonasienio indo, kurio viduje yra putos, sienele (2 pav.).



2 pav. Putų parametrų tyrimo Lembo bangomis plonasieniame plakimo inde schema, žiūrint iš viršaus: 1 - plakimo indo sienelė, 2 - putų masė indo viduje, 3 - Lembo bangų siuntiklis, 4 - Lembo bangų ėmiklis

Pritaikydami Lembo bangų slopinimo koeficiento išraišką, gautas plokštelėms, susiliečiančioms su skysčiais [58], putų atvejui, kai

$$\tan \left[(2\pi f / c_0 c_{s0}) \cdot (c_{s0}^2 - c_0^2)^{1/2} ((d/2) + h) \right] = 1, \quad (11)$$

gauname S_0 ir A_0 modų bangų slopinimo koeficientus:

$$\alpha_{S0} = (\rho_0 \pi^2 \mu^2 f^2 d c_0) / \left[2 \rho c_{S0}^2 (1 - \mu) (c_{S0}^2 - c_0^2)^{1/2} \right], \quad (12)$$

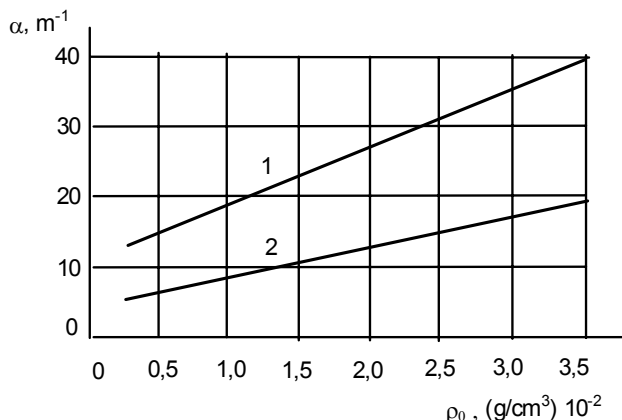
$$\alpha_{A0} = (\rho_0 c_0) / \left[4 \rho d (c_{A0}^2 - c_0^2)^{1/2} \right]. \quad (13)$$

(12) ir (13) išraiškos turi prasmę, kai $c_{A0} > c_0$ ir $c_{S0} > c_0$. Sąlyga $c_{S0} > c_0$ tenkinama visada. A_0 bangos greičiui kintant nuo 0 iki c_R (Reilio bangų greitis), slopinimo koeficientas gali būti ir menamas. Iš (12) išraiškos matyti, kad išilginei S_0 Lembo bangai α_{S0} yra tiesiai proporcingas putų tankiui ρ_0 ir indo sienelės storiui d . Iš (13) išraiškos matome, kad lankstymosi bangai A_0 slopinimo koeficientas α_{A0} tiesiogiai proporcingas putų tankiui ρ_0 ir atvirkščiai proporcingas indo sienelės storiui d .

3 pav. pateiktos apskaičiuotos 200 kHz dažnio antisimetrinių A_0 modos Lembo bangų begalinėse plieninėse plokštelėse slopinimo priklausomybės nuo putų tankio ρ_0 .

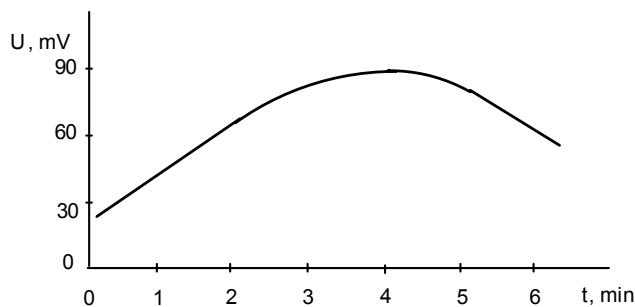
Kai indo sienelės storis duotas (praktikoje tai yra taisyklė), abiem atvejais slopinimo koeficientas tiesiog proporcingas putų tankiui ρ_0 . Tačiau įvertinant palyginti mažą putinių medžiagų tankį (apie 100 kartų mažesnis,

negu skysčių) didesniems akustinių signalų pokyčiams gauti naudotinos A_0 modos lankstymosi bangos. Naudojant matavimo sistemas praktikoje, tikslinga parinkti plakimo indus su kaip galima plonesnėmis sienelėmis.



