

LIETUVOS ŽEMĖS ŪKIO UNIVERSITETAS

Povilas Algimantas Sirvydas

Paulius Kerpauskas

Vidmantas Kučinskas

AUGALŲ ENERGINĖ APYKAITA

Monografija

AKADEMIJA, 2011

UDK 581.5:620.9

Skyrių autoriai:

Povilas Algimantas Sirvydas ir Paulius Kerpauskas –
1, 2, 3, 4 skyriai.

**Povilas Algimantas Sirvydas, Paulius Kerpauskas, ir
Vidmantas Kučinskas** – 5 skyrius.

Recenzantai:

Prof. habil. dr. **Vida Stravinskienė**
(Vytauto Didžiojo universitetas)

Prof. habil. dr. **Albina Birutė Rašinskienė**
(LAMMC filialas Sodininkystės ir daržininkystės institutas)

Prof. habil. dr. **Alfonsas Skrinska**
(Vilniaus Gedimino technikos universitetas)

Redaktorė **Dalia Lapinskienė**
Viršelio dizainerė **Danguolė Raudonienė**
Maketavo **Aldona Bagdonienė**

ISBN 978-9955-896-94-4

© P. A. Sirvydas, 2011

© P. Kerpauskas, 2011

© V. Kučinskas, 2011

UDK 581.5:620.9

Augalų energinė apykaita. P. A. Sirvydas, P. Kerpauskas, V. Kučinskas. Lietuvos žemės ūkio universitetas. Akademija, 2011.

Monografijoje nagrinėjama augale vykstančių energinių procesų tąsa fizinėje aplinkoje. Aprašomi augalų energijų ir masės dujinėje būsenoje apykaitos su aplinka procesai, vykstantys riboto storio oro sraute, augalo paviršiaus apykaitos su aplinka sluoksnyje. Nagrinėjama augalo energinės apykaitos procesų savybė skatinti arba slopinti augale vykstančius biologinius procesus. Aprašomi termodinaminiai procesai, vykstantys augalo lapo žiotelėse, aiškinama kilmė jėgų, sukeliančių CO_2 ir metabolinių produktų judėjimą augalo apykaitos su aplinka sluoksnyje. Pateikiama procesų, vykstančių lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse ir žiotelėse termodinaminė analizė, aprašomi augalo lapo žiotelinio variklio termodinaminiai procesai ir veikimo principas.

Monografija skiriama agronomijos, biologijos, žemės ūkio ir aplinkos inžinerijos mokslų srityse dirbantiems mokslininkams ir doktorantams, kurie domisi augalų ekologinėmis ir energinės apykaitos problemomis.

Monografijos apimtis –224 puslapių, 82 paveikslai ir 4 lentelės.

UDK 581.5:620.9

Plant energy exchange. P. A. Sirvydas, P. Kerpauskas, V. Kučinskas. Lithuanian University of Agriculture. Akademija, 2011.

The monograph analyses the continuation in the physical environment of energy processes occurring in plants. It describes the processes of the exchange of plant energies and mass in the gaseous form with the environment, which take place in the airflow of a limited thickness, in the layer of plant surface exchange with the environment. It analyses the feature of the energy exchange processes of a plant either to stimulate or suppress the biological processes occurring in a plant. The monograph describes thermodynamic processes which take place in the stoma of the plant leaf, explains the origin of the forces which cause the movement of CO_2 and metabolic products in the layer of plant exchange with the environment. The monograph presents a thermodynamic analysis of the processes taking place in the cavities of sub-stomatal intercellular ducts and stoma, and describes the thermodynamic processes of plant leaf's stomatal engine as well as the principle of operation.

The monograph is intended for scientists working in the areas of agronomy, biology, agricultural and environmental engineering sciences as well as and doctoral students who show interest in the problems of plant ecology and energy exchange.

The size of monograph –224 p. with 82 pic. and 4 tables.

УДК 581.5:620.9

Энергетический обмен растений. П. А. Сирвидас, П. Керпаускас, В Кучинскас. Литовский сельскохозяйственный университет. Академия, 2011

В монографии рассматривается взаимодействие энергетических процессов, происходящих в растениях на физическом уровне и в окружающей среде. Описываются обменные процессы энергией и массой в газовом состоянии в слое обмена растений с окружающей средой. Рассматриваются процессы энергетического обмена по стимулированию и ингибированию биологических процессов, происходящих в растениях. Описываются термодинамические процессы, происходящие в устьицах и межклеточных полостях листа. Анализируются процессы вызывающие движение CO_2 и продуктов метаболизма в слое обмена растений с окружающей средой. Приводится термодинамический анализ процессов, происходящих на поверхностях межклеточных полостей и устьиц в листьях растений, а также термодинамические процессы устьичного двигателя и принцип его действия.

Монография рассчитана для научных работников и докторантов (агрономов, биологов, экологов, инженеров сельскохозяйственного производства), которые занимаются экологическими и энергетическими проблемами растений.

Объем монографии – 224 стр., 82 рис., 4 табл.

Įvadas

Monografijoje nagrinėjami augalų energijų ir masės apykaitos tarp augalo ir aplinkos, esant dujinei būsenai, procesai. Šie procesai vyksta aplink augalą esančiame riboto storio oro sraute, kuris vadinamas augalo apykaitos su aplinka sluoksniu. Augalo lapų paviršiaus apykaitos su aplinka sluoksniuose vyksta sudėtingi energijų ir medžiagų apykaitos procesai, kurie gali skatinti arba slopinti biologinius procesus, vykstančius augalo lape. Todėl jie yra medžiagų (dujinėje būsenoje) ir energinės apykaitos procesų, vykstančių augalo lape, tąsa fizinėje aplinkoje. Šie teorinio ir taikomojo pobūdžio procesai yra tiesiogiai susiję su augalo gyvybiniais procesais, vietovės klimatu, lokaliu mikroklimatu ir terminių technologijų taikymu augalijoje. Augalų energinės apykaitos problemos taip pat tiesiogiai siejasi su saulės energijos kaupimu biomasės forma ir jos, kaip atsinaujinančio energijos šaltinio, panaudojimu alternatyviosios energetikos tikslams.

Procesai gyvojoje ir negyvojoje gamtoje vyksta veikiant varomosioms jėgoms. Joms palaikyti arba sukurti reikia energijos. Pirminis augalijos energijos šaltinis yra Saulė, teikianti Žemei energiją spindulių pavidalu. Augalija dalį saulės energijos naudoja gyvybinėms funkcijoms vykdyti, ją transformuodama į chemines jungtis – organinius junginius. Likusią didžiąją dalį (99–98 %) absorbuotos saulės energijos augalas paverčia paprasčiausia energijos rūšimi – šiluma. Šilumos pavidalo energiją augalas naudoja gyvybiniams procesams, taip pat varomųjų jėgų tąsai augalo apykaitos su aplinka sluoksniuose sukurti, atiduodamas ją aplinkai vandens garo ir žemo potencialo šilumos pavidalu.

Augale vykstantys biologiniai procesai ir jo energijų ir masės apykaitos su aplinka procesai sudaro vientisą biomasės kūrimo grandinę. Augalo lape vykstančių biologinių, energijų ir masės (esant dujinei būsenai) apykaitos su aplinka procesų dalyvavimas biomasės kūrimo procese yra lygiavertis ir nė vienas iš jų negali būti užmirštas. Augalo energijų ir masės apykaitos (dujinės mitybos ir metabolitų) procesai fizinėje

augalo aplinkoje vyksta pagal tam tikrus dėsnius ribotame augalo apykaitos su aplinka oro sluoksnyje. Augalo lape, be fizinių procesų augalo apykaitos su aplinka sluoksnyje, biologiniai procesai negalimi. Biologijos moksluose biomasės kūrimo augalo lape procesų grandinė nutrūksta tada, kai jie pereina į fizinę aplinką, augalo apykaitos su aplinka procesus (dujinės mitybos, metabolitų ir energijų apykaitos), vykstančius augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje. Suprantama, augalijos ir šilumos mokslų sandūroje nagrinėti labai sudėtingus fizinius procesus augalo apykaitos su aplinka sluoksnyje reikia tam tikro pasirengimo ir žinių. Augalo energijų ir masės apykaitos su aplinka procesai, vykstantys augalo paviršiaus apykaitos su aplinka sluoksnyje, gali skatinti arba slopinti augale vykstančius biologinius procesus. Procesai, vykstantys augalų pasaulyje, yra daug sudėtingesni negu technologijos moksluose. Jie susiję su nuolat kintančiais gyvybiniais procesais augalo audiniuose.

Čia nagrinėjame kol kas mažai tyrinėtus procesus, susijusius su augalo dujine mityba, metabolitų judėjimu ir energine apykaita, vykstančia augalo apykaitos su aplinka sluoksniuose Augalų energinės apykaitos su aplinka procesų analizė leido energetiškai apibūdinti augalo vystymosi, produktyvumo, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas. Nagrinėjant termodinaminius procesus, vykstančius augalo lapo žiotelėse, augalo lapo temperatūros ir jos gradientų dinamiką, nustatyti nauji procesai, vykstantys augalo lapo žiotelėse ir požiotelinių tarpuląsčių ertmėse. Atskleistas lapo žiotelinio variklio, gaminančio mechaninę energiją, veikimo principas ir termodinaminių procesų, vykstančių lapo žiotelėse, dėsniumai. Pateikta informacija yra pagrindas naujai pažvelgti į dujinės būsenos CO_2 ir O_2 patekimo ir kaitos mechanizmą augalų lapuose.

Monografijos „Augalų energinė apykaita“ parengimas ir pateikimo forma autoriams kėlė nemažai problemų. Monografija skirta agronomijos, biologijos, žemės ūkio ir aplinkos inžinerijos mokslo srityse dirbantiems mokslininkams ir doktorantams, kurie domisi augalų energinės ir medžiagų (dujinėje būsenoje) apykaitos problemomis ir jų panaudojimu. Čia pateikiama informacija yra keleto mokslo krypčių sandūroje. Ja naudojantis reikia papildomų kitų mokslo sričių žinių. Augalų energinė apykaita turėtų priklausyti botanikams (agronomams, ekologams), nes svarbiausias gamtoje vykstantis procesas – asimiliacija – tiesiogiai priklauso ir nuo augalo energetikos. Energinės ir medžiagų (dujinėje būse-

noje) apykaitos procesus nagrinėja technologijos ir energetikos mokslų srities atstovai, kuriems augalijos problemos tolimos (be to, jie neturi biologijos krypties išsimokslinimo). Energetikos mokslo tyrimų rezultatais botanikams (agronomams) pasinaudoti sunkoka, nes tam reikia specialių žinių. Suprantama, kad augalijos mokslų srities atstovams nepriimtina augalų energinės apykaitos procesų pateikimo forma – lygtimis. Tačiau energinės apykaitos procesų dėsningumams augalijoje nustatyti naudojami energinę apykaitą apibūdinančių procesų modeliavimo ir teorinio sprendimo metodai šiuo atveju yra neišvengiami.

Monografijos pagrindas yra ilgamečio autorių mokslinio darbo, augalų energinės apykaitos natūralioje ir aukštatemperatūroje aplinkoje tyrimo rezultatų ir mokslinių publikacijų (83 straipsnių) apibendrinimas. Monografijos autorių mokslo darbų sąrašas pateikiamas atskirai, tekste jie necituojami.

