

# Grūdų džiovinimas kintamu oro srautu

**Gediminas Pupinis**

Lietuvos žemės ūkio universiteto  
Žemės ūkio inžinerijos institutas,  
Raudondvaris, LT-54132 Kauno rajonas  
El. paštas: pupinis@mei.lt

Straipsnyje aprašomas naujas energijos taupymo metodas džiovinant grūdus kintamu oro srautu. Metodo esmė yra tai, kad džiovinimo metu mažėjant drėgmės atidavimui iš grūdų yra mažinamas ir per grūdus praeinančio oro debitas. Reguluojant pučiamo oro kiekį aktyviosios ventiliacijos įrenginiuose, geriau panaudojamos oro absorbcinės savybės ir atitinkamai sumažinama ventiliatoriaus naudojama galia. Elektros sunaudojimas (palyginus šį džiovinimo būdą su tradiciniu, kai oras tiekiamas nuolat) gali sumažėti iki 40 %. Tyrimams naudoti 'Roland' miežiai, kurių pradinis drėgnis 25 ir 30 %. Nustatyta, kad optimalus pradinis oro debitas  $800 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{h})$ . Grūdų džiovinimo metu oro debito mažinimas apibrėžiamas lygtimi  $\gamma = 969,85e^{-0,0114x}$ ,  $R^2 = 0,8088$ .

Pateikta sukonstruoti ir pagaminto eksperimentinio įrenginio schema. Nustatytas oro srauto intensyvumas ir drėgmės absorbcavimo dinamika džiovinamų grūdų sluoksnyje.

**Raktažodžiai:** grūdai, oro debitas, džiovinimas, drėgmės absorbcavimo dinamika

## ĮVADAS

Šiuo metu populiariausias grūdų konservavimo būdas mūsų šalyje yra džiovinimas, tačiau tai imliausia energijai operacija grūdų ruošimo technologinėje linijoje (Toftdahl Olesen, 1987). Ieškoma įvairių būdų šias išlaidas sumažinti: gaminamos specialios džiovyklos su kintančiu skerspjūviu (Novošinskas, Zvicevičius, 2000), naudojamos bevandenio amoniako dujos (Hsieh et al., 1975). Džiovinimo agentui (orui) pašildyti ir ventiliatoriams sukurti reikia daug energijos. Grūdams džiovinti reikia sunaudoti 2–2,5 karto daugiau energijos, negu grūdams užauginti (Анискин, 1987; Стрижак, 1980).

Energijos sąnaudos grūdams džiovinti šiuo metu naudojamomis technologijomis, atsižvelgus į prapučiamų grūdų rūšį, sluoksnio storį ir drėgnį, siekia 36,8–88,3 kWh/t (Petruševičius, Steponaitis 1999; Maltry et al., 1997).

Šiuo metu džiovinant grūdus aktyviaja ventiliacija lyginamasis oro debitas rekomenduojamas  $400\text{--}500 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{h})$  (Maltry et al., 1997; Petruševičius, 2003). Džiovinimo pradžioje, esant dideliame grūdų drėgniui, oro pašildymo galima atsakyti prapučiant per didelį oro kiekį, tačiau tolesnėje džiovinimo eigoje mažėjant džiovinamų grūdų drėgnumui, mažėja ir drėgmės atidavimas, o džiovinimo procesas tampa neekonomišku. Todėl džiovinimo eigoje būtina keisti pučiamo per grūdus oro debitą, stengiantis maksimaliai prisotinti prapučiamą orą drėgme ir maksimaliai sumažinti energijos sunaudojimą ventiliatoriams sukurti. Vis dėlto parinkus per mažą oro debitą labai užsitęs džiovinimo procesas ir iškilęs grėsmė grūdams sugesti. Leistiną grūdų išsilaikymo trukmę, neturinčios įtakos kokybei, galima nustatyti M. Eimer (Eimer, 1989) lygtimi

$$t_{leid} = a \varphi^b e^{\vartheta c}; \quad (1)$$

čia  $t_{leid}$  – leistina grūdų išsilaikymo trukmė;  
 $a, b, c$ , – pastoviosios,  $a = 6, b = -12, c = -0,08$ ;  
 $\varphi$  – grūdų sluoksnyje esančio oro santykinis drėgnis %;  
 $\vartheta$  – grūdų temperatūra °C.

Džiovinant grūdus gamybinėmis sąlygomis, kintant temperatūrai ir drėgniui, labai greitai keičiasi grūdų gedimo procesui įtakos turinčios sąlygos. Besikeičiančių sąlygų įtaką tyrinėjo W. Maltry (Maltry, Ziegler, 1994). Leistinam saugojimo laikui apskaičiuoti jis pateikia šią formulę:

$$t_{leid} = \int_{D=prad}^{D=pab} \frac{dt}{a \cdot \varphi(t)^b \cdot e^{c \cdot \vartheta(t)} \cdot [d_1 \cdot (\vartheta(t) - d_2)^{d_3}]}; \quad (2)$$

čia  $d$  – pastoviosios,  $d_1 = 0,0066, d_2 = 2,5, d_3 = 1,44$ .

Šiuo metu visuose naudojamuose aktyviosios ventiliacijos įrenginiuose pučiamo oro kiekis nėra reguliuojamas. Reguluojant pučiamo oro kiekį aktyviosios ventiliacijos įrenginiuose galima pasiekti geresnį oro absorbcinių savybių panaudojimo koeficientą  $\Delta$  ir atitinkamai sumažinti ventiliatoriaus elektros variklio naudojamą galią.

$$\Delta = (\Delta d - \Delta d_0) / \Delta d; \quad (3)$$

čia  $\Delta d, \Delta d_0$  – įeinančio ir išeinančio atmosferos oro santykinis drėgmės absorbcavimas, nustatomas pagal Molje diagramą, g/kg.