3 pav. 200 kHz antisimetrinių A_0 modos Lembo bangų begalinėje plieninėje plokštelėje slopinimo priklausomybė nuo putų tankio ρ_0 : 1 - $d = 1,0$ mm; 2 - $d = 2,0$ mm

4 pav. parodyta eksperimentiškai gauta 200 kHz centrinio dažnio A_0 modos Lembo bangų slopinimo priklausomybė nuo laiko, 6 min. plakant kiaušinio baltymą. Kiaušinio baltymas buvo plakamas su mikserine maišykle 250 mm skersmens nerūdijančiojo plieno inde 1 mm storio sienelėmis.



4 pav. 200 kHz antisimetrinių A_0 modos Lembo bangų slopinimo priklausomybė nuo laiko, 6 min. plakant kiaušinio baltymą

Iš 4 pav. matyti, kad, matuojant Lembo bangų slopinimą, galima nustatyti kiaušinio baltymo išplakimo baigtumo momentą. Kai putų tankis mažiausias, Lembo bangų slopinimas yra mažiausias, o akustinio imtuvo priimto signalo amplitudė didžiausia. Šio eksperimento geriausias laikas - 4 minutės.

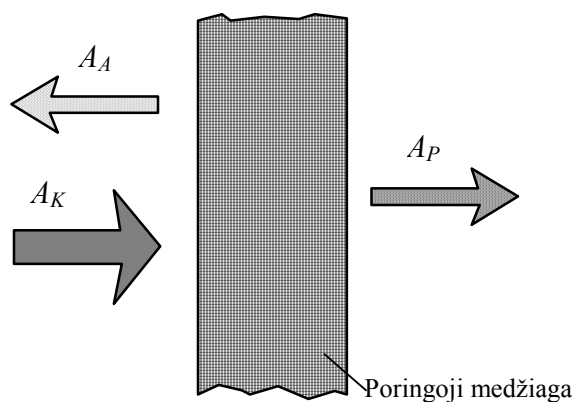
Poringųjų medžiagų parametrų įvertinimas akustiniais metodais

Poringosios medžiagos naudojamos šilumos ir garso izoliacijos sluoksniuose, baldų gamyboje, filtruose. Poringi yra daugelis maisto pramonės gaminių. Medžiagos korodavimo procesas taip pat yra kietos vienalytės medžiagos virtimas poringa nevienalyte mase. Šis pasikeitimas gali būti tiriamas kaip atskiras poringumo įvertinimo atvejis. Panašios poringos medžiagos yra ir kai kurie mineralai.

Poringųjų gaminių kokybei įvertinti naudojami ardomojo [5, 6] ir neardomojo tikrinimo [7, 8] metodai. Ultragariniai metodai savo ruožtu gali būti tiesioginiai [9] ir netiesioginiai [10].

Iš tiesioginių metodų paminėtinas ultragarsinių signalų parametrų pokyčių matavimas signalams pereinant per tiriamąją poringąją medžiagą. Kuo poringesnė medžiaga ir kuo didesnės jos poros, tuo ultragarsinių signalų parametrai oro aplinkoje keičiasi mažiau, esant tam pačiam tiriamosios medžiagos sluoksniui. Šis metodas gali būti pagerintas papildomai matuojant nuo poringosios medžiagos atsispindėjusius signalo parametrus. Jei matuojame tik atsispindėjusių signalų amplitudes A_A ir per medžiagą perėjusių signalų amplitudes A_P (5 pav.), tai medžiagos tankis ρ (g/cm^3) gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$A_A / A_P = 3,422 \cdot e^{15,3789 \cdot \rho} \quad (14)$$



5 pav. Amplitudžių pasiskirstymo, tiesiogiai matuojant poringosios medžiagos parametrus, schema

Netiesioginis metodas remiasi poringosios medžiagos savybe sugerti drėkinamąjį skystį. Porų užpildymas trunka tam tikrą laiko tarpą. Kai poringas bandinys panardinamas į skystį, palaipsniui keičiasi (mažėja) skysčio lygis. Lygio pokyčiai priklauso nuo medžiagos poringumo ir gali būti išmatuoti įvairiais metodais. Tarp šių metodų gali būti ir ultragarsinis aidolokacinis metodas [55-70].

Mes atskyrėme technologinę indo dalį, kurioje skystis įsigeria į bandinį, nuo tos dalies, kurioje matuojamas skysčio lygis (6 pav.). Ši schema leido išvengti trikdančiojo oro burbuliukų, išsiskiriančių iš poringo produkto, poveikio paviršiaus stabilumui. Tokioje dviejų indų konstrukcijoje matavimų paklaida sumažėja D/d kartų. Čia D yra didžiausias tiriamojo bandinio matmuo, d - matavimo indo skysčio lygiui matuoti skersmuo. Šis santykis mūsų naudojamame inde būna iki 30.