Šis darbas atliktas Lietuvos žemės ūkio universitete. Esu dėkingas prof. habil. dr. J. Dagiui (Vilniaus universitetas), prof. habil. dr. A. F. Klešninui (Augalų fiziologijos institutas, TSRS MA), prof. habil. dr. K. Brunzai (Lietuvos žemės ūkio akademija), paskatiniams mane, jauną inžinierių energetiką, susidomėti augalijos energinių problemų paslaptimis ir suteikusiems galimybę įgyti biologijos mokslų kandidato laipsnį (1961 m.), o vėliau – ir technologijos mokslų habil. dr. laipsnį. Visa tai sudarė prielaidas parengti šį mokslo darbą apie augalų energinę apykaitą apibendrinimą.

Autoriai dėkingi recenzentams – biomedicinos ir technologijos mokslo sričių atstovams prof. habil. dr. *V. Stravinskienei*, prof. habil. dr. *A. Rašinskienei*, prof. habil. dr. *A. Skrinskai* už geranorišką kritiką ir vertingus patarimus tobulinant šioje monografijoje pateikiamų klausimų prieinamumą.

Prof. habil. dr. Povilas Algimantas Sirvydas

Simboliniai žymenys

- a – koeficientas, kuriuo įvertinama absorbuotos saulės energijos dalis, augale virstanti šiluma, % arba dalimis;
- b – augalo absorbuojamos saulės spinduliuotės dalis, % arba dalimis;
- c_p – savitoji oro ar kitų dujų šiluma, kai slėgis pastovus, J/(kg·K);
- c – augalo sulčių, augalo audinių, dirvos, vandens, ir kitų medžiagų savitoji šiluma, J/(kg·K);
- G_{\min} – minimali oro masė, kuri teoriškai pajėgia sugerti 1 kg augalo išgarintos drėgmės, kg/kg;
- G_0 – aplinkos oro masė, dalyvaujanti procese, kg;
- $G_{\text{miš}}$ – oro mišinio masė, kg/kg;
- h_1 – oro entalpija augalo lapo paviršiuje, J/kg;
- h_0 – aplinkos oro entalpija, J/kg;
- $h_{\text{miš}}$ – oro mišinio entalpija, J/kg;
- n – koeficientas, kuriuo įvertinama absorbuotos saulės energijos dalis, augalo sunaudojama biologiniams procesams;
- v – savitasis oro, vandens garo arba 1 kg dujų, esančių požiotelinių tarpulauščių ertmėse. tūris, m³/kg;
- Q_{sp} – efektyvus spindulių energijos srautas, J/s;
- $Q_{2\min}$ – minimalus šilumos kiekis, kurį transpiruojantis augalo lapas sunaudoja aplinkos orui šildyti ar aušinti išgarindamas 1 kg vandens, J/kg;
- Q – augalo energijų balanso narys, apibūdinantis tam tikro proceso augale šilumos (energijos) srautą, J/s;
- q – augalo energijų balanso narys, apibūdinantis tam tikro proceso augale šilumos (energijos) srauto tankį, J/(s·m²);

r – vandens garavimo šiluma, J/kg;

S_k – transpiracijos skaičius (*bedimensinis*);

t – augalo audinių, aplinkos oro, dirvos ir kt. temperatūra, °C;

T – absoliučioji temperatūra, K;

w – transpiracijos intensyvumas, kg/(m²·s), g/(cm²·s);

x – oro drėgnis, kg/kg_{s.o.};

$x_{miš}$ – oro mišinio drėgnis, kg/kg;

α – šilumos atidavimo koeficientas, W/(m²·K);

β – lapo padėties Saulės atžvilgiu kampas, rad.;

λ – augalo audinių, vandens, dujų šilumos laidžio koeficientas, W/(m·K);

τ – laikas, s, min, h;

φ – santykinis aplinkos oro drėgnis, %.

1 Augalo energijų balansas

1.1. Energija ir jos svarba augalijai

Gamtoje, taip pat ir augalijoje, be judėjimo negali vykti nė vieno proceso. Judėjimas – neatskiriama gyvybės ir materijos savybė. Bet kuris judėjimas galimas tik tuo atveju, jei yra varomoji jėga. Materijos bendrasis matas, kai viena judėjimo forma keičiasi kita arba kinta tos pačios formos intensyvumas, vadinamas energija.

Pagal varomosios judėjimo jėgos prigimtį skiriamos įvairios energijų formos: mechaninė, šilumos, elektros, cheminė, magnetinė, branduolinė. Šilumos energija dalyvauja daugelyje augalų fiziologinių procesų. Saulės energija, transformuota augaluose į šilumą, sudaro 96–98 % bendro energijos kiekio, dalyvaujančio augalų energinės apykaitos procese. Dėsninga, kad visos minėtos energijos formos galiausiai virsta pačia paprasčiausia energijos forma – šiluma.

Pirmasis termodinamikos dėsnis nusako energijos tvarumo ir jos transformavimo principą. Jis teigia, kad energija nesukuriamą ir nežūsta. Ji niekad nepraranda gebėjimo virsti kitomis energijos formomis. Tačiau žemo potencialo (žemos temperatūros) šilumos energijos, dalyvaujančios augalo energinėje apykaitoje, virtimas kitomis energijos formomis praktiškai negalimas. Tai nusako antrasis termodinamikos dėsnis. Augalų atiduota aplinkai menkavertė, žemo potencialo šiluminė energija, vandens garų ir aplinkos temperatūros pavidalo šiluma toliau dalyvauja Žemės vandens ir oro apytakos cikluose.

Visų energijos formų matavimo vienetas yra džaulis (J). Energijos matavimo vienetas džaulis fizikoje apibūdinamas kaip darbas, kurį atlieka pastovaus dydžio 1 N jėga 1 m kelyje, kai jėgos ir kūno judėjimo kryptys sutampa ($1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ J}$).

Augale vykstantys biologiniai ir energiniai procesai kartu su išoriniais energijos šaltiniais, dalyvaujančiais augalo energijų apykaitoje su aplinka, sudaro augalo energijų apykaitos sistemą. Energija augalams

reikalinga ne tik asimiliacijos procesui, bet ir aprūpinti maisto medžiagomis bei augalo, kaip organizmo, metabolitams (šilumos, vandens garų, deguonies) šalinti, jų judėjimui augalo lapų apykaitos su aplinka sluoksnyje palaikyti.

Nė vienas procesas, tarp jų ir biologinis, negali vykti be judėjimo. Bet kuris judėjimas, susijęs su augalo ir jo aplinkos gyvybinėmis funkcijomis, galimas tik veikiant varomajai jėgai. Maisto medžiagų judėjimą audiniais ir metabolitų judėjimą aplink augalą sukelia keletas skirtingos prigimties varomųjų jėgų. Šias jėgas gali sukelti visos augalo gyvybiniam poreikiams naudojamos energijų formos. Augalas ilgame savo vystymosi kelyje maksimaliai prisitaikė prie augavietės gamtinių sąlygų, leidžiančių savo gyvybinėms funkcijoms panaudoti visas galimas varomasias jėgas. Jis panaudoja vėjo ir gravitacines jėgas, kurias aplink augalą sukuria temperatūrų, drėgmės, dujų koncentracijų skirtumai – gradientai¹, pasitelkia *mechaninę energiją, kuri sukuriamą lapo žiotelėse* (2.5 skyrius).

Gyvybinėms funkcijoms augalo audiniuose vykdyti gyvasis organizmas panaudoja temperatūrų skirtumo, potencialų skirtumo, koncentracijų skirtumo ir kitus gradientus, apibūdinančius judėjimo kryptį ir kitimo greitį. Pavyzdžiui, Furje dėsnis nusako ryšį tarp šilumos srauto dq , tekančio augalo audiniais, ir temperatūros gradiento augalo audiniuose $gradT$:

$$dq = -\lambda gradT. \quad (1.1)$$

Fiko dėsnis nusako difunduojančios medžiagos srauto dm_i , einančio per ląstelės membraną, ir koncentracijų gradiento $grad C_{m_i}$ ryšį:

$$dm_i = a grad C_{m_i}. \quad (1.2)$$

¹ Fizinio požiūriu temperatūros gradientas rodo temperatūros kitimo intensyvumą kūne tarp dviejų izotermų (ilgio vieneto atžvilgiu) normalės kryptimi. Todėl temperatūrų skirtumas yra tik atskiras temperatūrų gradiento atvejis. Biologijos literatūroje labai dažnai *skirtumo* ir *gradiento* sąvokos sutapatinamos. Gamtoje vykstantys procesai vyksta tik veikiant varomosioms jėgoms, kurias apibūdina tam tikri gradientai.

Omo dėsnis nusako tekančios elektros srovės dydžio dA biologinės sistemos sužadavimo procesuose ir elektrinio potencialų gradiento $gradV$ ryšį:

$$dA = RgradV , \quad (1.3)$$

čia λ , a , R – nagrinėjamo proceso gyvųjų audinių šilumos laidžio, koncentracijų ir elektrinės varžos charakteristikos.

Išnagrinėjus pateiktus dėsningumus galima teigti, kad realūs procesai gamtoje (šilumos srautas, medžiagos difuzija, elektros srovė ir kt.) vyksta veikiant tam tikriems gradientams: temperatūros, medžiagų koncentracijos, elektros potencialo ir t. t. Taigi gyvojoje ir negyvojoje gamtoje varomajai jėgai palaikyti arba jai sukurti reikia pirminio energijos šaltinio. Augalijai tai yra Saulė, kuri teikia Žemei vieną geriausių energijos formų – spindulių energiją. Šią energiją pirmiausia naudoja augalai savo gyvybinėms funkcijoms vykdyti – organinei medžiagai kurti. Ne produktyviu paros laikotarpiu augalų audiniuose saulės energija, transformuota į chemines jungtis – organinius junginius, naudojama gyvybinėms funkcijoms palaikyti. Didžiąją dalį absorbuotos saulės energijos augalas paverčia prasčiausia energijos forma – šiluma. Šilumos energiją jis sunaudoja aplink save vykstantiems apykaitos procesams palaikyti, varomosioms jėgoms sukurti. Termodinaminiu požiūriu augalas yra prastas saulės energijos transformatorius į organinius junginius. Kitu požiūriu jis yra unikali ir pigi laboratorija. Augalas sugeba panaudoti nekoncentruotą saulės energiją (tai technikos įrenginiams nepriimtina) ir sukurti didžiausią Žemės turtą – organinę medžiagą, sunaudoti didžiąją dalį dėl šiuolaikinių technologijų atsirandančių į aplinką išmetamų teršalų, tiekti deguonį aplinkai, sukuriant sąlygas gyvybei Žemėje.

Kiekvienas kūnas, tarp jų ir augalas, jei jo temperatūra didesnė už absoliutaus nulio 0 K ($-273,16\text{ }^\circ\text{C}$) temperatūrą, nenutrūkstamai vykdo energijų apykaitą spinduliuodamas. Kartu jis spinduliuoja ir sugeria nuo kitų kūnų krentančią spindulių energiją. Taigi tarp augalo ir jo aplinkos (dirvos, kitų augalų, inžinerinių statinių, atmosferos ir kt.) nuolat vyksta spindulių energinė apykaita. Kūnai spinduliuoja energiją dėka kitų energijos formų, pasireiškiančių molekulinėms ir atominiams procesams lygmenyje. Kūno spinduliuojamos energijos kiekis priklauso nuo spinduliuojančio kūno fizikinių savybių ir jo temperatūros. Kūno temperatūrai didėjant didėja spinduliuojamos energijos kiekis. Spinduliavimo prigimtis yra

vienoda. Tai erdvėje sklindančios elektromagnetinės bangos. Jos viena nuo kitos skiriasi bangos ilgiu λ ir svyravimo dažniu per sekundę.

