

Ūkio inžinerija *Agricultural engineering* *Ūkio inžinerija*

Agrofito aplinkoje vykstančių energinių procesų termodinaminė analizė

Paulius Kerpauskas,

Povilas Algimantas Sirvydas

*Lietuvos žemės ūkio universitetas,
Studentų g. 15, Akademija,
LT-53361 Kauno rajonas,
el. paštas paulius.kerpauskas@lzuu.lt*

Visos agroinžinerinės priemonės turi maksimaliai atitikti agrotechnologijų reikalavimus. Šiuo metu naudojamų pasėlių priežiūros agrotechnologijų ir įrengimų darbas daugiausia paremtas mechaninių procesų ir cheminių medžiagų poveikio principais. Pastaruoju metu pradeda ryškėti naujos agrotechnologijos, siekiančios to paties tikslo, tačiau jos iš esmės skiriasi nuo tradicinių tuo, kad paremtos natūralių agrofito aplinkoje vykstančių procesų terminių parametru reguliavimu. Tai terminis – liepsna [1, 2], garu [6, 9, 11, 12], vandeniu [4, 8] – piktžolių naikinimas.

Augalas ilgos evoliucijos metu maksimaliai prisitaikė prie aplinkos sąlygų: drėgmės, temperatūros ir spinduliuotės kaip pagrindinio energijos šaltinio. Šie trys veiksniai, apibūdinantys agrofito aplinką, yra glaudžiai tarpusavyje surišti medžiagų ir energijos apykaitų balansais bei aplinkoje vykstančių termodinaminių procesų dėsniniais.

Kiekviena agrotechnologija ar veiksmas, turintis įtakos agrofito aplinkai, privalo turėti teorinį pagrindą, kuris leistų įvertinti sukeltus energijos pokyčius ir numatomas pasekmes. Toliau pateikiame energinių procesų, vykstančių natūralioje agrofito aplinkoje, termodinaminę analizę esant minimaliai augalo energinei apykaitai, kurioje atskleidžiami skaitytajui tiksliai 5 būdingi augalo gyvenimo atvejai, tie procesai, kuriuos patiria augalas natūralioje agrofito aplinkoje išgyvendamas minimalias egzistencijos bei žitės sąlygas.

Raktažodžiai: procesai agrofito aplinkoje, šilumos mainai, transpiracija, energijų balansas

IVADAS

Būdingiausias visų gyvų organizmų bruožas yra nuolatinė medžiagų ir energijos apykaita. Agrofito aplinkos poveikio augalui prognozavimo ir vertinimo pagrindiniais veiksniais yra šviesa (spindulinė energija), temperatūra (šiluma) ir drėgmė. Šie trys veiksniai tarpusavyje glaudžiai susiję. Juos jungia augalo drėgmės bei energijų apykaitos su aplinka balansai ir agrofito aplinkoje vykstančių termodinaminių procesų dėsniniamis. Augalas kaip energijų apykaitos su aplinka sistema yra nuolatiniame dinaminiame pusiausvyroje. Todėl bet kuriam augalo gyvavimo momentui galima rašyti energijų balanso lygtį. Augalo energijų tyrimuose balanso metodą pir-

mieji pritaikė H. T. Brown, F. Escombe 1905 m. [3]. Išsamiai augalo energijų balanso metodas nagrinėtas siekiant įvertinti tarp augalo ir agrofito aplinkos vykstančius procesus [14, 15, 17], taip pat sprendžiant agrotechnologinius klausimus, susietus su naudojamomis agrotechnologijomis [1, 2, 5, 7, 8, 13].

Agrofito aplinkos vaidmenį augalo gyvenime nuskaido mums gerai žinomas gyvybinis procesų veikiančių veiksnių lygiareikšmingumo dėsnis, kuris skelbia, kad kiekvienas veiksnys būtinas augalo vystymuisi (oras, drėgmė, šviesa, šiluma), negali būti atmetas ar pakeistas kitu. Visi jie vienodai būtini augalo gyvenime, taip pat reiškiasi per minimumo (limituojančio veiksnio) dėsnį, kuris nurodo, kad gyvybinius procesus (gyvybės pa-

laikymo, derliaus) augale esant kitoms vienodoms sąlygoms lemia veiksnys, kurio poveikis yra minimalus.

Pateikiama energinių procesų agrofito aplinkoje termodinaminė analizė, esant minimaliai augalo energinei apykaitai, atskleidžia tuos procesus, kuriuos augalas patiria išgyvendamas neproduktyviu paros laikotarpiu. Augalo organo poreikiai aplinkai neapsiriboja vien maisto medžiagų ir energijos tiekimu. Būtina sąlyga aplinkai – sudaryti galimybes medžiagų apykaitai. Augalo gyvybiniai procesai, kaip CO₂ metabolitų (H₂O garų, šilumos, O₂) judėjimas augalo organo pasienio sluoksniuose, augalo energinė apykaita, yra galimi tikrai esant atitinkamų koncentracijų, temperatūros ir drėgmės gradientams, t. y. vykdant termodinamikos dėsnių reikalavimus. Todėl augalo gyvenime ypatingas vaidmuo tenka agrofito aplinkos termodinaminei būklei, kuriai esant augalas ilgai evoliucijos laikotarpyje maksimaliai adaptavosi. Augalo gyvenime teoriškai galimi 11 energinės apykaitos su supančia agrofito aplinka atvejų, kurie apibūdina jo maksimalaus produktyvumo laikotarpį, minimalios egzistencijos bei žūties sąlygas. Toliau pateikiame energinių procesų agrofito aplinkoje, esant minimaliai energinei apykaitai, analizę ir tikrai 5 būdingus augalo gyvenimo atvejus, kuriuos jis patiria išgyvendamas minimalios egzistencijos bei žūties sąlygas.