Sugerto skysčio tūris ΔV_S gali būti įvertintas naudojant lygtį

$$\Delta V_S = S \cdot \Delta l \quad (15)$$

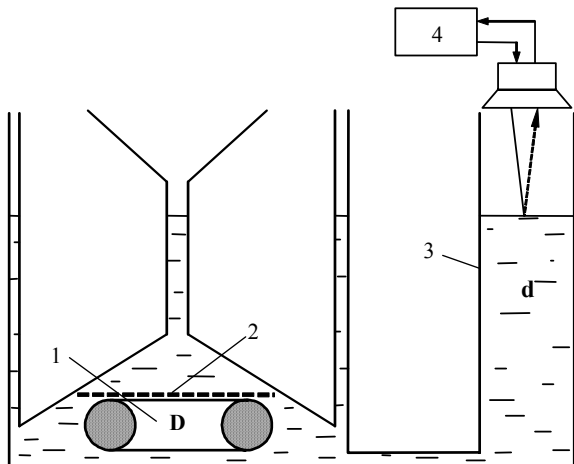
čia S - skysčio paviršiaus plotas, Δl - skysčio lygio pokytis.

Svarbūs skysčio išsiskverbimo reiškinio parametrai yra išsiskverbimo greitis ir jo pokyčiai, kol užpildomos visos poros. Kaip matyti iš (15) lygties, tūrio pokyčių ir skysčio lygio tarpusavio priklausomybė yra tiesinė, jei naudojame

cilindrinį indą, kai paviršiaus plotas nesikeičia. Taigi duomenis apie įgėrimo greitį galime surinkti iš skysčio lygio matavimų. Išanalizavus funkcijas

$$dl/dt = f_1(t) \text{ ir } d^2l/dr^2 = f_2(t), \quad (16)$$

galima spręsti apie poringosios medžiagos savybes ar korodavusios medžiagos dalies parametrus.



6 pav. Vandens sugėrimo matuoklio su ultragarsiniu lygio jutikliu schema: 1 - bandinys; 2 - bandinio prispaudimo tinklelis; 3 - susisiekiantis matavimo indas; 4 - ultragarsinis lygio jutiklis

Skysčio difuzijos į poringąjį bandinį tyrinėjimuose pirmu žingsniu ėmėme cilindrinį vienalytį kūną. Skysčio išsiskverbimo greitis priklauso nuo drėkinamo ploto. Taip pat tariame, kad skysčio išsiskverbimo greitis yra didesnis tuose tūriuose, kurių poringumas didesnis. Imant r_0 spindulio cilindro vienatinį ilgį, sugerto skysčio tūris priklauso nuo cilindro formos drėkinamo tūrio spindulio

$$V_S(t, r_0) = \pi v_d t (2r_0 - v_d t); \quad (17)$$

čia v_d - išsiskverbimo greitis, laikas ribojamas $t \leq r_0/v_d$.

Jei cilindro formos bandinys yra nevienalytis ir jo poringumas keičiasi gilyn nuo paviršiaus link centro, imame keletą poringumo kitimo išilgai cilindro spindulio r modelių. Kai poringumas nuo gylio priklauso tiesiškai, įsigėrimo greitis kinta pagal lygtį

$$v_d(r) = [v_{d1}(r_0 - r)/r_0] + v_{dp}; \quad (18)$$

čia v_{dp} - įsigėrimo greitis cilindro paviršiuje, v_{d1} - greičio mažėjimas išilgai spindulio. Sugertas skysčio kiekis šiuo atveju

$$V_{st} = \pi [v_{dp}t + (v_{dp}v_{d1}t^2)/(r_0 - v_{d1}t)] \times \\ \times \{2r_0 - [v_{dp}t + (v_{dp}v_{d1}t^2)/(r_0 - v_{d1}t)]\} \quad (19)$$