Esant nedidelėms  $\Delta$  reikšmėms atmosferos oras neprišotina drėgmės ir yra neefektyviai panaudojamas. Norint optimizuoti džiovinimo procesą, būtina kontroliuoti tiksliai du parametrus: tai įeinančio į džiovinamą medžiagą ( $\phi_0$ ) ir išeinančio iš jos oro santykinį drėgnį ( $\phi$ ). Jų reikšmės atvirkščiai proporcingos  $\Delta d$  ir  $\Delta d_0$ . Energiją taupantys režimai

pasiekiami esant  $\phi - \phi_0 > 15\%$  ( $\eta_{v,s} > 0,5$ ) pirmame džiovimo periode ir esant  $\phi - \phi_0 > 10\%$  ( $\eta_{v,s} > 0,35$ ) – antrame džiovimo periode. Elektros energijos panaudojimo efektyvumą sąlyginai apibūdina koeficientas  $\eta_{v,s}$ . Kuo didesnis  $\eta_{v,s}$ , tuo efektyviau naudojamas ventiliatorius. Džiūvimo eigoje  $\phi - \phi_0 \rightarrow 0$ , todėl antrajame džiovimo periode energijos panaudojimo koeficientas mažėja ir, norint efektyviai panaudoti elektros energiją, reikia mažinti per grūdus pučiamo oro kiekį. Tokiu būdu sumažėja praeinančio per grūdus oro greitis ir oras geriau prisotina drėgmės. Elektros sunaudojimas (palyginus šį džiovimo būdą su tradiciniu, kai oras tiekiamas nuolat) gali sumažėti iki 40 % (Автомонов, 2000).

Atlikti keičiamo oro greičio tyrimai nustatant optimalius režimus grūdų džiovyklose (Анискин, 1987; Стрижак, 1980). Tyrinėta oro greičio įtaka, esant įvairiems grūdų sluoksnio storiams, nustatant džiovimo trukmę, energetinį imlumą ir džiovimo kainą. Bandymai atlikti keičiant praeinančio oro greitį nuo 0,15 iki 0,96 m/s ir esant trimis grūdų sluoksniams: 0,1; 0,2; 0,3 m. Rezultatai pateikti analizuojant 0,2 m aukščio sluoksnį. Duomenys pateikti lentelėje.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad esant oro greičiui nuo 0,15 iki 0,42 m/s (grūdų sluoksnio aukštis 0,2 m) energijos sąnaudos išlieka tokios pat. Šio oro greičių diapazono santykis su džiovimo trukme yra atvirkščiai proporcingas. Analogiški rezultatai ir skirtingiems grūdų sluoksnio aukščiams (1 pav.).

Grūdų sluoksnio aukštis ir oro greitis yra tiesiogiai susiję su svarbiausiu džiovimo parametru: oro grūduose trukmės ir jo prisotinimo drėgme. Optimalus džiovimo agento greitis grūduose yra, kai džiovimo agentas absorbuoja į save drėgmę ir 100 % drėgnumą pasiekia pačiame aruodo

paviršiuje, jau išeidamas iš grūdų. Jeigu oras per grūdus pučiamas per greitai, jis nespėja prisotinti drėgmės. Esant per mažam greičiui, jis 100 % drėgnumą pasiekia dar būdamas viduryje aruodo ir eidamas per kitus aruodo sluoksnius ne tik neabsorbuoja drėgmės, bet ir atskirais atvejais drėgmę gali pernešti į viršutinius aruodo sluoksnius. Todėl džiovimo agento greitis kiekvienu džiovimo momentu turi turėti savo atitinkamą greitį, nes esant per dideliu pučiamo oro greičiui grūdai gali būti išnešami iš džiovyklos, arba džiovimo agentas išeis iš džiovyklos neprisotinęs drėgmės. Ir vienu, ir kitu atveju bus džiovinama neekonomiškai.

## METODAI IR SĄLYGOS

Tyrimai atlikti Lietuvos žemės ūkio universiteto Žemės ūkio inžinerijos institute (ŽŪII). Bandymams taikyta speciali laboratorinė džiovykla (2 pav.), skirta grūdų džiovimui tirti.

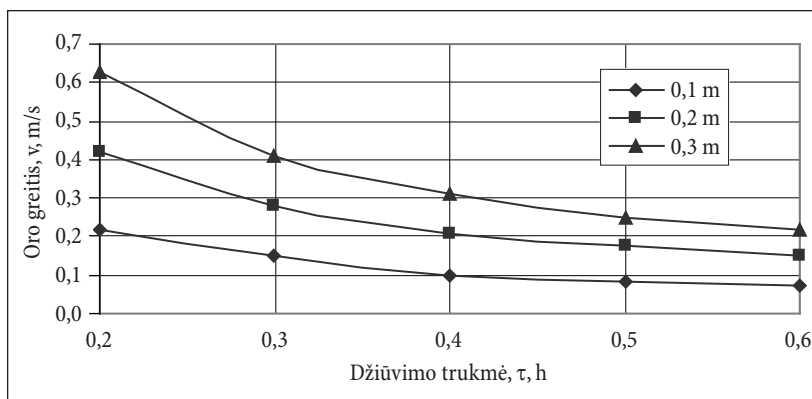
Oras į džiovyklą pučiamas dviem ventiliatoriais. Pirmasis ventiliatorius C-4-70 Nr. 2,5 (slėgis 700 Pa, našumas 2000 m<sup>3</sup>/h) skirtas per džiovyklą pūsti didesnę oro srautą (per 500 m<sup>3</sup>/h). Pučiamo oro srautas reguliuojamas sklendėmis. Antrasis ventiliatorius yra sukamas 27 V nuolatinės srovės variklio. Pučiamo oro kiekis reguliuojamas keičiant variklio sukimosi dažnį ir sklendėmis. Šis ventiliatorius jungiamas esant mažam pučiamo oro srautui (mažiau kaip 500 m<sup>3</sup>/h). Atitinkamai su šiais ventiliatoriais naudojami du dujų skaitikliai RG-40-1 ( $L_{min.} = 4$  m<sup>3</sup>/h,  $L_{max.} = 40$  m<sup>3</sup>/h) ir G6 ( $L_{min.} = 0,06$  m<sup>3</sup>/h,  $L_{max.} = 10$  m<sup>3</sup>/h). Statinis oro slėgis matuojamas mikromanometru MKB-250, tikslumo klasė – 0,02 taikant Pito vamzdelį. Džiovykla pagaminta iš 8 mm storio faneros. Norint sumažinti šilumos nuostolius per džiovyklos