TYRIMŲ METODAS

Energinių procesų agrofito aplinkoje teoriniam tyrimui taikomas augalo energijų balanso metodas, kuris teigia, kad bet kuriam augalo gyvavimo momentui galioja lygybė tarp gaunamos, akumuliuojamos, sunaudojamos biologiniams procesams ir atiduotos agrofito aplinkai (šilumos ar vandens garo pavidalu) energijos, t. y. $\dot{Q} = 0$ [6, 14, 15].

Analizuojant energinius procesus agrofito aplinkoje taikomas termodinaminės analizės metodas kartu panaudojant $h-x$ (entalpija–drėgnis) diagramos galimybes šių termoenergetinių procesų, vykstančių agrofito aplinkoje, grafiniam vaizdavimui. Visais nagrinėjamais atvejais bandoma išryškinti pagrindinius energinius veiksnius, sukuriančius būdingus augalo gyvenime 5 atvejus, kurie stebimi minimalios augalo energinės apykaitos metu.

ENERGINIŲ PROCESŲ, VYKSTANČIŲ AGROFITO APLINKOJE, TERMODINAMINIS TYRIMAS

Minimali augalo energinė apykaita vyksta, kai augalo organo temperatūra žemesnė už aplinkos temperatūrą. Minimalios energinės apykaitos periodai būna naktį arba dieną esant mažai saulės spinduliuotei. Tokiomis sąlygomis augalas energiją transpiracijos procesui gauna iš aplinkos šiluminio spinduliavimo ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka būdu. Esant minimaliai energinei apykaitai transpiracijos procesas atlieka svarbų vaidmenį augalo gyvenime, skatindamas metabolitų judėjimą. Transpiracijos procesas yra vienas didžiausių energijos

vartotojų augale. Kilogramui vandens išgarinti augalas sunaudoja apie 2460 kJ/kg. Išgaravus 1 kg drėgmės susidaro apie 1700 kartų didesnis vandens garo tūris. Įvertinus augalo pagrindinius energijos šaltinius ir jos vartotojus nagrinėjamam atvejui augalo organo energijų balansą bendruoju atveju galima rašyti taip:

$$\sum Q = 0 \quad (1)$$

arba

$$Q_3 = Q_2 + Q_{sp}, \text{ arba } q_3 = q_2 \pm q_{sp}; \quad (2)$$

čia Q_3, q_3 – atitinkamai srautas šilumos, sunaudotos transpiracijai – garinimui ir atiduodamos aplinkai vandens garo pavidalu, J/s, srauto tankis J/(s · m²); Q_2, q_2 – atitinkamai srautas šilumos, atiduodamos aplinkai arba gaunamos iš aplinkos konvekciniiais šilumos mainais, J/s, konvekcinio šilumos srauto tankis J/(s · m²); Q_{sp}, q_{sp} – augalo organo efektyvinės šiluminės spinduliuotės srautas J/s, srauto tankis J/(s · m²).

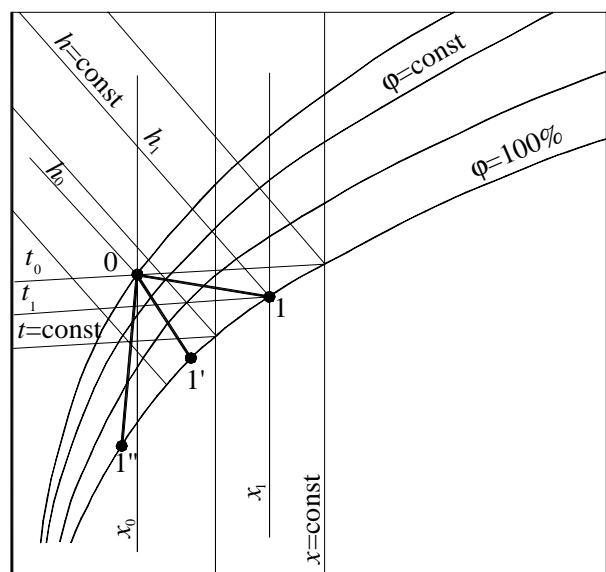
Nagrinėjamu atveju ypatingas vaidmuo augalo gyvenime tenka efektyviam augalo šiluminiam spinduliavimui. Priklausomai nuo efektyvinio šiluminio spinduliavimo krypties stebimi trys augalo energijų balanso atvejai. Augalo organo šiluminis spinduliavimas į aplinką gali būti mažesnis, lygus arba didesnis už šiluminį aplinkos spinduliavimą augalui. Šiuos tris atvejus nusako energinio balanso lygtys:

$$Q_3 = Q_2 + Q_{sp}, \text{ kai } Q_{sp} \text{ teigiamas}; \quad (3)$$

$$Q_3 = Q_2 - Q_{sp}, \text{ kai } Q_{sp} \text{ neigiamas}; \quad (4)$$

$$Q_3 = Q_2, \text{ kai } Q_{sp} = 0. \quad (5)$$

Pateikiamas augalo energijos balansų teorinis nagrinėjimas ir jų grafinė analizė $h-x$ (entalpija–drėgnis) diagramoje suteikia daug informacijos apie procesus, vykstančius tarp augalo ir agrofito aplinkos, apibūdina visus augalo gyvenime aptinkamus atvejus, kai transpiruojan-



1 pav. Energinių procesų, vykstančių tarp augalo ir aplinkos, schema $h-x$ diagramoje, kai augalo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą ($t_1 < t_0$)

čio augalo organo temperatūra t_1 mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 . Esant minimaliai augalo energinei apykaitai, kai $t_1 < t_0$, transpiracijos proceso tiesės, jungiančios taškus 0–1, 0–1', 0–1'', h - x diagramoje turi eiti žemiau izotermos $t_0 = const$ (1 pav.).