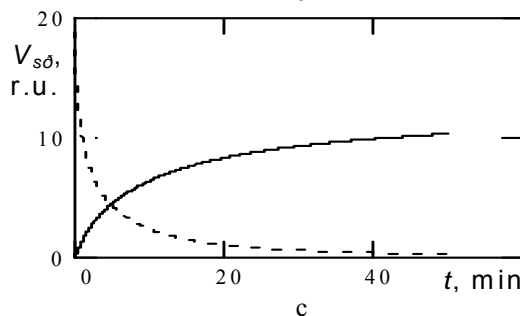
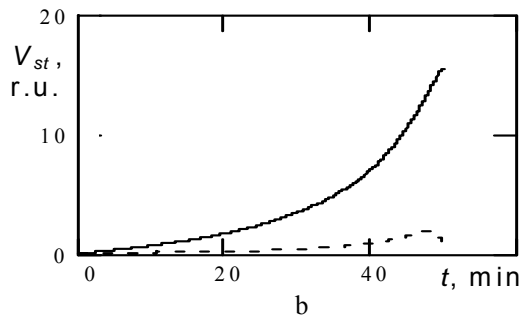
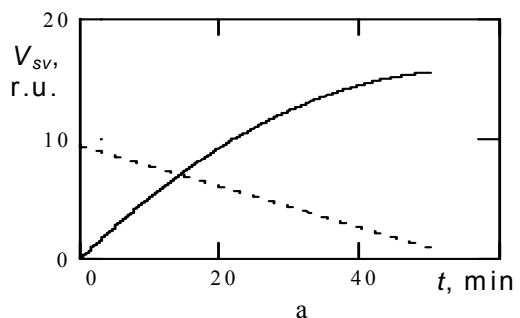
Tam tikromis sąlygomis poringumo parametrai nuo gylio priklauso netiesiškai. Imant išsiskverbimo greičio priklausomybę nuo gylio pagal kvadratinės šaknies dėsnį

$$v_{ds}(r) = v_{d2} [(r_0 - r)/r_0]^{1/2} - v_{dp} \quad (20)$$

čia v_{d2} - įsigėrimo greičio padidėjimas. Įsigėrusio skysčio tūris

$$V_{ss} = \pi \left\{ (v_{d2}/2r_0) \left[v_{d2}t \pm \left[(v_{d2}t)^2 + 4v_{dp}tr_0 \right]^{1/2} \right] + v_{dp} \right\} \times \\ \times \left\{ 2r_0 - t \left[(v_{d2}/2r_0) \left[v_{d2}t \pm \left[(v_{d2}t)^2 + 4v_{dp}tr_0 \right]^{1/2} \right] + v_{dp} \right] \right\} \quad (21)$$

Šios įsigėrimo greičio priklausomybės buvo sumodeliuotos matematiškai ir gautos sugerto skysčio tūrio priklausomybės nuo laiko. Kreivės pagal (17), (19) ir (21) lygtis parodytos 7 pav. a, b, c, išsistinėmis linijomis. Čia išilgai x ašies atdėtas laikas minutėmis, o išilgai y ašies santykiniais vienetais atdėtas sugertas skysčio tūris. Brūkšninėmis linijomis pavaizduotos tūrio kitimo išvestinės pagal laiką. Nors sugerto skysčio kiekis monotoniškai didėja visais trimis atvejais, tačiau išvestinių formos gerokai skiriasi. Vienalyčiu atveju (a) sugerto skysčio pokyčių greitis ilgainiai mažėja. Jei, einant į gylį, prasiskverbimo greitis didėja tiesiškai (b), tai tūris keičiasi gana vienodai. Kai įsigėrimo greitis priklausomai nuo gylio didėja pagal kvadratinės šaknies dėsnį (c), tūrio pokyčių greitis laikui bėgant mažėja netiesiškai.



7 pav. Vandens išsiskverbimo į gaminį kreivės, gautos pagal teorinį modelį

Kai poringumas, didėjant gyliui, mažėja, išsiskverbimo greitis taip pat mažėja pagal dėsnį

$$v_d(r) = v_{d1}r + v_{d0} \quad (22)$$

Jei pasirenkame, kad greitis išilgai spindulio didėja kaip kvadratinė šaknis, tai lygtis bus