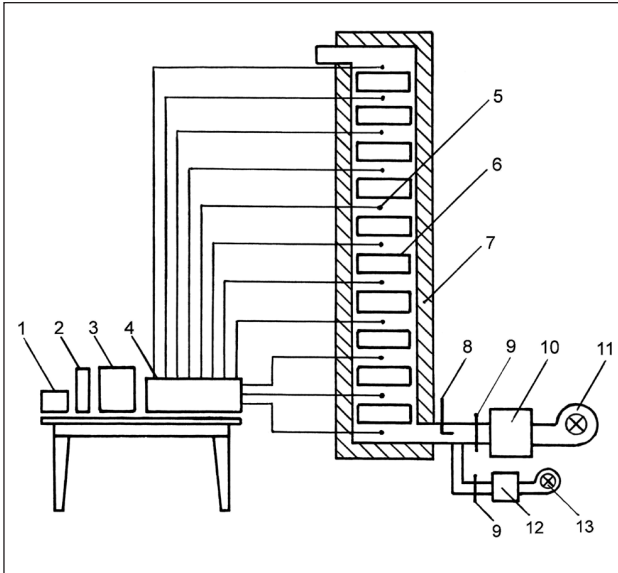
Lentelė. Džiūvimo trukmė ir energijos sąnaudos džiovinant pašarinius miežius (0,2 m aukščio sluoksniu esant pučiamo oro greičiui nuo 0,15 iki 0,96 m/s) (Автомонов, 2000)

Table. Drying duration and energy consumption when drying feeding barley in 0.2 meter layer at the velocity of air 0.15 to 0.96 m/s (Автомонов, 2000)

Oro greitis m/s Air velocity, h/s	0,15	0,23	0,32	0,42	0,5	0,57	0,68	0,96
Džiūvimo trukmė h Drying duration, h	0,57	0,36	0,26	0,20	0,18	0,16	0,14	0,10
Energijos sąnaudos kJ/kg Energy consumption, kJ/kg	4400	4250	4250	4280	4560	4724	4880	4900

1 pav. Oro greičio priklausomybės nuo džiovimo trukmės esant skirtingam grūdų sluoksnio aukščiui  
Fig. 1. Dependence of air velocity on drying duration at different grain layer heights





2 pav. Grūdų džiovavimo kintamu oro srautu tyrimo stendo schema. 1 – svarstyklės METLER S B; 2 – mikromanometras MKB-250; 3 – kompiuteris PENTIUM 166; 4 – registravimo įrenginys ALMEMO 5590-2; 5 – keitikliai FH646-1; 6 – džiovinami grūdai; 7 – džiovyklą; 8 – Pito vamzdelis; 9 – oro reguliavimo sklendės; 10 – dujų skaitiklis RG-40; 11 – ventilatorius C-4-70; 12 – dujų skaitiklis G6; 13 – ventilatorius

Fig. 2. Stand scheme of grain drying by changeable air flow. 1 – METLER S B scales; 2 – MKB-250 micromanometer; 3 – PENTIUM 166 computer; 4 – ALMEMO 5590-2 recording device; 5 – FH646-1 transducers; 6 – dried grain; 7 – dryer; 8 – Pito tube; 9 – air regulating bolts; 10 – RG-40 gas counter; 11 – C-4-70 fan; 12 – G6 gas counter; 13 – fan

sienelės, jos iš vidaus padengtos 50 mm storio putų plastik. Putų plastikas, norint išvengti masės mainų ir kad dalinai atspindėtų šilumą, padengtas metaline folija.

Priekinėje džiovyklos dalyje yra durelės, pro kurias į džiovyklą buvo įdedamos ir iš jos išimamos kasetės, padengtos putų plastik ir metaline folija. Džiovykloje telpa 10 kasečių, kurių kiekvienos aukštis – 100 mm. Taigi džiovykloje buvo galima tirti iki 1 m storio grūdų sluoksnio džiovimo procesą. Tarp kasečių yra tarpai, į kuriuos įdėti oro temperatūros ir santykinio drėgumo keitikliai FH646-1. Oro temperatūrą ir santykinį drėgnį fiksuoja registratorius ALMEMO 5590-2, kompiuteris PENTIUM 166. Masės kitimui fiksuoti naudojamos elektroninės svarstyklės METLER S B.