Aplinkos oras turi drėgmės, todėl jis sutalpinti – absorbuoti drėgmės iki pilno prisotinimo gali mažiau negu absoliučiai sausas oras. Būtiną, minimalų oro kiekį G_{1min} , kuris gali absorbuoti 1 kg augalų išgarintos drėgmės (arba sukondensuoti 1 kg drėgmės augalo paviršiuje rasos pavidalu), galima rasti, žinant oro drėgimo x_1 ir x_0 reikšmes, iš lygties:

$$G_{min} = \frac{1}{x_1 - x_0}; \quad (6)$$

čia G_{min} – minimali oro masė, kuri teoriškai pajėgtų absorbuoti 1 kg augalo išgarintos drėgmės (arba sukondensuoti augalo paviršiuje 1 kg drėgmės) kg/kg*; x_1 , x_0 – atitinkamai oro drėgnis augalo paviršiuje ir jį supančio oro aplinkoje, esant atitinkamoms temperatūroms, kg/kg.

Transpiruojančio augalo organo paviršiuje 1 kg drėgmės absorbuoja minimali oro masė, kuri randama iš (6) lygties. Pilnai prisotintos drėgme oro masės G_{1min} kg temperatūra augalo paviršiuje susilygina su transpiruojančio augalo lapo temperatūra. Taigi šiltesnės aplinkos oras temperatūros t_0 lapo paviršiuje yra atšaldomas iki lapo temperatūros t_1 . Tuomet galima rašyti lygtį minimaliam šilumos, kurią atiduoda aplinkos oras transpiruojančio augalo lapo paviršiuje išgarinant 1 kg drėgmės, kiekiui nustatyti:

$$Q_{2min} = G_{1min} c_p (t_0 - t_1) = c_p \frac{t_0 - t_1}{x_1 - x_0}; \quad (7)$$

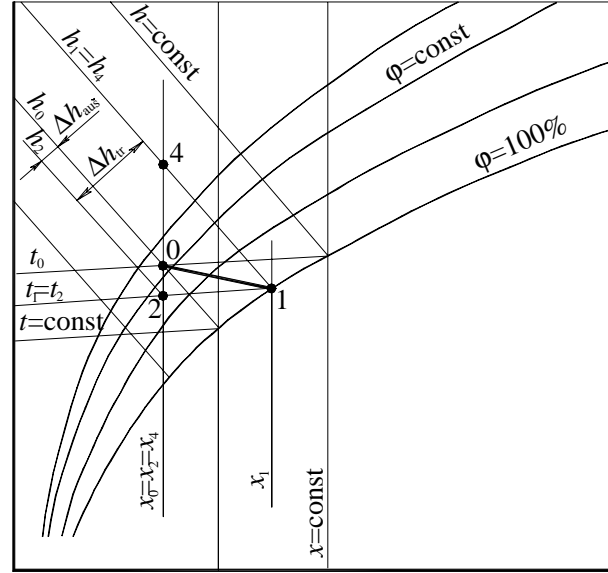
čia Q_{2min} – minimalus šilumos, kurią atiduoda šiltesnis aplinkos oras augalui išgarinant (arba sukondensuojant) 1 kg vandens, kiekis J/kg; c_p – savitoji masinė oro šiluma pastovaus slėgio procese J/(kg · K). $c_p = 1004$ J/(kg · K); t_1 , t_0 – atitinkamai augalo ir jį supančios aplinkos temperatūros °C.

Minimalų šilumos kiekį, kurį atiduoda aušdamas oras augalui, galima rasti naudojantis h - x diagrama. Šis procesas h - x diagramoje randamas taip (2 pav.). Oras, kurio masė G_{1min} , augalo organo paviršiuje atšąla nuo t_0 iki t_1 temperatūros. Oro atšaldymo procese absoliutus oro drėgnis nekinta, todėl h - x diagramoje oro atšaldymas vyksta kreive $x = const$. Iš taško 0 (2 pav.) oro atšaldymo procesas vedamas prie $x_0 = const$ iki izotermos $t_1 = const$. Kreivių $x_0 = const$ ir $t_1 = const$ sankirtoje gaunamas taškas 2. Tuomet entalpijų skirtumas $h_0 - h_2 = \Delta h_{aus}$ parodo kiekį šilumos, kurią atiduoda 1 kg oro atšaldamas nuo t_0 iki t_1 temperatūros. Kadangi šia-

me procese dalyvauja G_{1min} kg oro, tai kiekis šilumos, augalo suteikiamos orui išgaruojant 1 kg drėgmės, bus:

$$Q_{2min}^{aus} = (h_2 - h_0) G_{1min} = \Delta h_{aus} G_{1min}; \quad (8)$$

čia h_2 , h_0 – oro entalpijos atitinkamai taškuose 2 ir 0, randamos h - x diagramoje arba skaičiavimais, J/kg; Δh_{aus} – entalpijų skirtumas tarp atitinkamų taškų J/kg.



2 pav. Augalo energinių mainų skaičiavimo schema h - x diagramoje, kai augalo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$

Kiekis šilumos, kurią augalo lapas gauna esant teigiamam efektyviam šiluminiam spinduliavimui, randamas iš lygties:

$$Q_1 = (h_1 - h_0) G_1^{min}. \quad (9)$$

Kiekis šilumos, kurią augalas sunaudoja transpiracijai išgarinant 1 kg drėgmės, randamas iš lygties:

$$Q_3 = wr = r = (h_4 - h_2) G_{1min} = (h_1 - h_2) G_{1min} = \Delta h_{tr} G_{1min}; \quad (10)$$

čia w – transpiracijos intensyvumas kg/(m² · s); r – vandens garavimo šiluma J/kg.