$$v_{ds} = v_{d2}r^{1/2} + v_{d0}, \quad (23)$$

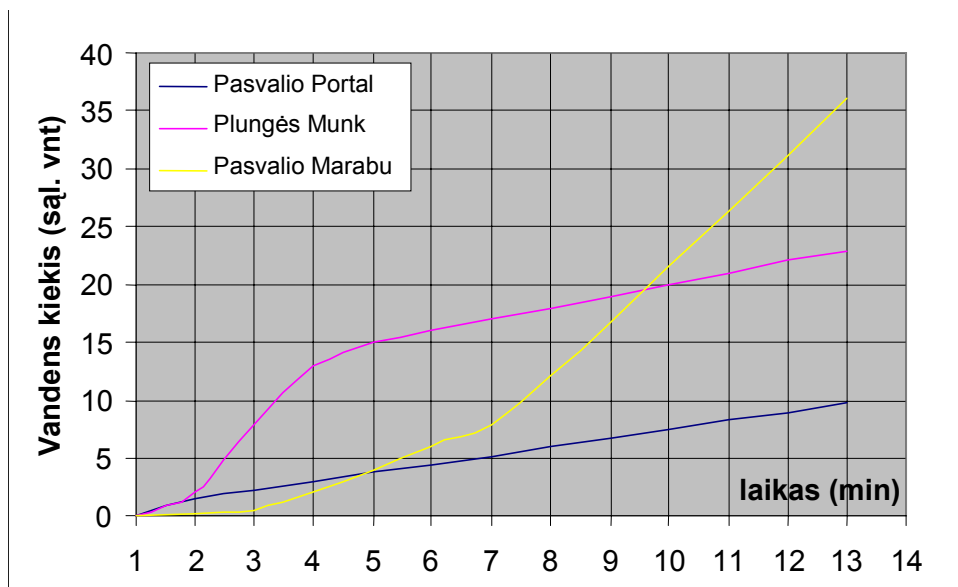
čia v_{d0} - prasiskverbimo greitis cilindro centre. Šiuo atveju modeliavimo eiga yra tokia pat, kaip ir ankstesniais atvejais.

Ekspirimentų rezultatai

Mūsų darbų tikslas buvo padidinti į skysčių įsiskverbimo į gaminius dinamikos įvertinimo tikslumą. Darbo metu patobulintas elektroakustinis matavimo stendas poringųjų medžiagų struktūrai tirti. Modernizuotas matavimo indas, optimizuojant gaminį stabilizuojančio tinklelio konstrukciją, įgalinančią pašalinti neigiamą iš gaminio išsiskiriančių oro burbuliukų įtaką matavimo rezultatams, ir kartu su KTU Maisto produktų katedros moksliniais bendradarbiais iširta įvairių Lietuvos regionų gaminama produkcija.

Dabartiniu metu tęsdami ultragarsinius aidolokacinio metodo tyrimus siekiame padidinti jo tikslumą ir tvirtinti jį Lietuvos standartuose. Darbe [68] esame pasiūlę poringųjų gaminių struktūrą vertinti pagal pirmąją ir antrąją per tam tikrą laiką įgerto į gaminį skysčio kiekio išvestines. Tuo išryškintas skysčių įsiskverbimas per gaminių paviršinę plėvelę ir įvairių poringumo defektų įtaką matavimo rezultatams. 7 pav. parodytas mūsų pasiūlyto aidolokacinio ultragarsinio metodo jautrumas, įvertinant skirtinguose regionuose užaugintų grūdinių kultūrų tinkamumą riestainių gamybai.

Naudojant mūsų pasiūlytą aidolokacinį ultragarsinį metodą poringųjų medžiagų struktūrai tirti [63,65] galima parinkti grūdų žaliavą geros kokybės riestainių gamybai. Nustatyta, kad tokios rūšies produkcijos gamybai labiausiai tinka grūdinė žaliava, kuri pagal dabartinę standartų sistemą priskiriama II kokybės klasei, kai glitimo kiekis sudaro 21-22 procentus, glitimo indeksas – 60 – 100 sąl. vnt. Tokius kokybės reikalavimus gerai atitinka žieminės veislės Portal, Kozak, Širvinta, Zentos, vasarinė veislė Munk. KTU Maisto produktų katedros bendradarbiai yra nustatę, kad, vertinant žaliavos tinkamumą riestainių gamybai, taip pat turi būti atsižvelgiama į kviečių sedimentacijos rodiklį.



7 pav. Įvairiuose Lietuvos regionuose užaugintų kviečių įtaka riestainių poringumui: į gaminį įsiskverbisio vandens kiekio kitimo dinamika

Išvados

Palyginti su kitais matavimo metodais, akustiniai metodai šiuo taikymo atveju turi nemažą privalumą ir gali būti naudojami automatizuojant technologinius procesus.

Matuojant vienalyčių poringųjų medžiagų tankį ore gali būti sėkmingai taikomas tiesioginis akustinių bangų metodas. Šiuo atveju matuojamos per medžiagą perėjusių ir nuo medžiagos atsispindėjusių ultragarsinių signalų amplitudės.