Ventiliatorių naudojamą galią  $P_t$  apskaičiuojame pagal formulę:

$$P_t = P / \eta_{vent.} \cdot \eta_{var.}; \quad (4)$$

čia  $P_t$  – ventiliatorių sunaudojama galia W,

$P$  – galia orui pūsti per grūdus W,

$\eta_{vent.}$  – ventiliatoriaus naudingumo koeficientas,

$\eta_{var.}$  – elektros variklio naudingumo koeficientas.

$$P = L \cdot p; \quad (5)$$

čia  $L$  – pučiamo oro debitas  $m^3/s$ ,

$p$  – oro slėgis Pa.

Tyrimams naudoti 'Roland' miežiai, kurių drėgnis  $W = 25-30\%$ . Drėgnis nustatytas (LŽŪII) Chemijos laboratorijoje pagal standartinę metodiką. Į džiovyklą pakrauta 16 kg miežių, kurie buvo supilti į kasetes 10 cm storio sluoksniu. Kiekviena kasetė su grūdais pasverta ir įdėta į džiovyklą. Užpildžius kasetes, uždaromos durelės, įjungiamas oro temperatūros ir santykinio drėgumo registratorius ir įjungiamas ventiliatorius. Registratorius oro temperatūrą ir santykinį drėgnį registravo kas 0,5 valandas.

Džiovyklą įrengta instituto laboratorijos patalpose, todėl pučiamo oro parametrai yra palyginti pastovūs. Pučiamo į grūdus oro temperatūra kito nuo 14 iki 17 °C, o drėgnis 45–65 %. Išeinančio oro drėgniui sumažėjus iki 85 %, mažintas pučiamo oro kiekis. Kasetės svertos kas 4 valandas arba keičiantis pučiamo oro parametrams. Procesui nusistovėjus kasetės svertos kas 12 valandų. Bandymas baigtas, kai grūdai pasiekia kondicinį 14 % drėgnį.

Tyrimai atlikti pučiant per grūdus pradinį oro kiekį  $2000 m^3 / (t \cdot h)$ ,  $1000 m^3 / (t \cdot h)$ ,  $500 m^3 / (t \cdot h)$ . Taip pat atlikti palyginamieji tyrimai išlaikant nustatytą pučiamo oro greitį, norint nustatyti energijos sąnaudas grūdams išdžiovinti.

## TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Analizuodami naują grūdų džiovavimo technologiją esant lyginamajam pučiamo oro debitui apie  $L = 2000 m^3 / (t \cdot h)$ , palyginimui panagrinėsime du būdingiausius bandymus. Pirmas bandymas – džiovinti  $W = 29,8\%$  drėgumo grūdai, kai pradinis lyginamasis oro debitas  $L_{prad.} = 2375 m^3 / (t \cdot h)$ , džiovimo eigoje jį mažinant, kol išeinančio oro santykinis drėgnis tapdavo mažesnis nei 85 %. Kitas bandymas – džiovinti  $W = 27,5\%$  drėgumo grūdai, kai vidutinis oro debitas  $L_{vid.} = 2017 m^3 / (t \cdot h)$ , stengiantis viso bandymo metu išlaikyti pastovų pučiamo per grūdus oro debitą ( $L = 2000 m^3 / (t \cdot h)$ ). Intensyviau grūdai džiuvo esant pastoviam oro debitui. Kaip kito pučiamo į džiovyklą oro lyginamasis debitas abiejų bandymų metu, parodyta 3 paveiksle.

Pirmuoju atveju oro debitas džiovavimo metu buvo mažinamas, pasiekus 85% išeinančio oro drėgnį. Oro debitą teko mažinti pirmąsias 20 džiovimo valandų. Lyginamojo oro debito mažėjimą geriausiai aprašo lygtis  $y = 6869,8x^{-1,053}$ ,  $R^2 = 0,928$ . Grūdai džiuvo tolygiai ir pučiamo oro lyginamasis debitas kito apie  $100 m^3 / (t \cdot h)$ . Praėjus 60 džiovimo valandų santykinis išeinančio oro drėgnis ėmė kristi ir bandymo pabaigoje siekė 70 %. Antruoju atveju bandymo metu išeinančio oro drėgnis bandymo pradžioje siekė 95 %, tačiau po 10 valandų išeinančio oro drėgnis ėmė kristi (po 30 valandų nukrito iki 60 %) ir toliau pastoviai mažėjo. Kaip matyti, pirmuoju atveju oras iš džiovyklos išeidavo aukštesnio santykinio drėgumo, tuo tarpu antrajame bandyme nevisiškai panaudotos oro absorbcinės savybės. Kai buvo keičiamas oro debitas, drėgmės absorbcimas bandymo pradžioje siekė iki  $3,5 g/m^3$  oro ir bandymo eigoje sumažėjo iki  $1 g/m^3$ . Tuo tarpu bandyme su pastoviu oro debitu jau po 30 valandų džiovimo drėgmės absorbcimas siekė  $1 g/m^3$  ir toliau mažėjo.

Taigi nebuvo panaudojamos oro absorbcinės savybės ir džiūvimo procesas vyko neekonomiškai.

Kiti bandymai atlikti džiovinant tos pačios rūšies grūdus per juos pučiant apie  $1000 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  oro debitą. Pirmajame bandyme buvo nuolat mažinama pučiamo lyginamojo oro debitas, o antrajame – išlaikomas pastovus. Grūdai intensyviau džiūvo džiovykloje, kurioje buvo pučiamas pastovus oro debitas. Džiovykloje su pastoviu oro debitu džiovinanti buvo baigta jau po 140 valandų, tuo tarpu džiovykloje su kintamu oro debitu džiovinanti buvo baigta po 180 valandų. Pučiamo į džiovyklą oro debitai parodyti 4 paveiksle.