Vieną svarbiausių augalo energinės apykaitos rodiklių – transpiracijos kriterijų S_k galima rasti iš lygties:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_2^{aus}} = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2} = \frac{\Delta h_{tr}}{\Delta h_{aus}}. \quad (11)$$

Nagrinėjamu atveju transpiracijos procese ($t_1 < t_0$) išgarinant 1 kg drėgmės, dalyvaus minimalus oro kiekis G_{1min} , kuris išskirs šilumos Q_{2min} . Naudojantis (7), (10) ir (11) lygtimis gaunama:

$$S_k = \frac{Q_2}{Q_2^{aus}} = \frac{r}{c_p \frac{t_0 - t_1}{x_1 - x_0}}. \quad (12)$$

* Oro entalpija, drėgnis ir kt. oro parametrai pateikiami drėgnam orui apskaičiuoti kilogramui absoliučiai sauso oro nagrinėjamosiomis sąlygomis.

Žinant transpiracijos kriterijų S_k ir $G_{1\min}$ galima nustatyti minimalų kiekį oro, dalyvaujančio energiniuose mainuose (kai aplinkos oro temperatūra aukštesnė nei augalo paviršiuje), išgarinant arba sukondensuojant 1 kg drėgmės:

$$G_{oro\ min} = (1 + S_k) G_{1\min} = \frac{1 + S_k}{x_1 - x_0}. \quad (13)$$

Žinant G_{oromin} , galima nustatyti šio oro kiekio atšalinimą pasišalinant nuo transpiruojančio augalo organo:

$$\Delta t_{oro}^{aus} = \frac{Q_{2\min}^{aus}}{G_{oromin} c_p} = \frac{t_1 - t_0}{1 + S_k}. \quad (14)$$

Pateikta procesų, vykstančių tarp augalo ir aplinkos, analizė, kada aplinkos temperatūra t_0 aukštesnė už augalo temperatūrą t_1 ($t_0 > t_1$), leidžia aptarti atskirus augalo gyvavimo momentus, priklausančius nuo mikroklimato agrofito aplinkoje.

ENERGINIŲ PROCESŲ, VYKSTANČIŲ AGROFITO APLINKOJE, APTARIMAS

Saulėtu paros metu augalas sukuria pagrindinę dalį organinės medžiagos, tuo tarpu naktį augalas patiria 5 išorinės aplinkos veiksnių atvejus, turinčius įtakos jo minimalioms gyvybinėms funkcijoms, tarp jų ir poveikiui, keliančiam pavojų jo gyvybei. Todėl energinių procesų nagrinėjimas, kai ($t_1 < t_0$), leidžia išryškinti augalo adaptaciją prie aplinkos veiksnių, kurią jis įgijo ilgame evoliucijos kelyje. Augalo energijos apykaitoje, kai $t_1 < t_0$, ypatingas vaidmuo tenka augalo efektyviajam šiluminiam spinduliavimui, kuris sukelia daugelį ciklinių ir stresinių situacijų augalo gyvenime. Įvertinant energijos balanso lygtis (3)–(5), kada augalo temperatūra yra žemesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$, galimi trys atvejai, kuriuos nusako (15)–(17) lygtys:

$$t_1 < t_0, x_1 > x_0, \text{ energijų balansas } Q_3 = Q_2 + Q_{sp}; \quad (15)$$

$$t_1 < t_0, x_1 = x_0, \text{ energijų balansas } Q_{sp} = 0, Q_3 = Q_2; \quad (16)$$

$$t_1 < t_0, x_1 < x_0, \text{ energijų balansas } Q_3 = Q_2 - Q_{sp}. \quad (17)$$

Pirmuoju atveju (15), kada $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$, priklausomai nuo transpiracijai naudojamų energijos šaltinių (konvekcinių šilumos mainai, šiluminis spinduliavimas), galimi dar trys skirtingi augalo energinės apykaitos atvejai:

A. $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$, energija transpiracijai gaunama tik iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka.

B. $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$, energija transpiracijai gaunama iš konvekcinių šilumos mainų ir teigiamo aplinkos efektyvinio šiluminio spinduliavimo.

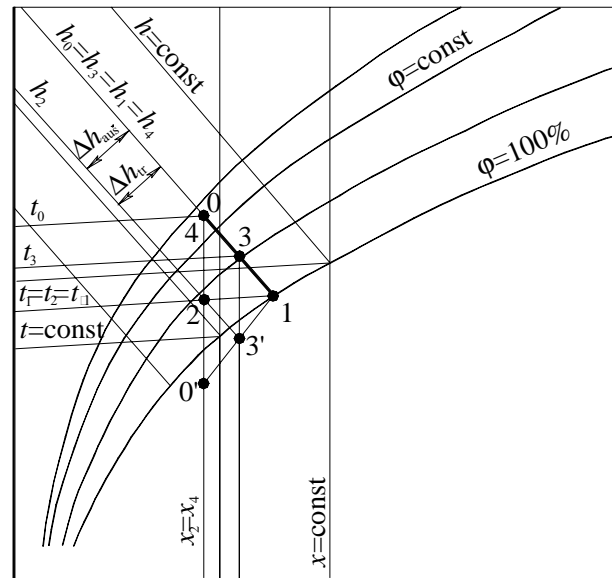
C. $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$, energija transpiracijai ir neigiamam augalo spinduliavimui į aplinką gaunama iš konvekcinių šilumos mainų.