Žemės paviršius ir augalai gauna saulės energijos, kuri lemia biosferos egzistavimą. Saulė – tai nepaprastai galingas energijos šaltinis, kurio 1 cm^2 paviršiaus spinduliuoja į aplinką 6 kW galia. Tokią spinduliuojimo galią skleidžia kūnas, kurio temperatūra apie 6000 K. Vadinasi, tokią temperatūrą turi saulės paviršiaus išoriniai sluoksniai. Saulės spindulių intensyvumas, pasiekiantis aukštutinius atmosferos sluoksnius, esant vidutiniam atstumui tarp Saulės ir Žemės, yra 1382 W/m^2 ($1,98 \text{ kal/cm}^2 \cdot \text{min.}$). Dalį saulės spindulių sugeria Žemės paviršių dengianti atmosfera. Žemės paviršių pasiekia atmosferos nesugertoji saulės spindulių dalis.

Saulės energija Q (W), pasiekusi augalą, išsiskirsto į tris dalis:

$$Q = Q_A + Q_R + Q_T, \quad (1.4)$$

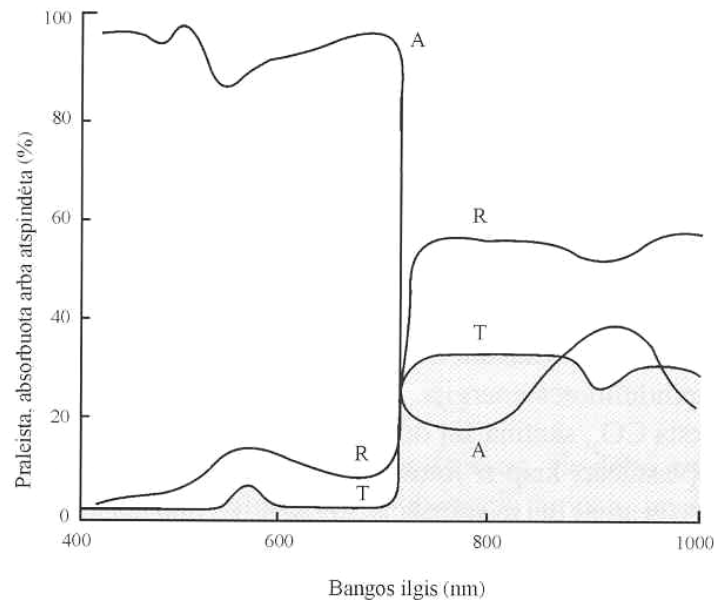
$$A + R + T = 1 \text{ arba } 100 \%, \quad (1.5)$$

čia Q_A , Q_R , Q_T – atitinkamai – augalo absorbuojamas, atspindimas ir praleidžiamas pro audinius saulės energijos kiekis, W.

A , R , T – atitinkamai – saulės spindulių absorbavimo, atspindėjimo ir praleidimo pro augalo lapo audinius koeficientas, vieneto dalimis arba %.

Augalas 2–4 % absorbuotos saulės energijos panaudoja fotosintezėi. Visa kita absorbuotos energijos dalis, kuri sudaro 98–96 %, virsta šilumos pavidalo energija. Matomos šviesos augalai absorbuoja 80–85 %, apie 10 % atspindi, apie 5–10 % praleidžia pro lapus (Fitter, Hay, 2002). Saulės energijos pasiskirstymas augalo lape 400–1000 nm bangos ilgio pateikta 1.1 pav.

Toliau nagrinėdami augale vykstančius energinius procesus, augalo energijų mainus su aplinka, augalo energijų balansus ir jų įtaką augalo gyvybiniams procesams remiamės termodinamikos dėsniais ir metodais. Augale vykstantys energiniai procesai yra tiesiogiai susiję su pagrindinėmis pasaulinio masto problemomis (maisto ir alternatyviosios energetikos), kurias galima apibūdinti kaip saulės energijos kaupimą biologine forma.



1.1 pav. Saulės energijos pasiskirstymas augalo lape 400–1000 nm bangos ilgio: A – lapo absorbuojama energija; R – lapo paviršiaus atspindima energija; T – lapo audinių praleista energija (Fitter, Hay, 2002)

Šiuolaikinių technologijų amžiuje žmogus bet kurios formos energiją sėkmingai gali panaudoti technologiniams procesams tik tada, kai ji yra koncentruota (anglis, nafta, mediena ir kt.). Šiuo metu nekonzentruotos energijos naudojimas priskiriamas mėgėjų veiklai. Saulės energijos, kaip atsinaujinančio energijos šaltinio, panaudojimas biologine forma vyksta per asimiliacijos procesą (aliejai, organinis kuras ir kt.). Šis procesas tiesiogiai priklauso nuo augale vykstančių biologinių procesų, nuo augalo energinės apykaitos, taip pat ir nuo aplink augalą vykstančių energinių termodinaminių procesų. Toliau pateikiame augalo ir aplink jį vykstančios energinės apykaitos termodinaminę analizę.

1.2. Augalo energijų balansas

Termodinamikos dėsniai yra universalūs. Jiems paklūsta gyvoji ir negyvoji gamta. Termodinamika remiasi fenomenologiniu metodu, kuris nagrinėja dėsningumus, nekreipiant dėmesio į proceso priežastis. Todėl aiškinant termodinaminius dėsningumus nesigilinama į procesus, kurie vyksta augale, pavyzdžiui, jam vystantis ar garinant vandenį. Mus supantis pasaulis, vertinant jį termodinamiškai, vadinamas „sistema“. Termodinaminė sistema gali būti gyvas organizmas: ląstelė, širdis, biosfera, augalas. Gyvas organizmas (augalas, gyvūnas), kaip termodinaminė sistema, yra atvira, nes su aplinka vykdo nenutrūkstamą energijų ir medžiagų apykaitą (Baltrėnas ir kt., 2008; Venslauskas, 1996; Зотин, 1974; Илькун, 1966).

Pagal pirmąjį termodinamikos dėsni vieną energijos rūšį gali virsti kita (pavyzdžiui, cheminė energija – šiluma). Šiame virsme energija neišnyksta ir neatsiranda. Todėl bet kuri augalo kaip gyvo organizmo gyvavimo momentą galima išreikšti energijų balanso lygtimi:

$$\sum Q = 0. \quad (1.6)$$

Ši lygtis rodo, kad augale gaunamos, sukauptos, sunaudotos ar atiduotos aplinkai energijų suma lygi nuliui.

Augalų fiziologiniuose tyrimuose augalo energijų balanso metodą pirmieji panaudojo H. T. Brown ir F. Escombe 1905 m. Vėliau šis metodas naudotas daugelyje mokslo darbų. Augalo energijų balansas nagrinėtas siekiant įvertinti jo ryšį su augale vykstančiais fiziologiniais procesais – transpiracija, fotosinteze, konvekciniams šilumos mainams (Илькун, 1967; Клешнин, 1960) arba siekiant teoriškai pagrįsti technologinius procesus, vykstančius piktžolių terminio naikinimo įrenginiuose (Bertram, 1996, Kurfess, 2000), žolės džiovavimo ir kituose technologiniuose procesuose (Лыков, 1968; Драганов и др., 1990, Драганов, 2006, Каялавиčius, 1992; 2010, Raila, 1995, Petruševičius, Raila, 2009).

Kaip minėta, gyvieji organizmai gamtoje egzistuoja kaip atviros energinės sistemos. Egzistavimui palaikyti gyvieji organizmai nuolat vykdo medžiagos ir energijų apykaitą su aplinka. Parametrus, kuriais galime apibūdinti augalo energijų būseną tam tikru laikotarpiu, laikome nekintamais, todėl jie nagrinėjamo laikotarpio tarpsniu yra pastovūs.

Energijų balanso metodika, pritaikyta gyvūnui, augalui arba jo daliai, padeda suprasti pagrindinius veiksnius, turinčius įtakos nagrinėjamo proceso vyksmui, nurodo būdus ir veiksnius, kuriais galima pakreipti vykstantį procesą norima linkme. Pavyzdžiui, siekiant reguliuoti augalo audinių temperatūrą, augale vykstančių procesų intensyvumą, siekti maksimalaus terminio efekto piktžolių terminio naikavimo technologijoje. Todėl išsamiai išanalizavus augalo energijų balanso narius, paaiškėja augale vykstančių fiziologinių procesų kryptingo valdymo galimybės. Remiantis augalo energijų balansu galima įvertinti visus energijų mainų pokyčius natūralioje ir žmogaus sukurtoje aplinkoje, nagrinėti augalo ir jo aplinkos energinius procesus, pvz., transpiracijos proceso, lapų vytimo, rasos iškritimo, radiacinės šalnos, augalo energinių mainų šiltnamio sąlygomis, energinius procesus piktžolių terminės kontrolės metu, augalo terminio žuvimo, augalo dalinio terminio pažeidimo energijų apykaitos procesus ir t. t.

Augaluose vegetacijos metu nuolat vyksta medžiagų ir energijos apykaita. Augalai fotosintezei panaudoja 1–2 % lapų absorbuotos saulės energijos (Илькун, 1967). Likusi energijos dalis (99–98 %) augalo lapuose virsta pačia paprasčiausia energijos rūšimi – šiluma (Илькун, 1966; Шульгин, 1970). *Saulės energija, augalo lapuose virtusi šiluma, turi būti atiduota aplinkai* vandens garų pavidalu arba skirta kaupti augalo audiniuose didinant audinių temperatūrą ir konvekcinius šilumos mainus su aplinka. Ploni augalo lapai dėl mažos masės ir biologiškai ribojamos maksimalios augalo audinių temperatūros augalo lape išskirtą šilumą ne visuomet gali panaudoti transpiracijos procesui. Todėl ant augalo lapo patekusi saulės energija virsta menkaverte, žemo potencialo šilumos energija ir tikslingai augalo nepanaudota atiduodama aplinkai kaip metabolitas. Augalas, paversdamas saulės energiją šiluma, tampa Žemės klimatui darančiu įtaką veiksniu, tiesiogiai dalyvauja Žemės vandens ir šilumos apykaitos cikluose.

Augalas su aplinka sudaro vientisą nedalomą sistemą, kurioje vyksta augalų energinė apykaita. Aplinkos poveikio augalui numatymo ir vertinimo pagrindiniai veiksniai yra šviesa (saulės energija), temperatūra (šiluma) ir drėgmė (vanduo). Šiuos tris aplinkos veiksnius, lemiančius augalo produktyvumo, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas kaip termoenerginis procesus galima nagrinėti naudojant termodinamikos dėsnius augalo energijų balanso metodu.

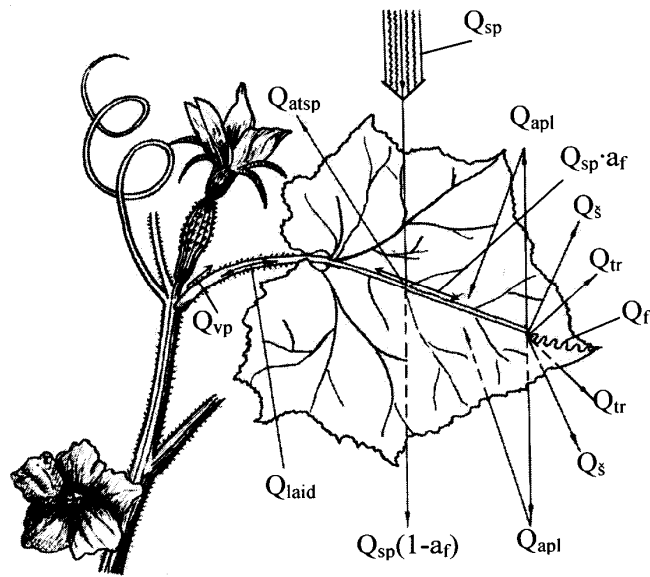
Augalas per ilgą savo evoliucijos kelią prisitaikė prie augavietės fizinės aplinkos veiksnių. Energijų tvermės dėsnio požiūriu, tik ką išlindeš iš žemės daigas, sąveikaudamas su aplinka (dirva, oru, saule), pradeda egzistuoti kaip atvira energijų apykaitos sistema, išlaikanti nuolatinę dinaminę energijų pusiausvyrą, išreiškiamą (1.6) lygtimi. Tai patvirtina lauke ir šiltnamiuose augančių augalų energijų balanso tyrimai. Šie tyrimai rodo didžiules augalo kaip organizmo galimybes prisitaikyti prie nepalankių aplinkos veiksnių: prie oro (dujų) aplinkos, oro termodinaminių savybių, kurias sugeba maksimaliai panaudoti nepalankiais energijų balanso atvejais. Tai ypač aiškiai matyti atliekant augalo dalies energijų balanso narių analizę aukštatemperatūroje aplinkoje, kuri naudojama piktžolėms termiškai naikinti.