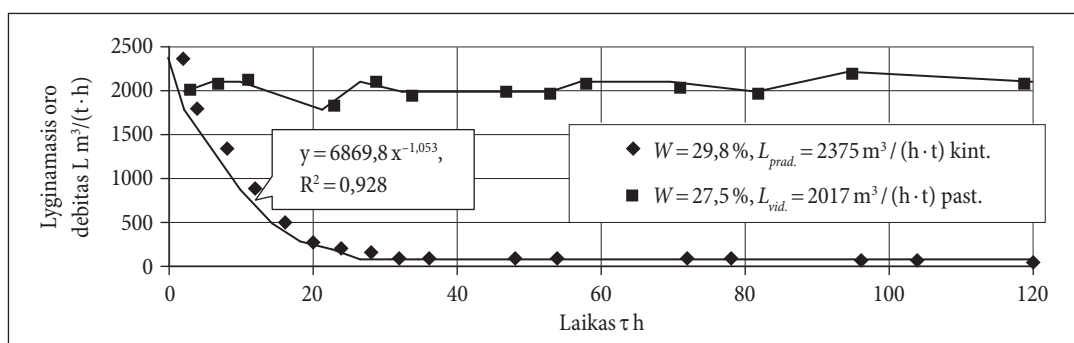
Kaip matyti, bandyme su pastoviu lyginamuoju oro debitu buvo pučiama vidutiniškai  $946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  oro. Esant kintamam oro debitui intensyviau džiovinama pirmąsias 10 valandų. Vėliau procesas vyko tolygiai, ir po 90 valandų išeinančio oro drėgnis sumažėjo iki 80 %. Džiūvimas perėjo į galutinę fazę. Lyginamojo oro debito mažėjimą geriausiai aprašo lygtis  $y = 969,85e^{-0,014x}$ ,  $R^2 = 0,8088$ . Pirmasis –

intensyvusis džiūvimo etapas gali būti paaiškintas lengvai išgarinama paviršine drėgme.

Džiovinant grūdus esant pastoviam  $946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  oro debitui, kaip kintamo debito atveju, drėgmės absorbcijai bandymo pradžioje siekė  $5,0\text{--}6,5 \text{ g/m}^3$ , per pirmąsias 10 valandų sumažėjo iki  $2,5\text{--}3,0 \text{ g/m}^3$  ir bandymo eigoje nuolat mažėjo (5 pav.).

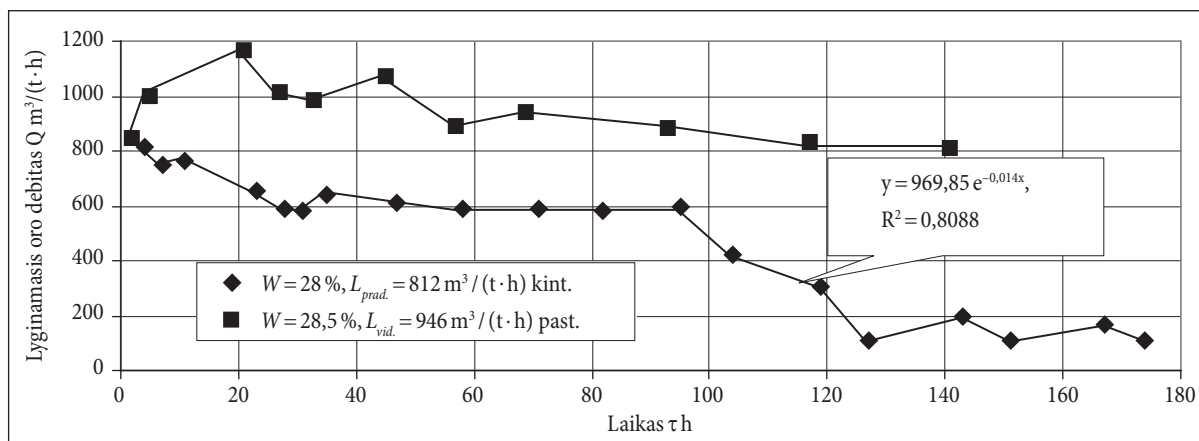
Esant pastoviam oro debitui tik pradiniam džiūvimo etape drėgmės absorbcijai buvo didesnis, nei esant kintamam oro debitui. Tai reiškia, kad mažinant oro debitą paviršiu geriau panaudoti oro absorbcines savybes. Džiovinant pastoviu oro debitu grūdai džiūvo apie 140 valandų, tuo tarpu džiovinant kintamu oro debitu džiovinimas užsitęsė iki 180 valandų. Tačiau ši džiūvimo trukmė nebuvo didesnė už ribinę pelėsių susidarymo trukmę.