Augalo energinių mainų su aplinka sąlygomis, kurias aprašo (15) lygtis, atveju, kai $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$, o energiją transpiracijai augalas gauna tik iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka, yra lengviausiai sprendžiamas (A atvejis). Efektyvinis šiluminis spinduliavi-

mas lygus nuliui, t. y. $Q - Q_{sp} = 0$. Transpiracijai sunaudojama visa energija, gaunama iš augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka, t. y. $Q_2^{aus} = Q_3$. Vyk-

stant tokiam energinių mainų procesui, augalo organo pasienio sluoksnyje oro drėgnis nuosekliai didėja augalo išgarintos drėgmės sąskaita. Nors augalo išgarinta drėgmė nuolatos didina oro drėgnį pasienio sluoksnyje, oro temperatūra mažėja, tačiau oro entalpija išlieka pastovi. Todėl šis energinių mainų procesas 0–1 $h-x$ diagramoje vyks, kai $h_0 = h_1 = const$ (3 pav.). Nagrinėjamu atveju transpiruojančio augalo organo temperatūra nustos ir bus lygi adiabatinio garavimo temperatūrai – šlapio termometro temperatūrai t_{st} . Esant tokioms aplinkos sąlygoms rasos išskritimas – oro drėgnio kondensacija augalo paviršiuje negalima, kadangi aplinkos oro temperatūra aukštesnė už transpiruojančio paviršiaus ($t_0 > t_1$, o $x_1 > x_0$). Transpiracijos kriterijus $S_k = 1$, nes $\Delta h_{aus} = \Delta h_{tr}$.

Nagrinėjamosiomis sąlygomis augalas energiją transpiracijai gauna iš agrofito aplinkos, oro konvekcinių šilumos mainų keliu. Žinant aplinkos oro temperatūrą ir jo santykinę drėgnį ϕ visuomet galima nustatyti augalo organo temperatūrą naudojantis $h-x$ diagrama. Ji lygi šlapio termometro temperatūrai $t_1 = t_{st}$ (3 pav.).



3 pav. Augalo energinių mainų su aplinka schema $h-x$ diagramoje. Energija transpiracijai gaunama tik iš augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka. Augalo temperatūra žemesnė už aplinkos temperatūrą. $t_1 < t_0$, o $x_1 > x_0$. A atvejis

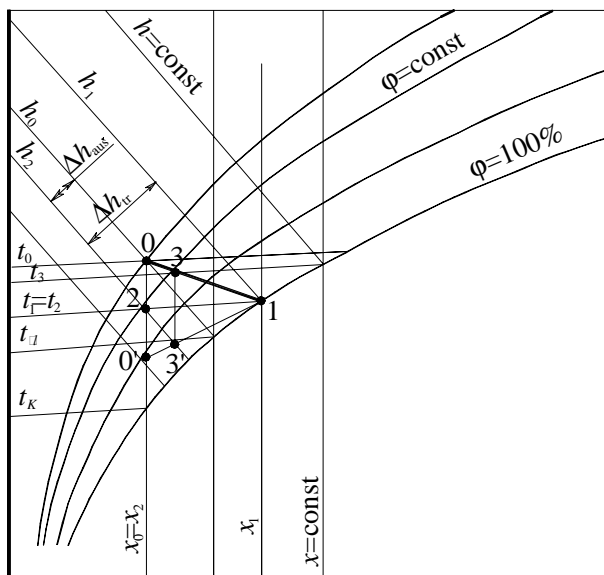
Nagrinėjant augalo energijos mainus su aplinka, kuriuos aprašo (15) lygtis ($t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$), energiją transpiracijai augalas gauna iš konvekcinių šilumos mainų ir teigiamo aplinkos efektyvinio šiluminio spinduliavimo Q_{sp} (B atvejis). Šiuo atveju visa gauta energija sunaudojama transpiracijai. Šis energijos mainų atvejis nuo anksčiau nagrinėto atvejo (3 pav.) skiriasi tuo, kad augalo organas papildomai gauna energijos iš aplinkos,

šiluminio spinduliavimo keliu. Papildomai gauta šiluma augalo organe padidina jo temperatūrą, kuri tampa aukštesnė už šlapio termometro temperatūrą, $t_1 > t_{sl}$. Šiuo atveju augalo energijos mainų su aplinka procesas 0–1 diagramoje $h-x$ vyks virš linijos $h_0 = const$ ir žemiau linijos $t_0 = const$. Transpiracijos kriterijus šiuo atveju bus didesnis už 1 ($1 < S_k < \infty$). Energijos mainų su aplinka procesas 1–0 bus tarp kreivių $h_0 = const$ ir $t_0 = const$ (4 pav.).

Energijų balansas šiam atvejui yra išreikštas (3) lygtimi. Naudojantis (10) ir (11) lygtimis gaunama, kad transpiracijos intensyvumą galima skaičiuoti iš lygties:

$$w = \frac{Q_1}{\left(1 - \frac{1}{S_k}\right)r}. \quad (18)$$

(18) lygtį galima naudoti tais atvejais, kada transpiruojančio augalo temperatūra t_1 yra ($t_{sl} < t_1 < t_0$) aukš-



4 pav. Augalo energijos mainų su aplinka schema $h-x$ diagramoje, kai energija transpiracijai gaunama iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka ir teigiamam aplinkos šiluminio spinduliavimo. $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$. B atvejis

tesnė už šlapio termometro temperatūrą ir žemesnė už aplinkos temperatūrą, esant teigiamam efektyviam šiluminiam spinduliavimui, kurį aprašo (3) energijos balanso lygtis.