Netiesioginis ultragarsinis aidolokacinis metodas gali būti sėkmingai pritaikytas matuojant sudėtingų poringųjų struktūrų parametrus (poringos medžiagos ir sluoksniai iš

kietos medžiagos). Šis metodas taip pat gali būti pritaikytas termoizoliacijos medžiagų ir filtrų kokybei įvertinti bei tiksliems koroduotos medžiagos kiekiams pamatuoti.

Mažų atstumų aidolokaciniai ultragarsiniai lygmačiai, komponuojami su įvairia specialia matavimų technologijos įranga, gali būti taikomi medžiagų poringumui įvertinti ir tuo būdu sėkmingai taikomi maisto pramonės tiriamuosiuose darbuose.

Literatūra:

1. Кругляков П., Ексерова Д. Пена и пенные плёнки.-М.: Химия, 1990. С.432.

2. **Kenni J., Evans F.** Brit. Chem. Eng. 1962. V.7. N7. P. 498-502.
3. **Фокина Н., Кругляков П.** Определение кратности по теплоемкости пены. Отделение НИИТЭХИМ. Черкасы.1986.Деп. в ВИНТИ 01.12.1986. Нм 335.
4. **Kruger A.** VEDB-Zeitschrift. 1968. B. 17. N2. S. 54-56.
5. **John R.** Ibid. 1969. B. 18. N1. S. 25-30.
6. **Kažys R.** Neelektrinių dydžių matavimo metodai. Kaunas: Technologija. 1997. P.239.
7. **Рэлей Д.** Теория звука. М.: Гостехиздат.1955.Ч. 1-2.
8. **Джеффрис Г.** Сейсмология ядерных взрывов. М.: Мир. 1970.
9. **Бреховских Л.** Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973.С.343.
10. **Ландау Л., Лифшиц Е.** Механика сплошных сред. М.: Мир. 1953.С.788.
11. **Викторов И.** Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. М.: Наука. 1966.С.167.
12. **Sajauskas S.** Izotropinių kietų kūnų elektroakustiniai tyrimo metodai. Kaunas: Technologija. 1994. P.319.
13. **Викторов И.** Типы звуковых поверхностных волн в твердых телах. Акустический журнал. 1979. Т.25. Вып.1. С.1-17.
14. **White R. M.** Surface elastic waves. Proc. IEEE. 1970. V.58. N.8. P.1238-1276.
15. **Выборнов Б.** Ультразвуковая дефектоскопия. М.:Металлургия. 1974. С.752.
16. **Holland M., Clatborne L.** Practical surface acoustic waves devices. Proc. IEEE. 1974. V.62. N.5. P.45-83.
17. **Matnes J., Paaige E.** Surface acoustic wave components, devices and applications. Proc. IEEE. 1973. V.120. N.5. P.1078-1110.
18. **Викторов И.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука. 1981. С.288.
19. **Wavltton D.** Expermental conformation of Lamb waves of megacycle frequencies. J. Appl. Phys. 1961. V.32. N.6. P.15-19.
20. **Watkins R. et. al.** The attenuation of Lamb waves in the pressure of a fluid. Ultrasonic. 1982. V.20. N.6. P.257-264.
21. **Deighton M. et. al.** Mode conversion of Rayleigh and Lamb waves to compression waves at a metal-liquid interface. Ultrasonics. 1981. V.19. N.6. P.249.258.
22. **Dayal V., Kinra V.** Leaky Lamb waves in an anisotropic plate. J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V.85. N.6. P.2268-2276.
23. **Меркулов Л.** Затухание нормальных волн в пластинах, находящихся в жидкости. Акустический журнал. 1964. Т.10. Вып.2. С.206-212.
24. **Billy M. and al.** Measurements of backscattered leaky Lamb waves in plates. J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V.75. N.3. P.996-1001.
25. **Vrba J. Haering R. P.** Elastic waves in free plates Acoustic Soc. Amer. 1975. V.57. N.1. P.116-119.
26. **Atalar A., Koyme H.** Use of a conical axion as a surface acoustic wave focusing device. IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics and frequency Contr. 1987. V.UFFC 34. N.1. P.53-63.
27. **Sajauskas S. Zvanorius V.** Lembo lankstymosi bangų slopinimo akustiškai apkrautose plokštėse tyrimas. Moksl. techn. konf. "Technikos mokslų pasiekimai Respublikoje ir jų rezultatų diegimas" tezės. Kaunas. 1989. P.52-53.
28. **Sajauskas S. Zvanorius V.** Asimetrinio mechaninio apkrovimo įtakos plokštėlės lankstymuisi tyrimas. Moksl. techn. konf. "Ultragarsiniai matavimai ir diagnostika technikoje ir medicinoje" tezės. Kaunas. 1990. P.89.
29. **Akustinių bangų sąveikos su plonasieneis sluoksniuotomis struktūromis tyrimas.** KTU B1-157 ataskaita. Vad. V.Domarkas. Kaunas. 1991. P.89.