Kiti bandymai atlikti džiovinant tos pačios rūšies grūdus, esant lyginamajam oro debitui, per juos pučiant apie  $500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  oro. Esant kintamam oro debitui pradinis



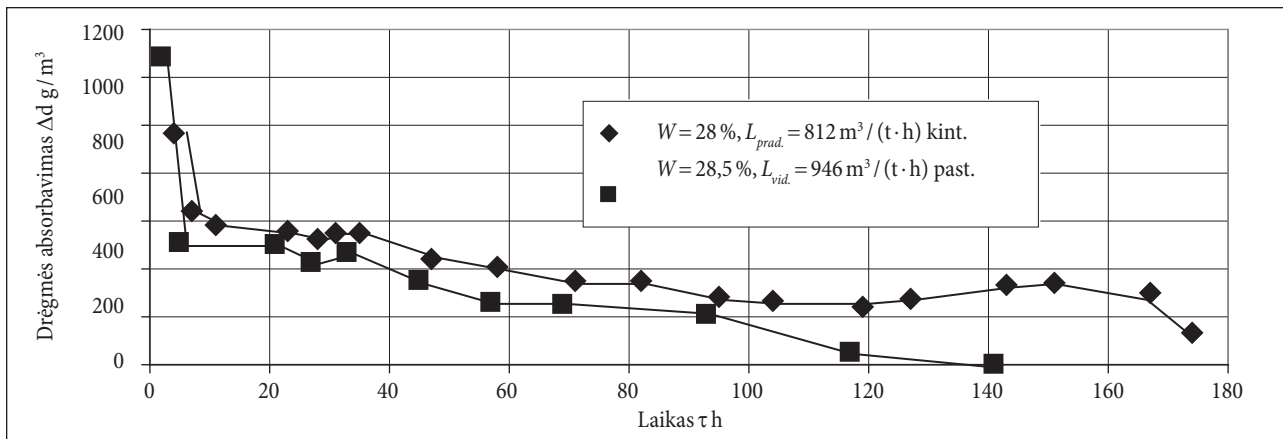
3 pav. Pučiamo į džiovyklą lyginamojo oro debito priklausomybė nuo laiko džiovinant 'Roland' miežius. 1 –  $W = 29,8\%$ , pučiamo oro debitas  $L_{\text{prad.}} = 2375 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . Jis džiovinimo metu buvo mažintas. 2 –  $W = 27,5\%$ , pučiamo oro debitas  $L_{\text{vid.}} = 2017 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , kuris džiovinimo metu pastovus

Fig. 3. Variation of air flow dependence on time when drying barley grain of 'Roland' variety. 1 –  $W = 29,8\%$  and air discharge blown  $L_{\text{initial}} = 2375 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . It was reduced during drying. 2 –  $W = 27,5\%$ , air discharge blown  $L_{\text{average}} = 2017 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , which was stable during drying



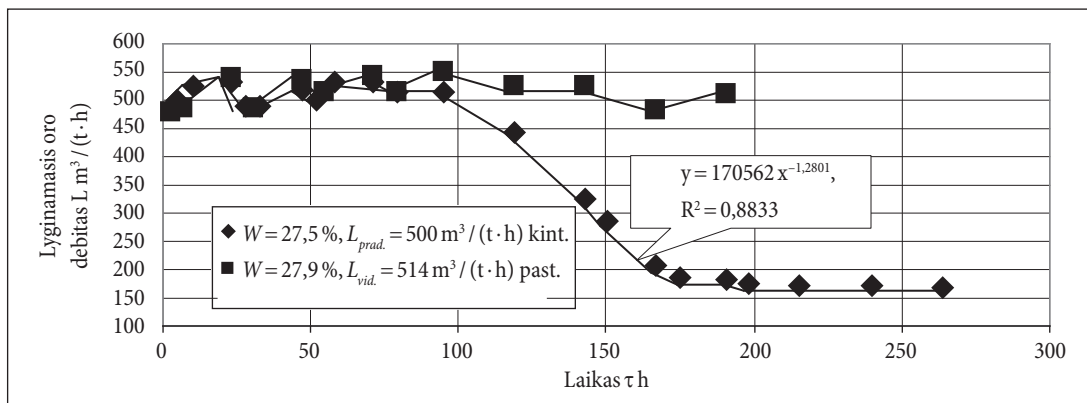
4 pav. Pučiamo į džiovyklą lyginamojo oro debito priklausomybė nuo laiko, džiovinant 'Roland' miežius. 1 –  $W = 28\%$  ir pradinis lyginamasis oro debitas  $L_{\text{prad.}} = 812 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . Jis džiovinimo metu buvo mažinamas. 2 –  $W = 28,5\%$ , lyginamasis oro debitas  $L_{\text{vid.}} = 946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , kuris džiovinimo metu pastovus

Fig. 4. Dependence of variation of air discharge blown into dryers on time when drying barley grain of 'Roland' variety. 1 –  $W = 28\%$ , initial comparative air discharge  $L_{\text{initial}} = 812 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . It was reduced during drying. 2 –  $W = 27,5\%$ , comparative air discharge  $L_{\text{average}} = 946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  was stable during drying



5 pav. Drėgmės absorbcijos kitimo priklausomybė nuo laiko, džiovinant 'Roland' miežius. 1 –  $W = 28\%$  ir pradinis lyginamasis oro debitas  $L_{\text{prad.}} = 812 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . Jis džiovinimo metu buvo mažinamas. 2 –  $W = 28,5\%$ , lyginamasis oro debitas  $L_{\text{vid.}} = 946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , kuris džiovinimo metu pastovus

Fig. 5. Dependence of variation of moisture absorption on time when drying barley grain of 'Roland' variety. 1 –  $W = 28\%$  and initial comparative air discharge  $L_{\text{initial}} = 812 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . It was reduced during drying. 2 –  $W = 28.5\%$ , comparative air discharge  $L_{\text{average}} = 946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  was stable during drying



6 pav. Lyginamojo oro debito kitimo priklausomybė nuo laiko džiovinant 'Roland' miežius. 1 –  $W = 27,5\%$  ir pradinis lyginamasis oro debitas  $L_{\text{prad.}} = 500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . Jis džiovinimo metu buvo mažinamas. 2 –  $W = 27,5\%$ , lyginamasis oro debitas  $L_{\text{vid.}} = 514 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , kuris džiovinimo metu pastovus