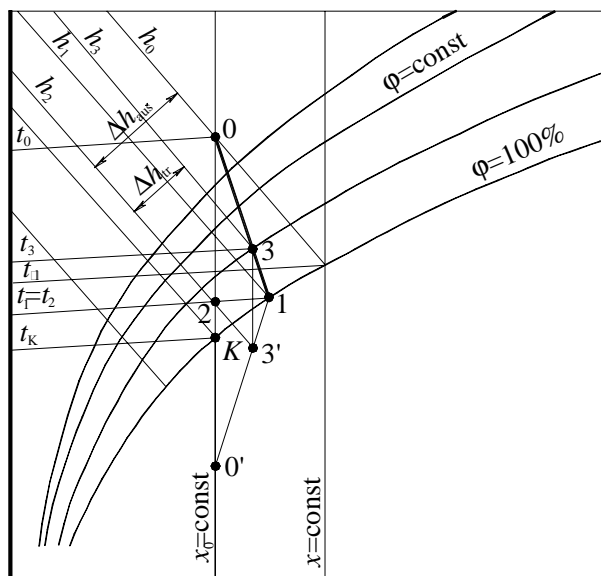
Augalo energijos mainų su aplinka atveju, kai $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$, o energiją transpiracijai ir neigiamam augalo šilumos balansui augalas gauna iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka, transpiracijos kriterijus bus mažesnis už 1 ir didesnis už 0 ($0 < S_k < 1$). Šiuo energijos mainų atveju augalo organo temperatūra mažesnė už šlapio termometro temperatūrą t_{sl} . Augalo energijos mainų procesas 0–1 $h-x$ diagramoje eis žemiau linijos $h_0 = const$ ir aukščiau linijos $x_0 = const$ (5 pav.). Augalo transpiracija maža, nes dalį šilumos, gautos iš konvek-

cinų šilumos mainų su aplinka, augalas išspinduliuoja į aplinką.

Didėjant augalo išspinduliuojamai į aplinką energijai jo organų temperatūra mažėja. Transpiracijos kriterijus artėja prie 0. Transpiracijos intensyvumas visai sumažėja. $h-x$ diagramoje taškas 1 linija $j = 100\%$ artėja prie rasos taško K kondensacijos temperatūros t_K . Energijų balansas šiam atvejui bus išreikštas lygtimi:

$$Q_2^{aus} = Q_{sp} + Q_3. \quad (19)$$

Naudojantis (5) ir (6) lygtimis gaunama:



5 pav. Augalo energijos mainų schema $h-x$ diagramoje, kai energiją transpiracijai ir neigiamam augalo šiluminiam spinduliavimui augalas gauna iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka. $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$. C atvejis

$$w = \frac{Q_1}{\left(\frac{1}{S_k} - 1\right)r}. \quad (20)$$

(20) lygtį galima naudoti tais atvejais, kada transpiruojančio augalo temperatūra t_1 yra aukštesnė už kondensacijos taško K temperatūrą t_K ir žemesnė už šlapio termometro temperatūrą t_{sl} ($t_K < t_1 < t_{sl}$). Visa tai vyksta esant neigiamam augalo organo šilumos balansui.

Augalo energijos mainų su aplinka atvejis, kurį aprašo (16) lygtis, kai $t_1 < t_0$, $x_1 = x_0 = const$, stebimas, kada augalo organo visa gauta šiluma konvekcinų šilumos mainų su aplinka metu sunaudojama šiluminiam spinduliavimui į aplinką. Tokiu atveju 1 taškas sutampa su 4 tašku (6 pav.). Transpiracija nevyksta, nes nėra atliekamos šilumos, kurią augalas galėtų panaudoti drėgmei garinti. Transpiracijos kriterijus $S_k = 0$, nes $Q_{tr} = 0$. Augalo energijos mainų su aplinka procesas yra ne kas kita, kaip oro atšaldymo procesas, esant ($x_1 = x_0 = const$) pastoviam drėgnumui. Augalo organo temperatūra lygi kon-

dalyvavimu šiame procese. Laikoma, kad optimalios sąlygos rasai iškristi yra, kai vėjo greitis 1–3 m/s.

Pavasariį esant žemoms aplinkos temperatūroms, naktį, ankstyvą rytą, mažėjant augalo paviršių temperatūrai, t. y. taškui K slenkant žemyn linija $\phi = 100\%$, galima pasiekti 1 taško temperatūrą, artimą 0°C (7 pav.). Jei toliau augalo temperatūrai krentant konvekciniai šilumos mainai su aplinka nepadengia energijos poreikių šiluminiam išspinduliavimui į aplinką, pasireiškia radiacinė šalna esant teigiamai aplinkos oro temperatūrai [10]. Pradiniu radiacinės šalnos pasireiškimo periodu šilumos trūkumą dengia rasos susidarymo metu išsiskirianti šiluma, vėliau – ledo susidarymo metu išsiskirianti šiluma lapuose. Ledo susidarymo metu išsiskirianti šiluma yra gana didelė (333 kJ/kg), artima šilumai, išsiskiriančiai užverdant vandeniui (419 kJ/kg). Šiuo periodu augalo organų temperatūra artima 0°C . Susidarius ledui augalo lapuose ar kituose organuose, temperatūra krenta žemiau 0°C , iki temperatūros, kuriai esant augalo organo konvekciniai šilumos mainai su oru padengia augalo radiacinį – šilumos išspinduliavimą į aplinką. Paprastai toks reiškinys stebimas rytmečiais esant giedram dangui. Taip paaiškinamas ir (7 pav.) $h-x$ diagramoje vaizduojamas radiacinės šalnos procesas, pasireiškiantis esant teigiamoms aplinkos temperatūroms lauke ir po polietileninėmis uždangomis. Taigi sąlygos rasai iškristi ir radiacinei šalnai pasireikšti yra vienodos. Skiriasi tik tai temperatūros, kurioms esant vyksta šie procesai. Radiacinę šalną, stebėtą tyrimų metu [10], esame aprašę spaudoje.

IŠVADOS

1. Agrofito aplinkos poveikio augalui prognozavimo ir vertinimo pagrindiniai veiksniai: šviesa, temperatūra ir drėgmė tarpusavyje glaudžiai susiję ir turi būti nagrinėjami nepertraukiamai. Juos jungia augalo drėgmės-energijos apykaitų su aplinka balansai ir agrofito aplinkoje vykstančių termodinaminių procesų dėsninumu.