Tarp augalo ir aplinkos nuolat vyksta energinė apykaita. Daigas iš spinduliuojančio šaltinio (saulės, švitinimo lemos) (Q_{sp}) gauna spindulių pavidalo energijos, atspindimos nuo viršutinių atmosferos sluoksnių (Q_{atsp}). Be to, jis gauna ilgabangių (infraraudonųjų) spindulių pavidalo energijos iš jo artimiausios aplinkos, pirmiausia – iš žemės paviršiaus (Q_{apl}). Daigas sugeria ne visą gautą energiją, o tik jos dalį. Tai įvertinama a_f ir a_{apl} koeficientais, kurie atitinkamai nusako daigo fiziologinės ir ilgabangės saulės energijos sugertas dalis.

Daigas šilumos pavidalu gauna arba atiduoda energiją aplinkai dalyvaudamas konvekciniuose šilumos mainuose (Q_s), sunaudoja šilumos energiją transpiracijai (Q_{tr}). Dalis augalo absorbuotos saulės energijos augalo audinių šilumos laidžiu perduodama kitiems augalo audiniams šilumos pavidalu (Q_{laid}). Energija taip pat sunaudojama fotocheminėms reakcijoms ir kitiems augale vykstantiems endoterminiams procesams (Q_f). Nors augalo lapų masė labai menka, tačiau juose pasireiškia šilumos termoakumuliacijos procesas (Q_{ta}). Dalis augalo gautos energijos naudojama iš šaknų kylančioms augalo sultims pašildyti arba aušinti (Q_{vp}). Čia aprašyta augalo ir aplinkos energijų apykaita pavaizduota 1.2 pav.

Visas augalas, taip pat ir kiekviena jo dalis su aplinka sąveikauja atskirai. Pasireiškia augalo apykaitos su aplinka sluoksniai (4 skyrius), augalų energinės apykaitos procesų pulsacijos (5 skyrius), todėl atskiros augalo dalys, jau nekalbant apie atskirus augalus, gali patirti skirtingą

energinę apykaitą su aplinka. Todėl energijų balansas kiekvienoje augalo dalyje tiriamuoju momentu gali skirtis priklausomai nuo pasireiškiančių energinių veiksnių intensyvumo.



1.2 pav. Augalo lapo ir aplinkos energijų apykaitos schema

Minėtų atskirų augalo energijų balanso narių įtaka yra gana nevienoda. Tai lemia ne tik daige vykstantys fiziologiniai procesai, bet ir savitos aplinkos sąlygos. Pavyzdžiui, daigo vystymuisi įtakos turi dirvos reljefas. Augalas daugiau ar mažiau gali pasinaudoti dirvos, grumsto išorinio paviršiaus drėgme ir temperatūra, gamtine aplinka, apsauginiais augalais, uždangomis, inžineriniais statiniais, darančiais įtaką augalo lokaliui mikroklimatui.

Bendriausiu atveju, apimančiu visus galimus augalo ar atskiros jo dalies energinės apykaitos atvejus, energijų balanso lygtį (1.6) galima išreikšti taip:

$$\Sigma Q = (Q_{sp} + Q_{atasp})a_f \pm Q_{apl}a_{apl} \pm Q_k - Q_r \pm Q_{laid} - Q_f \pm Q_a \pm Q_{vp} \pm Q_{kond} = 0. \quad (1.7)$$

Nagrinėdami augalo energinę apykaitą energijų balanso metodu, tyrėme klausimus, susijusius su augalo konvekciniiais šilumos mainais Q_s , augalo transpiracija Q_{tr} , šilumos laidžiu augalo audiniuose Q_{laid} , augalo audinių termoakumuliacija Q_{ta} .

Duomenys apie kitus energijų balanso narius: Q_f – energija, naudojama fotocheminėms reakcijoms ir kitiems augale vykstantiems endoterminiams procesams, Q_{vp} – energija, naudojama iš šaknų kylančioms augalo sultims pašildyti arba aušinti, Q_{sp} , Q_{atp} ir Q_{apl} – energijų balanso nariai, dalyvaujantys augalo energinės apykaitos procese, pateikiami remiantis kitų autorių duomenimis (Клешнин, 1960; Илькун, 1967; Шульгин, 1970; Fitter, Hay, 2002; Šlapakauskas, 2006).

Naudojant bendrą augalo energijų balanso lygtį (1.7) įvertinami veiksniai, darantys įtaką augalo energinei apykaitai. Aptarus konkrečias augalo energinės apykaitos sąlygas, anksčiau pateiktos energijų balanso lygtys gali būti supaprastintos pašalinus dalį energijų balanso narių. Tai priklauso nuo konkrečių augalo energinės apykaitos sąlygų, siekiamo tikslo ir atskirų balanso narių įtakos nagrinėjamam procesui.

Vertinant augalo energinę apykaitą spinduliavimo požiūriu, nesigilinant į šio energinės apykaitos būdo sudedamąsias dalis Q_{sp} , Q_{atp} ir Q_{apl} , naudojamas bendras saulės energijos rezultatas – efektyvus augalo ir jo aplinkos energijos srautas Q_s J/s, kuris išreiškiamas lygtimi:

$$Q_s = (Q_{sp} + Q_{atp}) a_f + Q_{apl} a_{apl} \quad (1.8)$$

Augalo energijų balanso narių (1.7) žymėjimas indeksais, apibūdinančiais procesą, patogus darant nedidelius darbus. Mūsų atveju, kai augalo energijų balansas nagrinėjamas įvairiais aspektais, taip jo narius žymėti nepatogu. Be to, augalo energinę apykaitą spindulių pavidalu išreiškus per vieną narį (1.8), šilumos balanso lygtis supaprastėja. Todėl pateikiame kitą augalo energinio balanso lygtį (1.7), tinkamą tolesniam nagrinėjimui:

$$\sum Q = \pm Q_1 \pm Q_2 - Q_3 \pm Q_4 \pm Q_5 \pm Q_6 \pm Q_7 \pm Q_8 = 0. \quad (1.9)$$

Bet kurį augalo energijų balanso lygties (1.9) narį Q (J/s) galime išreikšti energijos srauto tankiu q J/(s·m²), kuris tenka 1 m² paviršiaus ploto F , dalyvaujančio energinėje apykaitoje, tokia priklausomybe:

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (1.10)$$

Tuomet augalo energijų balanso lygtį (1.9) galime išreikšti procentais arba dalimis:

$$\sum q = \pm q_1 \pm q_2 - q_3 \pm q_4 \pm q_5 \pm q_6 \pm q_7 \pm q_8 = 1 \text{ arba } 100 \%, \quad (1.11)$$

čia Q_1, q_1 – efektyvus augalo ir jo aplinkos saulės energijos srautas. J/s arba šilumos srauto tankis. J/(s·m²). Atskirais atvejais Q_1, q_1 – atitinkamai – augalo absorbuojamas saulės energijos srautas. J/s arba šio srauto tankis. J/(s·m²);

Q_2, q_2 – atitinkamai – šilumos srautas, atiduodamas arba gaunamas iš aplinkos konvekciniiais šilumos mainais. J/s arba konvekcinis šilumos srauto tankis. J/(s·m²);

Q_3, q_3 – atitinkamai – šilumos srautas, sunaudotas transpiracijai ir atiduodamas aplinkai vandens garo pavidalo. J/s arba srauto tankis. J/(s·m²);

Q_4, q_4 – atitinkamai – šilumos srautas augalo audiniais per laidumą, kurį sukelia temperatūrų skirtumas augalo audiniuose. J/s, arba srauto tankis. J/(s·m²);

Q_5, q_5 – atitinkamai – šilumos srautas, energijos pavidalo fotocheminėms reakcijoms ir kitiems augale vykstantiems egzo- ir endotermiškams procesams. J/s arba srauto tankis. J/(s·m²);

Q_6, q_6 – atitinkamai – šilumos srautas, dalyvaujantis augalo audinių termoakumuliacijos procese. J/s, arba srauto tankis. J/(s·m²);

Q_7, q_7 – atitinkamai – šilumos srautas, dalyvaujantis iš šaknų kylančioms augalo sultims pašildyti arba aušinti. J/s arba srauto tankis. J/(s·m²);

Q_8, q_8 – atitinkamai – šilumos srautas, gaunamas iš aplinkos arba jai atiduodamas kondensuojantis vandens garams augalo paviršiuje (rasos iškritimo ir išnykimo procesas). J/s arba srauto tankis. J/(s·m²).

Aptarus konkrečias augalų energijų apykaitos sąlygas, anksčiau pateiktos energijų balanso lygtys gali būti suprastintos pašalinus dalį energijų balanso narių.

Analizuojant augalo energijų balanso lygtis, energinės apykaitos procese dalyvaujantis efektyvus saulės energijos srautas Q_1 ir energija,

dalyvaujanti konvekciniuose šilumos mainuose su aplinka Q_2 , priklausomai nuo saulės energijos ir šilumos srautų krypties, gali būti teigiamos arba neigiamos. Nagrinėjant atskirus augalo energijų balanso narius laikoma, kad šio balanso narys yra teigiamas, kai augalas iš aplinkos gauna energijos (šilumos) ir atvirkščiai – neigiamas, kai augalas energiją atiduoda aplinkai, t. y. šilumos srautas iš augalo nukreipiamas į aplinką.

1.3. Augalo energijų balanso narių apibūdinimas

Natūraliomis sąlygomis augalų energinė apykaita ir su ja susiję energiniai procesai vyksta nenutrūkstamai. Augalų energinės apykaitos procesų įvairovė yra labai didelė. Ji pasireiškia kaip augalo fiziologinis atsakas į jo aplinkos energinės apykaitos pokyčius. Nagrinėjant augalų energinės apykaitos procesus (2 skyrius) paaiškėjo, kad augale vykstantys fiziologiniai procesai reaguoja į aplinkos termodinaminių parametrų kitimą ir pasireiškia augalo energinės apykaitos pokyčiais. *Augalo biologinis atsakas į tam tikrą energinės apykaitos atvejį augale pasireiškia energijų srautų paskirstymu tarp pagrindinių energijų balanso narių: saulės energijos, transpiracijos, konvekcinių šilumos mainų, kai kuriais atvejais (pvz., aplinkoje esant rūkui) įtraukiant bioenerginį procesus, sukeltiant augalo dalies ir aplinkos temperatūrų gradientą.*

Kiekvienas augalo energijų balanso narys yra labai svarbus, todėl trumpai juos aptarsime (žr. (1.7, 1.9 ir 1.11 lygtis). Lygtys rodo, kad natūraliomis sąlygomis augalas, sąveikaudamas su aplinka, gali patirti 6 energijų balanso atvejus, sukuriančius skirtingus augalo egzistencijos periodus. Vegetacijos laikotarpiu kintantis augalo energijų balansas apibūdina energinės apykaitos su aplinka procesus, kuriuos jam tenka patirti didžiausio produktyvumo, mažiausios egzistencijos, žūties, radiacinės šalnos, rasos iškritimo ir išnykimo, teigiamo ar neigiamo temperatūrų gradiento atsiradimo ir t. t. sąlygomis (2 skyrius).