Fig. 6. Dependence of variation of air blown into dryers on time when drying barley grain of 'Roland' variety. 1 –  $W = 27,5\%$  and initial comparative air discharge  $L_{\text{initial}} = 500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . It was reduced during drying. 2 –  $W = 27.5\%$ , comparative air discharge  $L_{\text{average}} = 514 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  was stable during drying

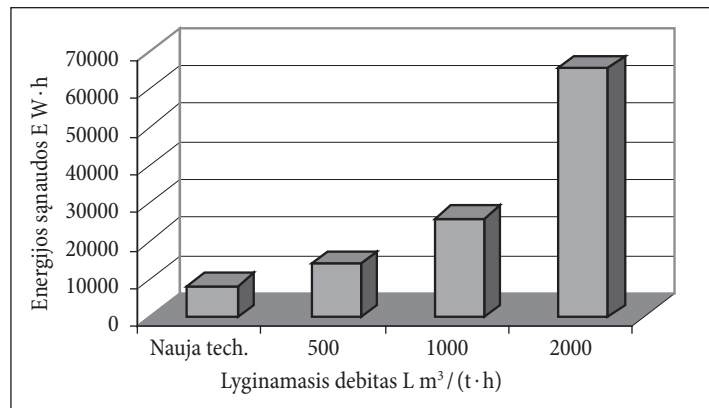
lyginamasis oro debitas  $L_{\text{prad.}} = 500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  ir grūdų drėgnis  $W = 27,5\%$ . Bandymas esant pastoviam lyginamajam oro debitui  $L_{\text{vid.}} = 514 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  atliktas su  $W = 27,9\%$  drėgnio grūdais. Džiūvimo eiga bandymo pradžioje buvo panaši ir grūdai abiejose džiovyklose džiūvo panašiu greičiu.

Praėjus 100 džiūvimo valandų abiejose džiovyklose išeinančio oro drėgnis pradėjo mažėti, todėl džiovyklose su kintamu oro debitu buvo pradėtas mažinti oro debitas. Po 100 valandų džiovinimo lyginamasis oro debitas buvo mažinamas. Mažinimo dydį geriausiai aprašo lygtis  $y = 170562x^{-1,2801}$ ,  $R^2 = 0,8833$ . Todėl išeinančio oro drėgnis išliko apie 80% iki 150 valandų ir po to palaipsniui ėmė mažėti. Tuo tarpu džiovyklose su pastoviu oro debitu jau po 95 valandų džiūvimo ėmė mažėti ir po 180 valandų pasiekė 60% drėgnį. Džiovyklose su kintamu oro debitu išeinančio

oro drėgnis tolygiai mažėjo ir po 264 džiūvimo valandų bandymas buvo baigtas. Bandymų pradžioje abiem atvejais drėgmės absorbcijoms buvo pakankamai didelis –  $6,2 \text{ g/m}^3$  ir  $8,1 \text{ g/m}^3$ . Praėjus 95 džiūvimo valandoms, drėgmės absorbcijoms džiovyklose su pastoviu oro debitu ėmė mažėti, tuo tarpu džiovyklose su kintamu oro debitu išliko toks pat ir ėmė mažėti praėjus 150 valandų.

Kai grūdai buvo džiovinami esant pastoviam lyginamajam oro debitui  $L_{\text{vid.}} = 2017 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , per džiovinamus grūdus buvo pūsta  $3842 \text{ m}^3$  oro, tuo tarpu antruoju atveju esant kintamam lyginamajam oro debitui  $L_{\text{prad.}} = 2375 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  –  $1987 \text{ m}^3$ . Atitinkamai energijos, sunaudotos orui pūsti, kiekis skiriasi beveik 5 kartus, t. y. pirmuoju atveju  $1042 \text{ W} \cdot \text{h}$ , o antruoju atveju  $409 \text{ W} \cdot \text{h}$ . Tai paaiškinama tuo, kad didėjant pučiamo per grūdus oro greičiui didėja aerodinaminis pasipriešinimas, todėl labai padidėja energijos sąnaudos.





7 pav. Energijos sąnaudos išdžiovinti vienai tonai 'Roland' miežių  
Fig. 7. Energy consumption for drying one tonne of 'Roland' barley grain

Parikalaujama galia prapūsti  $1 \text{ m}^3$  oro pirmuoju atveju buvo 8,7 W, o antruoju – 3,4 W.

Kiti bandymai buvo atliekami džiovinant grūdus esant lyginamajam oro debitui  $L = 1000 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ . Matyti, kad išdžiovinti 16 kg grūdų esant pastoviam lyginamajam oro debitui  $L_{\text{vid.}} = 946 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  buvo pūsta 2086  $\text{m}^3$  oro, tuo tarpu esant kintamam lyginamajam oro debitui  $L_{\text{prad.}} = 812 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  reikėjo pūsti tik 1349  $\text{m}^3$  oro. Todėl energijos sąnaudos šiam oro kiekiui pūsti sudarė atitinkamai 417,4 W · h ir 133,4 W · h, o galia pūsti vienam kubiniam metrui oro – atitinkamai 2,9 W ir 0,7 W.

Džiovinant grūdus, kai lyginamasis oro debitas  $L_{\text{vid.}} = 500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , buvo pūsta 1480  $\text{m}^3$ , o kai kintamas  $L_{\text{prad.}} = 500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  – 1051  $\text{m}^3$  oro. Todėl sunaudota energija šiam orui prapūsti buvo atitinkamai 221,9 W · h ir 115,8 W · h. Darbinė galia pūsti  $1 \text{ m}^3$  oro – atitinkamai 1,2 W ir 0,4 W. Energijos sąnaudos išdžiovinti 1000 'Roland' miežių, kai džiovinama esant skirtingiems oro debitams, parodytos 7 paveiksle.