30. **Sajauskas S. Zvanorius V.** Investigation of propagation of acoustic wave in layered structure. Ultragarsas. 1993. Nr.25. P.23-33.
31. **Ingman A., Peter B.** Backscattering of leaky Lamb waves from fiber - reinforced composite laminates. J.Aconst. Soc. Am. 1986. Vol.80(S1). P.74.
32. **Wu J., Zhu Z.** The propogation of Lamb waves in aplate bordered with layers of a liquid. J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol.91 (2). P.861-867.
33. **Pactrick N.** Plane acoustic waves in linear viscoelastic porous media. J. Aconst. Soc. Am. 1991. Vol.89 (4). P.1532-1550.
34. **Thomas J.** Attenuation of sound in porous materials. J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol.91 (4). P.2378-2379
35. **Левшина Е. Новицкий Н.** Электрические измерения физических величин материалов и покрытий. М.:Химия. 1990. С.168.
36. **Измерения в промышленности.** Под ред. П.Профоса. М.:Металлургия. 1990. Т.1. С.490.
37. **Бражников Н.** Ультразвуковые методы. М.:Энергия. 1965. С.248.
38. **Колесников А.** Ультразвуковые измерения. М.:Издательство стандартов. 1970. С.236.
39. **Хамидуллин В.** Ультразвуковые контрольно измерительные устройства и системы. Ленинград:Энергоатомиздат. 1989. С.246.
40. **Кажис Р. -Й.** Ультразвуковые информационно - измерительные системы. Вильнюс:Мокслас. 1986. С.216.
41. **Бражников Н., Киселева В., Никитин Б.** Новый метод бесконтактной ультразвуковой уровнеметрии жидкостей. Измерительная техника. 1989. №9. С.46-50.
42. **Бабиков О.** Контроль уровня с помощью ультразвука. Л.:Энергия. 1971. С.238.
43. **А.с. 1462113 СССР.** Способ непрерывного измерения уровня жидких сред. Бражников Н. И др. Оpubл. В Б.И. 1989. №8.
44. **Бабиков О.** Ультразвуковые приборы контроля. Л.:Машиностроение. 1985. С.283.
45. **Gilepsie A.V. et. al.** A new ultrasonic technique for the measurement of liquid level. Ultrasonics. 1982. Vol.20. N.1. P.13-17.
46. **Pat. USA N 3884074.** GO1F 23/29.
47. **Крауткремер Й., Крауткремер Г.** Ультразвуковой контроль материалов. М.:Металлургия. 1991. С.752.
48. **Домаркас В., Пилецкас Э.** Ультразвуковая эхоскопия. Л.:Машиностроение. 1988. С.276.
49. **Фарзане Н. И др.** Технологические измерения и приборы. М.:Высшая школа. 1989. С.456.
50. **Спектров С.** Электрические измерения физических величин: Методы измерения. Л.:Энергоиздат. 1987. С.316.
51. **Измерения электрических и неэлектрических величин.** Под ред. П. Новицкого. М.:Энергоатомиздат. 1990. С.350.
52. **Электрические измерения неэлектрических величин.** Под ред. П. Новицкого. Л.:Энергия. 1975. С.576.
53. **Stasiulionis M., Urbonavičiūtė R.** Neelektrinių dydžių matavimas. Vilnius. 1981. P.63.
54. **Бражников Н.** Ультразвуковая фазометрия. М.:Энергия. 1968. С.236.
55. **Juodeikienė G., Petrauskas A.** Akustinio metodo taikymas poringu miltinių struktūrų tyrimui. Ultragarsiniai matavimai bei diagnostika technikoje ir medicinoje. Kaunas. 1989. P. 15-16.
56. **Juodeikienė G., Petrauskas A., Riedl O.** Application of ulltrasonics for the determination of wafer sheet texture. New trends in cereal food. Sum.13 Congr. ICC. Wienn. 1990.
57. **Juodeikienė G., Petrauskas A.** Die Möglichkeiten der Verwendung von Ultraschall bei der Texturmessung von Waffelblättern. Emerung/Nutrition. 1990. Vol.14. Nr.9. P.507-511.
58. **Juodeikienė G., Petrauskas A.** The usage of acoustic technique for the complex estimation of the cereal products texture. 9th Congress of Food Science and Technology Budapest. METE. Budapest. 1995. P.75.
59. **Juodeikienė G., Petrauskas A.** Grūdų produktų technologinio proceso optimizavimas akustine technika. IX pasaulio lietuvių mokslo ir kūrybos simpoziumo darbai. Vilnius:VPU leidykla. 1995. P.469.
60. **Juodeikienė G., Petrauskas A.** Grūdų produktų kompleksinis įvertinimas akustiniu metodu. Maisto chemija ir technologija. Lietuvos maisto instituto mokslo darbai. 1995 T. 29, Vilnius:ACADEMIA. 1996. P.14-18.