Žalias augalo lapas saulės energiją sugeria selektyviai – apie 80–95 % ultravioletinių, matomų ir tolimų ($>1 \mu\text{m}$) infraraudonųjų spindulių. Artimų infraraudonųjų ($0,7\text{--}1,0 \mu\text{m}$) spindulių – 5–15 %. Iš matomų spindulių didesnė mėlynųjų ir raudonųjų spindulių sugertis (90–95 %), o žaliųjų spindulių – mažesnė (50–80 %). Infraraudonuosius spindulius ($>1 \mu\text{m}$) paprastai absorbuoja augalo audiniuose esantis vanduo. Natūraliomis aplinkos sąlygomis augalo lapas absorbuoja 35–50 % integralinės saulės spinduliuotės ($0,3\text{--}4,0 \mu\text{m}$). Daugiausia (75–85 %) absorbuojama

bangų ilgio (0,38– 0,72 μm) spinduliuotės, kurioje sukoncentruota apie 45–50 % integralinės saulės spinduliuotės (Kleschnin, 1960; Шулгин, 1970). Šviesos poveikis augalams priklauso nuo šviesos bangos ilgio ir spinduliuotės srauto tankio (W/m^2). Fotosintetinės sistemos sugeria apie pusę matomos šviesos spindulių.

Augalą ir jo dalį supa aplinka (augalai, pastatai, dirva ir kt.). Jie išspinduliuoja energiją į matomą erdvę. Spinduliuavimo srauto tankis q W/m^2 , išreiškiamas Stefano ir Bolcmano dėsnium:

$$q = E_0 = \varepsilon\sigma T^4, \quad (1.12)$$

čia $q = E_0$ – paviršiaus spinduliuojamo energijos srauto tankis, W/m^2 ;
 ε – pilko kūno juodumo laipsnis. Augalo dalių $\varepsilon = 0,97$ (Bertram, 1998; Илькун, 1967);

σ – absoliučiai juodo kūno spinduliuavimo konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$;

T – absoliučioji temperatūra, K.

Išspinduliuota vienu kūnų energija krenta ant kitų, kurie spinduliuojamą energiją absorbuoja, atspindi arba praleidžia. Taigi nuo augalo ar kito paviršiaus sklindantis spindulių srautas susideda iš vadinamųjų savų ir atspindimų spindulių. Bendras efektyvus spindulių srautas (1.9), kurį spinduliuoja arba gauna augalas ar jo dalis, yra:

$$Q_1 = Q_s = (Q_{sp} + Q_{atp})a_f + Q_{apl}a_{apl}, \quad (1.13)$$

čia $Q_1 = Q_s$ – efektyvus spindulių energijos srautas, veikiantis augalą ir jo aplinką, J/s, (q_1 – srauto tankis, $\text{J}/\text{s}\cdot\text{m}^2$).

Augalo energijų balanso narys Q_k apibūdina daigo ir aplinkos konvekcinius šilumos mainus, kuriuos nusako Niutono dėsnis.

$$Q_2 = Q_k = \alpha\Delta t F \text{ arba } q_2 = q_k = \alpha\Delta t, \quad (1.14)$$

čia q_k – specifinis konvekcinis šilumos srautas augalo ar jo dalies paviršiuje, W/m^2 ;

α – šilumos atidavimo koeficientas, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;

Δt – teigiamas augalo audinių ir jų aplinkos temperatūrų skirtumas, $^\circ\text{C}$.

Normaliomis augalo gyvenimo sąlygomis šis temperatūrų skirtumas Δt būna ir teigiamas, ir neigiamas. Jis paprastai būna nedidelis, nes augalo audinių perkaitinimą reguliuoja transpiracija (kai kuriais atvejais šis skirtumas pasiekia 5 °C). Tokio temperatūrų skirtumo pakanka metabolitų judėjimui augalo dalies apykaitos su aplinka sluoksnyje (2 skyrius).

Augalo lapų, kaip vieno iš svarbiausių augalo asimiliacinių organų, šilumos atidavimo koeficiento reikšmes nustatinėjo daugelis autorių (Лькун, 1967; Raschke, 1965). Kaip nustatyti šilumos atidavimo koeficientą α nagrinėsime tolesniuose skyriuose, kiekvienu atveju atskirai įvertindami konkrečius augalo dalies šilumos apykaitos atvejus. Čia svarbu paminėti, kad šilumos atidavimo koeficientas priklauso nuo daugybės kintamųjų. Šilumos fizikoje jis randamas naudojantis kriterinėmis lygtimis. Tai vienas iš sunkiausiai apskaičiuojamų rodiklių skaičiuojant technikos objektų konvekcinius šilumos mainus. Mūsų nuomone, bet kokios pastangos nustatyti šilumos atidavimo koeficientą α skirtingoms augalo dalims yra beprasmės ir praktiškai neįgyvendinamos. Reikia naudoti šilumos fizikos lygtimis konvekciniam šilumos mainų koeficientui α skaičiuoti, įtraukiant pataisas, įvertinančias augalo dalies biologinius ypatumus ir jo aplinkos sąlygas.

Augalo energijų balanso narys Q_{tr} , apibūdinantis energijos sąnaudas transpiracija, išreiškiamas lygtimi:

$$Q_3 = Q_{tr} = r \cdot w, \quad (1.15)$$

čia r – vandens garavimo šiluma, kJ/kg ($r = 2465$ kJ/kg, esant 15 °C);
 w – transpiracijos intensyvumas, kg/(m²·s).

Esant normalioms augimo sąlygoms, augalo transpiracijos intensyvumas gali būti apskaičiuojamas naudojant energijų balanso lygtį arba tiesiogiai matuojant. Normaliai augančio augalo transpiracijos intensyvumas vidurdienį pasiekia $w = 593$ g/(m²·h) (Dagys ir kt., 1974; Šlapakauskas, 2006). Apie dygstančio augalo transpiracijos intensyvumą duomenų nerasta. Nepriklausomai nuo transpiracijos intensyvumo, vandens garavimo šiluma natūralios aplinkos sąlygomis priklauso nuo temperatūros ($r = 2453$ kJ/kg, esant 20 °C).

Augalo transpiracija nagrinėjama plačiai, aptariant šiam procesui įtaką darančius veiksnius: augalo lapo žiotelėse vykstančius procesus (Nobel, 1991; 2005, Larcher, 1995, Lambers, 2006), fotosintezę, vandens

patekimo į augalą procesus (Larcher, 1995, Schopfer, 2006 Веретенников, 2006.), vandens režimo fiziologiją, dirvą ir mineralinę mitybą (Šlapakauskas, 2006, Алексина, 2006). Apie transpiraciją kaip metabolitų šalinimo procesą augalo laro apykaitos su aplinka sluoksnyje duomenų neradome. Tai labai svarbūs veiksniai, darantys įtaką augalo gyvybinėms funkcijoms ir jo produktyvumui. Šie veiksniai svarbūs augalo transpiracijos procesui, tačiau ne jie yra lemiantys. *Vandens garinimo procesas – transpiracija – nevyks be energijos*. Transpiracijai turi įtakos daugelis veiksnių. Tačiau kaip bevertintume transpiraciją, ji yra *energinis veiksnys*, suteikiantis galimybę reguliuoti augalo dalies temperatūrą garinant vandenį.

Augalo energijų balanso narys Q_{laid} apibūdina šilumos tekėjimą augalo audiniais laidžiu. Šilumos mainus laidžiu nusako Furje dėsnis:

$$Q_4 = Q_{laid} = \lambda \frac{t_2 - t_1}{l} F, \quad (1.16)$$

$$q_4 = q_{laid} = \lambda \frac{t_2 - t_1}{l}, \quad (1.17)$$

čia λ – augalo daigo audinių šilumos laidžio koeficientas (fizikinė augalo audinių charakteristika), W/(m·K);

$t_2 - t_1$ – teigiamų temperatūrų skirtumas tarp laisvai pasirinktų 1 ir 2 taškų augalo audiniuose, °C;

l – atstumas tarp 1–2 taškų, m.

Kadangi augalo (daigo) pagrindinė sudėtinė dalis yra vanduo (88–95 %), augalo audinių šilumos laidžio koeficientas yra artimas vandens šilumos laidžiui ir lygus $\lambda \cong 0,575$ W/(m·K). Šilumos laidžio koeficientas nustatomas eksperimentu. Kol kas nėra priemonių gyvuose audiniuose pasiekti pastovias sąlygas, todėl eksperimentais jų nustatyti negalime. Teoriškai paskaičiuoti negalima, nes tai kūno fizikinė charakteristika. Blogu šilumos laidžiu pasižymi visi gyvi audiniai, taip pat ir augalo.

Augalo energijų balanso narys $Q_5 = Q_f$ (W/m²) apibūdina sunaudojamą energiją augalo gyvybinėms funkcijoms – fotocheminėms reakcijoms ir endoterminiams procesams palaikyti. Augdami normaliomis aplinkos sąlygomis, augalai sunaudoja fotosintezei 0,5–2 % aktyvios absorbuotos saulės energijos, trumpalaikiais momentais – 4–6 %. Augalų fluorescencijai ir endoterminiams procesams sunaudojama apie 0,3 % absorbuotos saulės energijos (Шулгин, 1970).

Augalo energijų balanso narys $Q_6 = Q_{ta}$ apibūdina augalo termoakumuliacines savybes. Augalo arba jo dalies audiniuose sukauptą arba jų atiduotą aplinkai šilumą galime išreikšti lygtimi:

$$Q_6 = Q_{ta} = mc(t_2 - t_1), \quad (1.18)$$

čia m – augalo antžeminės (kaitinamos) dalies, dalyvaujančios termoakumuliacijos procese, masė, kg;

c – augalo audinių savitoji masinė šiluma, kJ/(kg·K);

$t_2 - t_1$ – pradinės ir galinės šildomų augalo audinių temperatūrų skirtumas, °C.

Daigo audinių savitoji masinė šiluma, atsižvelgiant į labai didelį vandens kiekį juose, yra $c = 4,0$ kJ/(kg·K). Pakeliant augalo lapo, kurio masė $0,025$ g/cm², temperatūrą 1 °C, sunaudojama $0,096$ J šilumos. Tai labai mažas šilumos kiekis tarp kitų augalo lapo energijų balanso narių. Todėl daugeliu atvejų energijų balanso nario Q_6 galima nevertinti.

Augalo energijų balanso narys $Q_7 = Q_{vp}$ apibūdina augalo sultims pašildyti patiriamus šilumos nuostolius, kurie sunaudojami transpiracijos proceso metu. Šiuos nuostolius galima nustatyti iš lygties:

$$Q_7 = Q_{vp} = c \cdot w(t_2 - t_1), \quad (1.19)$$

čia c – augalo sulčių savitoji masinė šiluma ($c = 4,19$ W/(kg·K));

w – transpiracijos intensyvumas, kg/(m²·s).

$t_2 - t_1$ – augalo sulčių šildymo metu susidaręs teigiamas temperatūrų skirtumas, °C.

Augalo energijų balanso narys $Q_8 = Q_{kond}$ apibūdina šilumą, gautą iš aplinkos kondensuojantis vandens garams arba atiduotą aplinkai garuojant vandeniui augalo paviršiuje. Tai rasos iškritimo ir išnykimo procesas, apibūdinamas šilumos srautu J/s arba šilumos srauto tankiu q_8, q_{kond} J/(s·m²). Šis augalo energijų balanso narys, dalyvaujantis rasos iškritimo ir išnykimo metu, nagrinėjamas 2 skyriuje.