Kai pastovus oro debitas  $L_{\text{prad.}} = 500 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$ , grūdai džiūvo apie 180 valandų, o esant kintamam oro debitui džiovinimas užsitęsė iki 264 valandų. Tačiau ši džiūvimo trukmė per ilga, kad grūdai būtų išdžiovinti be grūdų pelėjimo rizikos. Todėl kaip optimalų galima rekomenduoti  $800 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  pradinį lyginamąjį oro debitą ir 24 valandas juo džiovinti grūdus. Po 24 džiūvimo valandų lyginamąjį oro debitą sumažinti iki  $600 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  ir juo džiovinti dar 70 valandų. Tada sumažinti lyginamąjį oro debitą iki  $150\text{--}180 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  ir šiuo oro srautu pabaigti džiovinti grūdus.

## IŠVADOS

1. 'Roland' veislės miežiai pastoviu oro debitui  $L_{\text{prad.}} = 812 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  buvo džiovinami 180 valandų. Ši džiūvimo trukmė nebuvo didesnė už ribinę pelėsių susidarymo trukmę. Todėl šį oro debitą galima laikyti optimaliu džiovinant  $W = 28,5 \%$  drėgnio 'Roland' miežius.

2. Išdžiovinti  $W = 28,5 \%$  drėgnio 'Roland' miežius aplinkos orui pūsti reikia sunaudoti 8,3 kW · h/t energijos.

3. Rekomenduotinas  $800 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  pradinis lyginamasis oro debitas. Po 24 džiovinimo valandų lyginamąjį oro debitą galima sumažinti iki  $600 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  ir grūdus džiovinti dar 70 valandų. Paskui lyginamąjį oro debitą sumažinti iki  $150\text{--}180 \text{ m}^3 / (\text{t} \cdot \text{h})$  ir džiovinti, kol grūdai pasieks kondicinį 14 % drėgnį.

Gauta 2008 05 12  
Priimta 2008 10 20

## Literatūra

1. Eimer M. Konservierung und Lagerung von Getreide mit gesicherter Qualität // Proceedings of the 11th Int. Congress of Agriculture Engineering, Dublin, 4–8 Sept. 1989. Rotterdam Brookfield, 1989. Bd. 4. S. 2267–2273.
2. Hsieh R. C., Bakker-Arkema F. W., Cuppet S. L. et al. Ammonia assisted grain drying in fixed-bed systems // Trans. ASAE Paper. 1975. N 79–3075.
3. Maltry W., Ziegler Th. Simulation der instationären Trocnung von Saatgutschüttungen unter Nutzung von Sonnenergie. Potsdam–Bornim, 1994. S. 105–117.
4. Maltry W., Ziegler Th., Richter I. Mathematische Modellierung und Simulation der solar unterstützten Trocknung landwirtschaftlicher Schüttgüter. Potsdam–Bornim, 1997. S. 75–91.
5. Novošinskas H., Zvicevičius E. Grain drying in variable cross – section tank // Žemės ūkio inžinerija. LŽŪII ir LŽŪU mokslo darbai. 2000. T. 32(3). P. 61–68.
6. Petruševičius V. Pučiamo per grūdus oro lyginamasis debitas džiovinant aktyviaja ventilacija // Žemės ūkio inžinerija. LŽŪII ir LŽŪU mokslo darbai. 2003. T. 35(4). P. 22–29.
7. Petruševičius V., Steponaitis V. Energijos sąnaudos džiovinant grūdus aktyviaja ventilacija // Žemės ūkio inžinerija. LŽŪII ir LŽŪU mokslo darbai. 1999. T. 30(2). P. 19–30.
8. Toftdahl Olesen H. Grain drying. Innovation Development engineering ApS, 1987. P. 7–26.
9. Автомонов И. Я. Совершенствование технологии досушки сена активным вентилированием // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2000. № 1. С. 10–13.

10. Анискин В. И. Технологические основы сокращения топливно-энергетических ресурсов, используемых для сохранения влажного зерна в сельском хозяйстве // Совершенствование обработки и хранения на предприятиях АПК. Москва: ВИМ, 1987.
11. Стрижак С. В. Резервы энергосбережения при сушке зерна в вентилируемых бункерах. Челябинск: Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, 1980. С. 22–26.

Gediminas Pupinis

## GRAIN DRYING IN VARIABLE AIR FLOW

### Summary

A new energy saving method for grain drying is presented. The grain drying technology, changing the airflow blown through grains, has never been investigated in Lithuania, since there were no equipment to change the whirls of three-phase changing current electric engines. Now, when the equipment to change the frequency of the three-phase current, is available, there is a possibility to regulate the spinning frequency of grain blowers. The essence of the method is that during the drying period, when the moisture removal decreases, the air debit flowing through grains is also reduced. Barley 'Roland' grains of the initial moisture 25% and 30%, were used in the study. They were dried by changing air debit, in order to avail the absorption features of the air. When grain starts to dry, the airflow is reduced during the drying period, and the relative humidity flowing out of grains also decreases. The optimal initial air debit was  $800 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{h}$ . The reduction of air debit during the grain drying period is expressed by the function  $y = 969.85e^{-0.0114x}$ ,  $R^2 = 0.8088$ .

A scheme of the constructed and produced experimental equipment is presented. The intensity of airflow is established. The dynamics of moisture absorption in the drying grain layer is established.

**Key words:** grain, air debit, drying, dynamics of moisture absorption