2. Augalo drėgmės ir energijos mainų su aplinka vertinimo rodiklis yra transpiracijos kriterijus, išreiškiamas sunaudojamų energijų transpiracijai ir šilumos mainams su agrofito aplinka santykiu ir nustatomas remiantis šiame darbe pateikta metodika.

3. Energinų procesų agrofito aplinkoje termodinaminiam aiškinimui ir jų grafiniam vaizdavimui bei nagrinėjimui galima naudoti $h-x$ (entalpija–drėgnis) diagramą.

4. Termodinaminė analizė ir grafinis energinių procesų agrofito aplinkoje vaizdavimas $h-x$ diagramoje leidžia išaiškinti vykstančius termodinaminius procesus ir sąlygas agrofito aplinkoje, kurioms esant iškrenta augalo paviršiuje rasa, išnyksta rasa, augalai patiria radiacinę šalną, bei kitus augalo gyvenime stebimus reiškinius natūraliomis ir uždaro grunto sąlygomis.

5. Augalas minimalios egzistencijos bei žūties sąlygomis patiria 5 būdingus gyvenimo atvejus, kurie stebimi apsiniaukusiomis dienomis ir naktį minimalios energijos ir drėgmės apykaitos agrofito aplinkoje metu.

Mokslinį tiriamąjį darbą remia Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

Gauta 2005 03 21

Literatūra

1. Ascard J. Thermal Weed control by Flaming. Dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering. Alnarp 1995. Report 2000. P. 1–37.
2. Bertram A. Geräte – und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Dissertation. Weihenstephan. 1996. S. 196.
3. Brown H. T., Escombe F. Researches on some of the processes of green leaves // Proceedings of the Royal Society. London 1905, series B, 76. No. 507. P. 92–118.
4. Collins R. M., Bertram A., Roche J.-A. et al. Preliminary studies in the comparison of hot water and hot foam for weed control // European Weed Research Society. 5th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control Pisa, Italy, 11–13 March 2002–2003. P. 207–215.
5. Česna J. Piktžolių naikinimo aukštatemperatūroje aplinkoje tyrimai. Daktaro disertacija. LŽŪU, Akademija, 2000. P. 102.
6. Česna J., Kerpauskas P., Sirvydas A. ir kt. Piktžolių terminio naikinimo aukštatemperatūroje aplinkoje tyrimai // Aplinkos inžinerija. 2000. T. VIII. Nr. 1. P. 28–37.
7. Kerpauskas P. Lokalizuotos aplinkos terminiam piktžolių naikinimui formavimas ir tyrimas. Daktaro disertacija. LŽŪU, Akademija, 2003. P. 113.
8. Kurfess W. Untersuchungen zum Einsatz von Heißwasser zur thermischen Unkrautregulierung. Dissertation. Stuttgart, 2000. S. 126.
9. Lazauskas P., Sirvydas A. Weed control with water steam in barley. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Stuttgart–Hohenheim, 2002. Bd. XVIII. S. 633–638.
10. Petkevičienė L., Sirvydas A. Temperatūros režimas polietilene plėvele dengtuose tuneliuose šalnos metu // Sodai ir daržai tyrėjų akimis. Vilnius: Periodika, 1972. P. 58–62.
11. Sirvydas A., Lazauskas P., Vasinauskienė R. et al. Thermal weed control by water steam in bulb onions // European Weed Research Society. 6th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control Lillehammer, Norway, 8–10 March 2004. P. 170–173.
12. Sirvydas P. A., Lazauskas P., Vasinauskienė R. et al. Thermal weed control by water steam // European Weed Research Society. 5th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control Pisa, Italy, 11–13 March 2002–2003. P. 253–262.
13. Sirvydas A., Lazauskas P., Vasinauskienė R. et al. Weed control in onions by steam // Zeitschrift für Pflanzenkrankheit und Pflanzenschutz 2004 Sonderheft XIX. S. P. 581–587.
14. Vasinauskienė R. Terminės aplinkos poveikio augalams tyrimai ir agrotechnologinis įvertinimas. Daktaro disertacija.

LŽŪU, Akademija, 2004. P. 99.

- 15. Èëüéóí Ā. Ī. Āí āđāāðē+í ūé āāēāí ñ ðī ñēēí. Èēēā, 1967. C. 234.
- 16. Ñēāē+āð Ð. Āí āýí ūé đāæēì đāñóāí ēē. Ī ĩ ñēāā: Ī āóēā, 1970. C. 342.
- 17. Øóēāēí Ē. Ā. Ñī ēí ā+í āý đāāēāöēý ē ōī ōī ĩ ĩ ðōī āāí āç çāēāí ĩ āī đāñóāí ēý. Āāōī đāō. āēññ. ... ā-đā āēī ē. ĩ āóē. Ēāí ēí āđāā, 1970. C. 40.

Paulius Kerpauskas, Povilas Algimantas Sirvydas

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ENERGETIC PROCESSES IN AGROFIT MEDIA

Summary

All agroengineering implements should maximally meet the requirements of agrotechnologies. The currently used agro technologies and equipment in many cases are based on mechanical processes and chemical materials (fertilizers, poison of various purposes). Recently, the new agro technologies which have the same purpose have appeared, but they differ from the traditional ones, because they are based on regulation of the thermal parameters of the processes that take place in agrofit media. This is thermal weed control with flame [1, 2], steam [5, 9, 11, 12], water [4, 8].

In the period of evolution plants got adapted to the environmental conditions (moisture, temperature and radiation) as the main energy sources. These three factors defining agrofit media are interrelated by balances of metabolism and a consistent pattern of thermodynamic processes.