Šiame skyriuje pateiktas augalo energijų nagrinėjimas yra įvadas tolesnei augalų energinės apykaitos studijai. Susipažinus su pagrindinėmis sąvokomis ir augalijos energinės apykaitos dėsniniais, galima toliau nagrinėti natūralioje aplinkoje vykstančią augalų energinę apykaitą.

2 Augalų energinės apykaitos procesų dėsningumai

Auguose vegetacijos metu vyksta nenutrūkstama medžiagų ir energijos apykaita. Augalai fotosintezei panaudoja ne daugiau kaip 2–4 % absorbuotos saulės energijos. Augalo lapas saulės energiją naudoja labai neefektyviai. Likusi absorbuotos saulės energijos dalis (96–98 %) augalo lapuose virsta pačia paprasčiausia pasaulyje energijos rūšimi – šiluma. Saulės energija, augalo lapuose virtusi šiluma, turi būti atiduota aplinkai arba kaupiama augalo audiniuose, didinant jų temperatūrą. Gyvų augalo audinių maksimali temperatūra ribojama. Augalų audinius staigiai įkaitinus daugiau kaip 58 °C, ląstelėse koaguliuoja baltymai, suyra ląstelių membranos ir audinius ištinka letali baigtis (Ellwagner et al., 1973; Hege, 1990; Levitt, 1980; Stašauskaitė, 1995; Daniell et al., 1969). Šiluma kaupiama masyviuose augalo audiniuose, todėl juose temperatūra kinta lėtai. Ploni augalo lapų audiniai dėl mažos jų masės ir fiziškai ribojamos maksimalios temperatūros ne visuomet gali išskirti šilumą kaupti. Todėl saulės energija, virtusi šiluma, turi būti atiduodama aplinkai kaip metabolitas. Energinės apykaitos požiūriu augalas su savo aplinka sudaro vientisą nedalomą sistemą. Aplinkos poveikio augalui numatymo ir vertinimo pagrindiniai veiksniai yra šviesa (saulės energija), temperatūra (šiluma) ir drėgmė (vanduo). Šiuos tris aplinkos veiksnius, lemiančius augalo produktyvumą, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas, galima nagrinėti kaip termoenerginis, panaudojant termodinamikos dėsnius augalo energijų balanso metodu (1 skyrius).

Per ilgą evoliucijos kelią augalai maksimaliai prisitaikė prie aplinkos veiksnių. Saulės energiją jie sugeria selektyviai. 80–95 % sugertos saulės energijos sudaro ultravioletiniai ir fotosintetiniškai aktyvūs spinduliai, kurių bangos ilgis 0,20–0,70 μm , tai sudaro apie 45–50 % saulės spinduliuotės. Trumpųjų infraraudonųjų spindulių augalai sugeria 5–15 % (0,7–1,0 μm). Augalų (mezofitų) lapai 22–24 % krintančios in-

tegralinės saulės spinduliuotės (0,2–4,0 μm) praleidžia, 41–44 % atspindi (nepriklausomai nuo lapų anatominės struktūros), o 34–37 % – sugeria (Илькун, 1967; Шульгин, 1970).

Augalo lapo paviršiuje tarp lapo ir aplinkos vyksta sudėtingi termohidromechaniniai procesai. Augalo lapo išoriniame sluoksnyje iš aplinkos lapo paviršiaus kryptimi juda CO_2 dujų masė. Tame pačiame augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje, bet priešinga kryptimi vyksta vandens garų, deguonies masių ir šilumos Q judėjimas. Taigi tuo pačiu metu augalo lapo paviršiuje, tame pačiame lapo ar kitos augalo dalies apykaitos su aplinka oro sluoksnyje susidaro du vienas kitam priešingi srautai. Jie priešingi ir fiziologiniu požiūriu. CO_2 naudojamas organinei medžiagai kurti, O_2 , Q ir H_2O – organinės medžiagos kūrimo proceso medžiaginės ir energinės apykaitos atliekos – metabolinis produktas. Augalo medžiagų ir energijų apykaita su aplinka vyksta dėsningai. Tarp augalo ir jį supančios aplinkos ji vyksta per nuosekliai kintančių parametrų oro sluoksnį. Jam apibūdinti vartojame terminą – *augalo apykaitos su aplinka sluoksnis*. Jį nagrinėsime 4 skyriuje Fizinė prasme tai yra augalo sąlyčio su aplinka sluoksnis, per kurį vyksta augalo medžiagų ir energijų apykaita su aplinka.

Augalo gyvybinius procesus (įskaitant ir derlių), esant vienodoms sąlygoms, lemia minimumo veiksnys. Procesai, vykstantys aplink augalo lapą apykaitos su aplinka oro sluoksnyje, kol kas nebuvo laikomi veiksniumi, turinčiu įtakos augalo produktyvumui, jie mažai tyrinėti. Energijų ir masių apykaita su aplinka daro tiesioginę įtaką metabolitų šalinimo procesui.

Labai svarbus rodiklis yra augalo asimiliacinio aparato teorinis pajėgumas absorbuotą saulės energiją panaudoti organinei medžiagai kurti. Skaičiavimai rodo, kad teoriškai lapas fotosintezei gali sunaudoti daugiau kaip 25 % fiziologiškai aktyvios energijos. Faktinis absorbuotos saulės energijos panaudojimas organinei medžiagai kurti – apie 4 % (Šlapakauskas, 2006; Илькун, 1966). Vadinasi, augalo asimiliacinio aparato pajėgumo atsargos koeficientas labai didelis – apie 5. Todėl tenka ieškoti veiksnių, neleidžiančių padidinti fotosintezės proceso efektyvumą. Padidinus saulės energijos panaudojimo koeficientą organinei medžiagai kurti būtų išspręsta maisto ir alternatyviosios energijos problema Žemėje.

Augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesai gali būti pastovūs ir kintantys. Energinių procesų kintamumas pasireiškia augalo audinių temperatūros ir augalo aplinkos parametrų kitimu. Tai gamtoje vykstan-

tys realūs augalų energinės apykaitos procesai. Kintamos energinės apykaitos metu augalo lape, jo lokaliame taške temperatūra keičiasi priklausomai nuo laiko. Augalo audiniuose šiluma plinta temperatūros mažėjimo kryptimi. Bet kurio augalo audinių taško temperatūrą galima išreikšti jo koordinatų x , y , z ir laiko τ funkcija taip:

$$T = f(x, y, z, \tau). \quad (2.1)$$

Pastovius augalų energinės apykaitos procesus laikome idealiais. Augalų pasaulyje pastovų procesą aptikti sunku, nebent naktį, rasos iškritimo arba rasos išnykimo metu. Jei augalo audinių temperatūros kitimas laike mažai pastebimas, tai augalo energinės apykaitos procesą galima laikyti artimu pastoviam. Pastovių energinių procesų apykaitos nagrinėjimas labai palengvina jų analizę ir vertinimą, padeda nustatyti pagrindinius veiksnius, darančius įtaką augalų energinei apykaitai, ir šio proceso dėsningumus.

Siekdami teoriškai pagrįsti aplink augalų apykaitos su aplinka sluoksnyje vykstančius procesus toliau pateikiame šių procesų analizę ir vertinimą.

2.1. Augalų energinės apykaitos balansai

Augalo transpiracija (vandens garinimas) – sudėtingas procesas. Jis susideda iš dviejų atskirų procesų – fiziologinio ir fizikinio. Fiziologinio proceso metu augalo sultys kapiliarais (vandens indais) juda iki garinamo paviršiaus, o fizikinio proceso metu vanduo išgarinamas į aplinką. Vandeniui garinti naudojama šiluma, kurią augalas gauna iš aplinkos dėl augalo energinės apykaitos. Esant mažai saulės spinduliuotei, augalas gali naudoti energiją, gaunamą iš konvekcinių šilumos mainų su jo aplinka. Žemės sausumos paviršius per metus išgarina apie 70250 km^3 vandens. 1 kg vandens išgarinti sunaudojama 2500–2440 kJ/kg (priklausomai nuo temperatūros) šilumos. Taigi transpiracija yra ne tik fiziologinis, bet ir termofizikinis procesas, vykstantis tarp augalo ir jį supančios erdvės. Transpiracija yra augalo energijų ir drėgmės apykaitos augalo aplinkoje procesas. Todėl šie procesai privalo būti nagrinėjami kartu kaip šilumos ir drėgmės mainų su aplinka termodinaminis procesas. Transpiracija yra viena iš pagrindinių vandens apykaitos ekosferoje sudedamųjų

dalių, per metus atiduodanti aplinkai 65200 km^3 vandens vandens garo pavidalu (Guo et al., 1999, 2002; Herve et al., 2002; Brazauskienė, 2006).

Augalas absorbuoja dalį (34–37 %) saulės integralinės spinduliuotės. Didžioji dalis saulės absorbuotos energijos (96–98 %) augale virsta šiluma, kurią augalas turi atiduoti aplinkai. Galimi trys šilumos atidavimo aplinkai būdai: pirmasis – tai tiesioginis – konvekcinis augalo lapo šilumos atidavimas aplinkai, kurį nusako Niutono dėsnis, antrasis – tai augalo lapo spinduliavimas į aplinką, kuriam taikomi kūnų spinduliavimo dėsniai, trečiasis – tai šilumos sunaudojimas vandeniui iš augalo garinti, t. y. transpiracijai. Šilumos sunaudojimas vandeniui garinti ir vandens garų atidavimas aplinkai yra gana sudėtingi procesai, priklausantys nuo augalo biologinių ypatumų ir jo aplinkos oro parametrų kitimo. Vandens garavimas nusakomas Daltono dėsniu, kuris taikytinas laisvai garuojančiam vandens paviršiui, taip pat Stefano dėsniu, papildomai įvertinančiu Stefano srautus kapiliariniuose poringuose kūnuose. Šie dėsniai nevisiškai įvertina transpiracijos procesą. Daltono ir Stefano dėsniai nusako priklausomybę nuo parcialinių slėgių skirtumo, visiškai nevertinant augalo biologinių savybių, jo adaptacijos kiekvienu augalo energinių mainų su aplinka atveju. Nevertinama ir energijos srautų pasiskirstymo tarp transpiracijos ir šilumos atidavimo konvekcija priklausomai nuo augalo aplinkos sąlygų (rasos, šalnos, rūko susidarymo, piktžolių terminio naikinimo).

Augalai įvairiais savo gyvenimo periodais yra jautrūs kiekybiniam aplinkos veiksniams, ypač drėgmei, aplinkos temperatūrai, saulės spinduliuotei. Šie trys veiksniai tarpusavyje yra glaudžiai susiję. Juos sieja augalų energinės apykaitos su aplinka dėsniai. Aplink augalą vykstančių energijos ir drėgmės mainų procesų termodinaminė analizė remiasi atitinkamų balansų metodais (Incropera, De Witt, 2001; Petrusevičius, Raila, 2009; Ruseckas, 2002).