61. **Petrauskas A., Juodeikienė G., Bašinskienė L., Jakubauskienė L.** Aidolokacinio metodo taikymas poringų maisto gaminių tekstūros tyrimui. *Ultragarsas*. Kaunas: Technologija. 1996. Nr. 1(26). P.29-32.
62. **Petrauskas A.** KTU ultragarso instituto moksliniai darbai Lietuvos pramonei. *Radioelektronika*. 1994. T.30. Nr.1. P.146-154.
63. **Juodeikienė G., Petrauskas A., Bašinskienė L.** Evaluation of texture of meal products by echo location method. Quality cereals in a changing world. *KLM Official carrier*. Haga. 1994. P.73.
64. **Juodeikienė G., Petrauskas A.** Vaflių lakštų kokybės kontrolės būdas. LR patentas Nr. 2465. 1994. Išradimai. Biuletenis Nr. 1. P.10.
65. **Juodeikienė G., Petrauskas A., Bašinskienė L.** Miltinių kepinų kompleksinis tekstūros įvertinimas akustiniu metodu. Maisto produktų chemija ir technologija. Respublikinės konferencijos medžiaga. Kaunas: Technologija. 1994. P.114.
66. **Juodeikienė G., Petrauskas A., Bašinskienė L., Vaičiulytė L.** Komplexe Texturbewertung der Backerzeugnisse nach der akustischen Methode. 5 Tagung für Lebensmittelrheologie,-Detmold. Arbeitsgemeinschaft-Getraideforschung E.V. 1997. S.144-149.
67. **Juodeikienė G., Jakubauskienė L., Bašinskiene L., Petrauskas A.** Application of the echo-location method for estimation of baked goods. Cereal science - its contribution to health and well being. Book of abstracts. 16th ICC Conference Vienna, Austria. 1998. May 9-12. P.137.
68. **Minialga V., Petrauskas A., Razutis P.** Results of measurement of liquid absorption in porous materials by ultrasonic method. *Ultragarsas (Ultrasound)*. 2000. Nr 1(34). P.31-33.
69. **Petrauskas A., Razutis P.** Aidolokacinio ultragarsinio metodo tikslumo padidinimas ir taikymas medžiagų lygiui matuoti. *Ultragarsas (Ultrasound)*. 2001. Nr.4(41). P.18-21.
70. **Minialga V., Petrauskas A.** Acoustic echolocation method for evaluation of corrosion and porosity of materials. *Integral Des communications unabridged edition*. Congress Cofrend Controles non destructives CND and corrosion. Reims 2001. 24-26 April. P.M1-6.
71. **Minialga V., Petrauskas., Jakubauskienė L.** Development of ultrasonic method for quality estimation of porous products. *Ultragarsas (Ultrasound)*. 1999. Nr.1(31). P.25-27.

V.Minialga, A. Petrauskas

The acoustic methods for investigation of porous and foam materials

Summary

The acoustic method for investigation of structure of porous and foam materials is described. The porosity of materials is determined by measurement of amount of a liquid absorbed by the material during a fixed time interval. This amount is evaluated by means of precise measurement of changes of a liquid level in the vessel by the pulse echoultrasonic method. The absorption of the liquid into porous bodies was investigated by the method described. The data of changes of speed of absorption liquid in porous materials is presented.

The foam of materials was estimated by measurement of the changes of amplitude of the Lamb waves in the wall of the vessels.

This method for evaluation of porosity and foam by the measurements of speed of absorption may be useful in development of new production technologies of various porous and foam materials.

Pateikta spaudai 2002 10 17