Every agrotechnology or action influencing the agrofit medium should have the theoretical basis which allow assessing the energetic changes and reliable outcomes. The paper offers a thermodynamic analysis of the processes that take part in the natural agrofit media. It analyses only 5 typical cases of plant life and exhibits the processes which a plant experiences in natural agrofit conditions.

Key words: processes in agrofit media, heat exchange, transpiration, energy balance

Ī āóēþñ Ēāđī āōñēāñ, Ī ĩ āēēāñ-Āēuāēī āí ōāñ Ñēđāēāāñ

**ŌĀÐĪ Ī ĀĒĪ ĀĪ Ē×ĀÑĒĒĒ ĀĪ ĀĒĒÇ
ÝĪ ĀĐĀĀŌĒ×ĀÑĒĒŌ Ī ÐĪ ŌĀÑÑĪ Ā Ā ÑĐĀĀĀ
ĀĀÐĪ ŌĒŌĀ**

Ðaçþìā

Āñā ñđāāñŌāā āāđāđī ĩ ē ēī çāí āđēē āī ēāí ū ĩ āēñēī āēūī ĩ ñī ĩ ōāāŌñŌāī āāŌū ōđāāī āāī ēýī āāđī ōāŌī ĩ ēī āēē. Ī ñī ĩ āī ē ñī āđāī āí ĩ ūŌ ōāŌī ĩ ēī āēē ĩ ĩ ōŌī āŌ çā ĩ ĩ ñāāāī ē ñāēūñēī ōī çýēñŌāāī ĩ ūŌ ēŌēūŌŌ ýāēýþŌñý ĩ đēī ōēī ū āī çāāēñŌāēý ĩ āŌāī ē+āñēēī ē ē ōēī ē+āñēēī ē ñđāāñŌāāī ē (Ōāī āđāī ēýī ē, đaçēē+í ūī ē ýāī ōēī ēēāŌāī ē). Ā ĩ ĩ ñēāāī āā āđāī ý ĩ āçā āāđī ōāŌī ĩ ēī āēē ñŌāāýŌ ĩ āđāā ñī āī ē ōŌ çā ōāēū, ĩ āī āēī ñŌūāñŌāāī ĩ ĩ ōēē+āþŌñý ĩ ō đāāēŌēī ĩ ĩ ūŌ ōāŌī ĩ ēī āēē ñāēūñēī āī ōī çýēñŌāā. Ī ñī ĩ āī ĩ ē āāāþçūēī ĩ đēī ōēī ĩ ĩ ĩ āūŌ ōāđī ē+āñēēŌ ōāŌī ĩ ēī āēē ýāēýāŌñý đāāŌēēđī āāī ēā ĩ āđāī āđđī ā ā ñđāāā āāđī ŌēŌā, ō. ā. ōī ē+Ōī çāí ēā ñī đī ūŌ đāñŌāí ēē ōāđī ē+āñēēī ñī ĩ ñī āī ĩ : ĩ ēāī āí āī [1, 2], ĩ āđī ĩ [5, 9, 11, 12], āī đý+āē āī āī ē [4, 8].

Āī āđāī ý ýāī ēþŌēē đāñŌāí ēý ĩ āēñēī āēūī ĩ ĩ đēñī ĩ ñī āēēēñū ē ōñēī āēýī ĩ ēđŌāēþçūāē ñđāāū: āēāçāí ñŌē, ōāī ĩ āđāŌŌđā āī çāŌŌā ē ĩ ñī ĩ āī ĩ Ō ēñŌī +í ēēŌ ýī āđāēē - ñī ēī ā+í ĩ Ō ñāāŌŌ. Āñā ōđē āūŌāí āçāāī ĩ ūā ŌāēŌī đçū, ōāđāēŌāđēçŌþçūēā ñđāāŌ āāđī ŌēŌā, ōāñī ĩ āçāēī ĩ ñāýçāí ū ĩ āī āí ĩ ĩ āāūāñŌā, āāēāī ñī ĩ ýī āđāī ĩ āī āí ā, ā ōāēçā çāēī ĩ ĩ āđī ĩ ñŌūþ ōāđī ĩ āēī āī ē+āñēēŌ ĩ đī ōāññī ā ā ñđāāā āāđī ŌēŌā.

Ēþāāý āāđī ōāŌī ĩ ēī āēý, ēāçāī ā āāēñŌāēā, ĩ ēāçūāāþçūēā āēēýī ēā ĩ ā ñđāāŌ āāđī ŌēŌā, āī ēāí ū āūŌū ōāī đāŌē+āñēē ĩ āī ñī ĩ āāī ū, +Ōī āū ĩ đāāāēāāŌū āī çī ĩ çāí ūā ĩ ĩ ñēāāñŌāēý, āūçāāī ĩ ūā ýī āđāāŌē+āñēēī ē ēçī āí āí ēýī ē. ĀāŌī đāī ē ñŌāŌūē ĩ đāāñŌāāēāī ōāđī ĩ āēī āī ē+āñēēē āí āēēç ýī āđāāŌē+āñēēŌ ĩ đī ōāññī ā ā ñđāāā āāđī ŌēŌā ĩ đē ĩ ēī ēī āēūī ĩ ĩ ýī āđāī ĩ āī āí ā đāñŌāí ēē. Đāññī āŌđēāāþŌñý 5 ōāđāēŌāđī ūŌ ñēŌ+āāā ýī āđāāŌē+āñēēī āī ĩ āī āí ā ā ōñēī āēýŌ āñŌāñŌāāī ĩ ĩ āī āāđī ŌēŌā đāñŌāí ēē.

Ēēþ+āāūā ñēī āā: ĩ đī ōāññū āāđī ŌēŌā, ōāī ēī ĩ āí āí, ōđāī ñī ēđāŌēý, ýī āđāāŌē+āñēēē āāēāí ñ