Analizuodami atskirų augalo energijų balanso narių įtaką, įvertinę energinės apykaitos sąlygas aplink augalą, kai kuriais atvejais galime supaprastinti augalo balanso lygtis (1.7) ir (1.9). Galime parinkti augalo energijų apykaitos laikotarpį, kuomet nėra šilumos mainų augalo audinių laidžiu ($Q_4 = 0$), šiluma egzo- ir endoterminiams procesams ($Q_5 = 0$), termoakumuliacijai ($Q_6 = 0$), kylančioms augalo sultims pašildyti ($Q_7 = 0$), šiluma dėl rasos iškritimo ($Q_8 = 0$) turi minimalias reikšmes ir nedaro didesnės įtakos augalo energijų balansui. Tuomet augalo lapo (ar kitos

dalies) energijų balanso lygtis (1.9) ir (1.11), įvertinančias pagrindinius energinės apykaitos balanso narius (absorbuojamą saulės energiją Q_1 , konvekcinius šilumos mainus su aplinka Q_2 ir transpiraciją Q_3), bet kuriuo nagrinėjamu atveju galime išreikšti taip:

$$abQ_{sp} = Q_1 = \pm Q_2 + Q_3 \quad (2.2)$$

arba

$$abq_{sp} = q_1 = \pm q_2 + q_3, \quad (2.3)$$

čia a – koeficientas, kuriuo įvertinama absorbuotos saulės energijos dalis, augale virstanti šiluma, % arba dalimis ($a = 0,96-0,98$);

b – augalo absorbuojama saulės integralinės spinduliuotės dalis, % arba dalimis ($b = 0,34-0,37$);

Q_{sp} , q_{sp} – atitinkamai saulės integralinės spinduliuotės srautas, J/s arba srauto tankis, J/(s·m²);

Q_1 , q_1 – atitinkamai efektyvus saulės energijos srautas tarp augalo ir jį supančios erdvės, J/s arba šilumos srauto tankis, J/(s·m²);

Q_2 , q_2 – atitinkamai šilumos srautas, atiduodamas arba gaunamas iš aplinkos konvekciniiais šilumos mainais, J/s arba konvekcinis šilumos srauto tankis, J/(s·m²);

Q_3 , q_3 – atitinkamai šilumos srautas, sunaudotas transpiracijai ir atiduodamas aplinkai vandens garo pavidalo, J/s arba srauto tankis, J/(s·m²).

Augalo lapo energinės apykaitos procese dalyvaujanti saulės energija Q_1 ir šilumos energija, dalyvaujanti konvekciniuose šilumos mainuose su augalo aplinka Q_2 , priklausomai nuo saulės energijos ir konvekcinių šilumos srautų krypties, gali būti teigiamos arba neigiamos. Minėjome, kad nagrinėdami augalo energijų balansus laikomės tokių sutartinių ženklų: tiekiant augalui šilumą iš aplinkos (kai šilumos srautas iš aplinkos nukreiptas į augalą), energijų balanso narys yra teigiamas, ir atvirkščiai – kai augalas šilumą atiduoda aplinkai (kai šilumos srautas nukreiptas iš augalo į aplinką), energijų balanso narys yra neigiamas. Tai priklauso nuo augalo ir jo aplinkos energinės apykaitos. Transpiracijos procese energijos srautas vandens garo pavidalu Q_3 visais atvejais nukreiptas iš augalo į aplinką, todėl jis visuomet yra neigiamas. Įvertinę pagrin-

dinius augalo energinės apykaitos balanso narius (2.2), lygtį galime išreikšti taip:

$$\Sigma Q = \pm Q_1 \pm Q_2 - Q_3 = 0 \quad (2.4)$$

arba

$$Q_3 = \pm Q_1 \pm Q_2. \quad (2.5)$$

Priklausomai nuo augalo energinės apykaitos procese (2.5) dalyvaujančių energijų Q_1 , Q_2 , Q_3 srautų dydžio ir krypties galimi 6 augalo ir jo aplinkos energijų balanso atvejai.

Pirmasis atvejis. Augalo absorbuojamos saulės energijos srautas Q_1 yra sunaudojamas transpiracijos procesui Q_3 ir konvenciniams šilumos mainams Q_2 su aplinka. Tai saulėto paros meto augalo energijų balansas. Šiuo atveju augalo lapo energijų balansą galima išreikšti taip:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \text{ arba } Q_3 = Q_1 - Q_2. \quad (2.6)$$

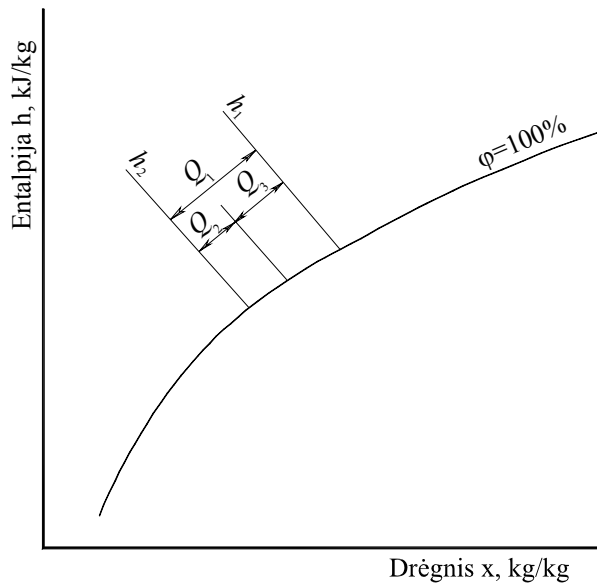
Augalo lape nenutrūkstamai vyksta energijos apykaita su jo aplinka. Dėl mažos masės augalo lapas šilumos pavidalo energijos kaupti negali. Vadinasi, visą gautą energiją jis atiduoda aplinkai šilumos ir vandens garo pavidalu. Tokius energinės apykaitos procesus, kuriuose dalyvauja šiluma ir drėgmė, galima grafiškai vaizduoti, skaičiuoti ir nagrinėti $h-x$ diagramoje* (h – oro entalpija, x – oro drėgnis). Šie energinės apykaitos procesai vyksta keičiantis aplinkos parametrams entalpijų h_1 ir h_2 intervale (2.1 pav.).

* h – oro entalpija kJ/kg. Tai energinis parametras, matuojamas kJ 1 kg drėgno oro, paskaiciuotas 1 kg absoliučiai sauso oro. Procesuose, kuriuose vyksta garavimas, nekintantis parametras yra 1 kg absoliučiai sauso oro. Jis gali turėti daugiau ar mažiau drėgmės. Todėl h didėja didėjant oro temperatūrai ir drėgmeniui.

x – oro drėgnis kg/kg. Matavimo vieneto prastinti negalima, nes jis išreiškiamas kg drėgmės 1 kg sauso oro.

$h-x$ diagrama sudaroma pastoviam drėgnojo oro slėgiui (pvz., 100 kPa). Diagramos sudarymas ir pagrindinių procesų vaizdavimas aprašytas vadovėliuose nagrinėjant drėgnojo oro termodinamiką. $h-x$ diagrama plačiai naudojama drėgno oro parametrams skaičiuoti. Oro kondicionavimo ir džiovavimo praktikoje žinomos kaip Molje (R. Mollier) arba Ramzino diagramos.

Augalo energijų balansas, išreikštas energijų Q_1 , Q_2 , Q_3 aritmetine suma, apskaičiuojamas (2.6) lygtimi, $h-x$ diagramoje visais atvejais bus vaizduojamas entalpijų h_1 ir h_2 intervale virš ribinės (santykinio oro drėgnio) kreivės $\varphi = 100\%$. Grafinis augalo energijų balanso pirmojo atvejo vaizdas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.1 pav.

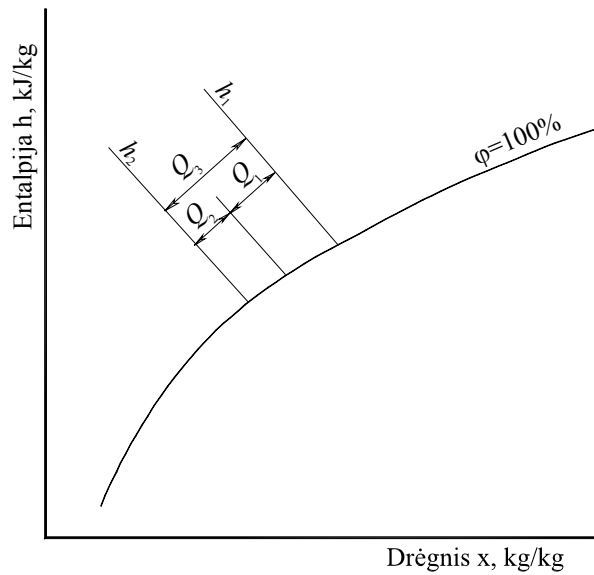


2.1 pav. Energijų balanso, kai augalas absorbuotą saulės energiją atiduoda aplinkai šilumos ir vandens garo pavidalu, schema $h-x$ diagramoje

Antrasis atvejis. Transpiracijai augalas sunaudoja visą absorbuotą saulės energiją Q_1 ir energiją, kurią gauna iš aplinkos konvecinių šilumos mainų būdu Q_2 . Tai saulėto dienos meto, ryto ar vakaro valandų augalo energijų balansas. Šį balansą galima išreikšti taip:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2. \quad (2.7)$$

Antrojo augalo energijų balanso atvejo, kai augalas visą gautą energiją iš aplinkos Q_1 ir Q_2 sunaudoja transpiracijai, grafinis vaizdas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.2 pav.

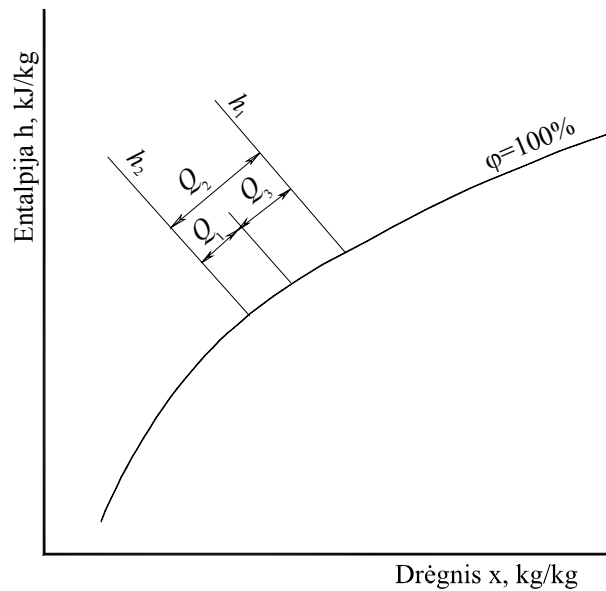


2.2 pav. Energijų balanso, kai augalas visą gautą energiją iš aplinkos sunaudoja transpiracijai, schema $h-x$ diagramoje

Trečiasis atvejis. Augalas energinei apykaitai su aplinka energiją gauna iš aplinkos tik konvekcinio šilumos mainų būdu Q_2 . Dalį šios gautos energijos jis išspinduliuoja į aplinką Q_1 ir dalį Q_3 sunaudoja transpiracijai. Tai giedro pavakario metas, pastebimas prieš rasos iškritimą. Tai atvejis, kai aplinkos oro temperatūra yra didesnė nei augalo audinių. Konvekciniai šilumos mainai tarp augalo lapo ir aplinkos visiškai padengia augalo šilumos spinduliavimo į aplinką Q_1 ir transpiracijos Q_3 poreikius. Šiuo atveju energijų balansą galima išreikšti taip:

$$Q_2 = Q_1 + Q_3 \text{ arba } Q_3 = Q_2 - Q_1. \quad (2.8)$$

Trečiojo energijų balanso atvejo, kuris pastebimas prieš rasos pasirodymą augalų paviršiuje, grafinis vaizdas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.3 pav.

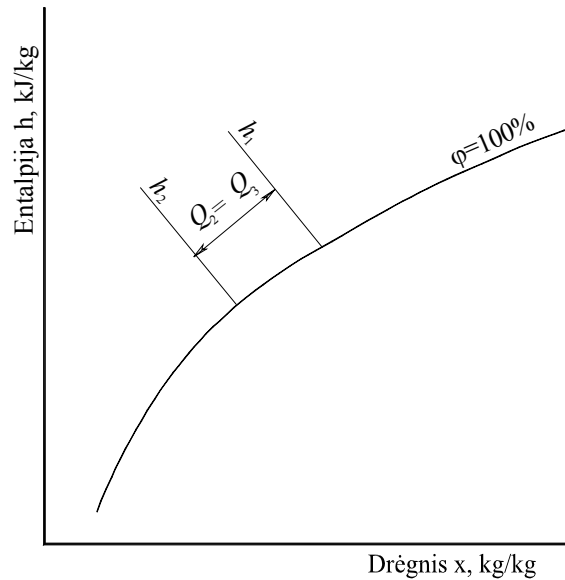


2.3 pav. Energijų balanso, kai augalas energiją, gautą iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka, sunaudoja neigiamam spinduliavimui ir transpiracijai, schema $h-x$ diagramoje

Ketvirtasis atvejis. Spindulių pavidalo saulės energija, augalo gaunama iš aplinkos Q_1 yra lygi į aplinką išspinduliuojamai energijai. Vadinasi, saulės energija augalo lapo energinės apykaitos procese šiuo atveju nedalyvauja, $Q_1 = 0$. Augalas visą energiją, gaunamą iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka, sunaudoja transpiracijai. Šiuo atveju energijų balanso lygtis bus tokia:

$$Q_1 = 0, \quad Q_3 = Q_2. \quad (2.9)$$

Lygtis (2.9) rodo, kad augalo energinės apykaitos procese spinduliavimui nedalyvaujant, visa konvekcijos būdu gauta šiluma sunaudojama transpiracijai. Tai saulėtos dienos giedro pavakario atvejis. Šio augalo energijų balanso atvejo grafinis vaizdas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.4 pav.

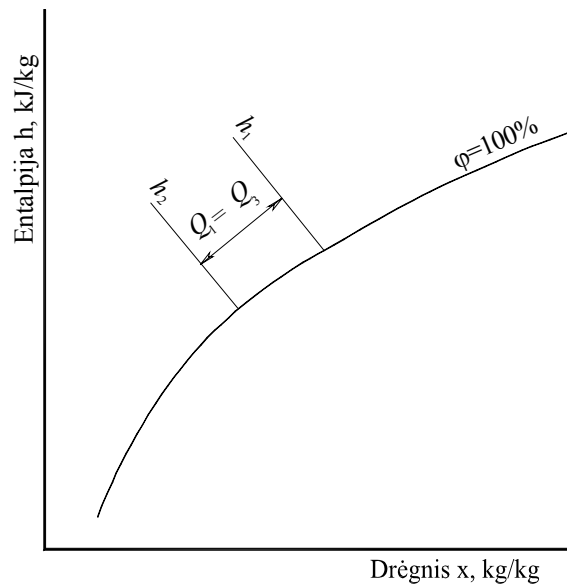


2.4 pav. Augalo energijų balanso, kai energinė apykaita spinduliavimo būdu nedalyvauja, o konvekcijos būdu gauta šiluma sunaudojama transpiracijai, schema $h-x$ diagramoje

Penktasis atvejis. Augalas energiją transpiracijai Q_3 gauna saulės energijos pavidalo Q_1 ir visą ją tam sunaudoja. Konvenciniai šilumos mainai nevyksta, nes $Q_2 = 0$. Vadinasi, augalo lapo t_1 ir jo aplinkos temperatūros t_0 yra vienodos ($t_1 = t_0 = \text{const}$). $\Delta t = t_1 - t_0 = 0$. Tokios sąlygos yra galimos tik trumpą laiką. Per parą būna ne mažiau kaip 2 kartus, pereinant iš teigiamo į neigiamą temperatūros gradientą. Šiuo atveju energijų balanso lygtis yra tokia:

$$Q_3 = Q_1, \text{ nes } Q_2 = 0. \quad (2.10)$$

Penktojo energijų balanso atvejo, kai transpiracija vyksta tik dėl gautos saulės energijos Q_1 iš aplinkos, grafinis vaizdas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.5 pav.

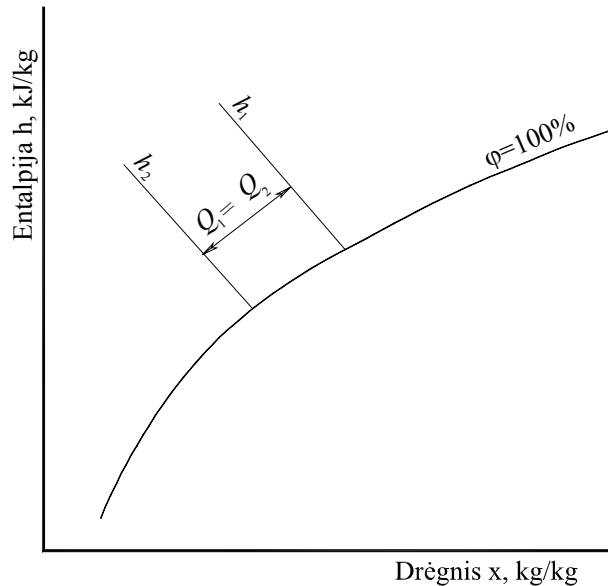


2.5 pav. Augalo energijų balanso, kai transpiracija vyksta tik dėl gautos saulės energijos iš aplinkos, schema $h-x$ diagramoje

Šeštasis atvejis. Augalas energiją apykaitai spinduliavimo būdu Q_1 gauna tik iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka. Visą gautą šilumą Q_2 iš aplinkos jis sunaudoja šiluminiam spinduliavimui Q_1 . Transpiracija nevyksta ($Q_3 = 0$). Toks atvejis pastebimas, kai nėra drėgmės gradiento Δx tarp augalo ir aplinkos, t. y. visiškai drėgmės prisotintoje aplinkoje. Energijų balanso lygtis tokia:

$$Q_1 = Q_2, \text{ nes } Q_3 = 0. \quad (2.11)$$

Šeštojo energijų balanso atvejo grafinis vaizdas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.6 pav.



2.6 pav. Augalo energijų balanso, kai transpiracija nevyksta, šilumos mainai su aplinka padengia spinduliavimo nuostolius į aplinką, schema $h-x$ diagramoje

Šiuos 6 augalo energinio balanso atvejus galima suskirstyti į 2 grupes. 3 atvejai yra ribiniai (2.4, 2.5, 2.6 pav.), kai augalo energinėje apykaitoje vienas energijos šaltinis $Q_1 = 0$, $Q_2 = 0$ arba $Q_3 = 0$ nedalyvauja. Šiuos procesus $h-x$ diagramoje vaizduoja viena iš juos apibūdinančių parametrų kitimo kreivių: $h = const$ ($Q_1 = 0$), $t = const$ ($Q_2 = 0$), $x = const$ ($Q_3 = 0$). Tai trumpalaikiai augalo gyvenimo procesai. Jie apibūdina aplink augalą vykstančių energinės apykaitos procesų energijos srauto krypties keitimą. Šie procesai parodo perėjimo momento iš teigiamo į neigiamą (arba atvirkščiai) gradientą. Energijos srauto kryptį keičia viena iš augalo energinės apykaitos procese dalyvaujančių energijų rūšių: saulės energija, temperatūra, transpiracija arba kondensacija. Dviejų energijos rūšių srauto keitimas vienu metu negalimas, nes procesų $h = const$ ($Q_1 = 0$), $t = const$ ($Q_2 = 0$), $x = const$ ($Q_3 = 0$) kryptys ($h-x$ diagramoje) nesutampa.

Kiti trys atvejai apibūdina ilgalaikius augalo energinės apykaitos procesus, kurie vaizduojami $h-x$ diagramoje tarp entalpijų h_1 ir h_2 (2.1, 2.2, 2.3 pav.). Augalo energinės apykaitos procesų pobūdis ir parametrų kitimas bus aptartas tolesniuose skyriuose. Visi 6 minėti augalo energijų balanso atvejai bus nuosekliai nagrinėjami atliekant augalo ir aplinkos energinių procesų termodinaminę analizę.

Intensyviausiai augalas garina vandenį saulėtu paros metu. Šiuo metu augalo audinių temperatūra yra didesnė už temperatūrą aplink augalą. Augalo audiniai transformuotą saulės energiją šiluma atiduoda aplinkai. Saulėtu paros metu transpiracija yra veiksnys, mažinantis augalo audinių temperatūrą, saugantis augalo audinius nuo terminio perkaitimo ir sunaikinimo. Todėl yra aktualu išsiaiškinti maksimalią augalo audinių temperatūrą natūraliomis aplinkos sąlygomis, nutraukus transpiraciją. Tokiu atveju visa augalo absorbuota saulės energija Q_1 bus atiduota aplinkai konvencinių šilumos mainų būdu. Šį atvejį išreiškia (2.11) lygtis.

Taikome (2.11) lygtį atvejui, kai augalo lapas vandens negarina ($Q_3 = 0$, nes transpiracija $w = 0$). Tokiu atveju visą gautą saulės energiją q_1 jis paverčia šiluma q_2 , kuri atiduodama augalo aplinkai dėl padidėjusios augalo lapo temperatūros t_1 . Augalo lapo temperatūra didėja iki ribos, ties kuria išsilygina gaunamos ir atiduodamos aplinkai energijų srautai ($q_1 = q_2$). Pagrįstai galima tvirtinti, kad energinės apykaitos požiūriu augalo lapo konvekcinuose šilumos mainuose su aplinka vienodai dalyvauja viršutinis ir apatinis augalo lapo paviršiai. Augalo lapo konvekciniams šilumos mainams su aplinka vertinti naudojame Niutono dėsnį. Pasinaudojus (2.11) lygtimi galima rasti temperatūrų skirtumą Δt tarp augalo lapo temperatūros t_1 ir jo aplinkos temperatūros t_0 :

$$aq_1 = 2\alpha(t_1 - t_0) = 2\alpha\Delta t, \quad (2.12)$$

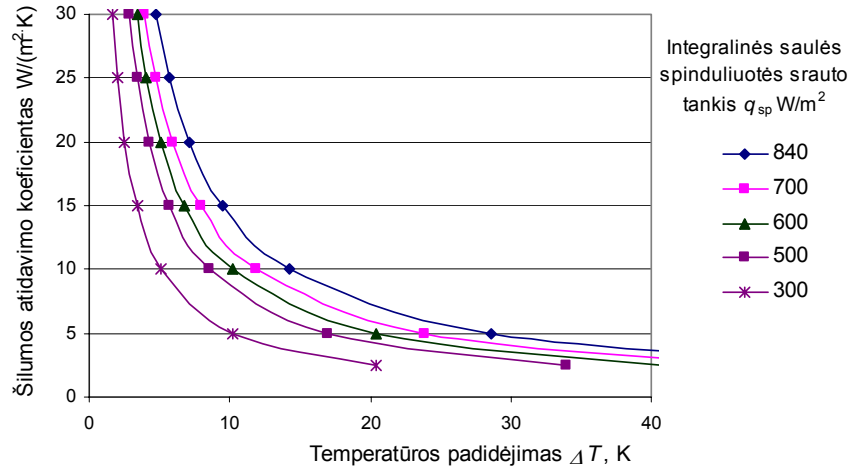
$$\Delta t = \frac{aq_1}{2\alpha}, \quad (2.13)$$

čia Δt – temperatūrų skirtumas tarp augalo lapo ir jo aplinkos, °C;

a – koeficientas, kuriuo įvertinama absorbuotos saulės energijos dalis, augale virstanti šiluma, % arba dalimis ($a = 0,96-0,98$).

Šios lygtys (2.12) ir (2.13) turi teorinę reikšmę, nes natūralios aplinkos sąlygomis leidžia nustatyti didžiausią temperatūros prieaugį Δt augalo lapui nutraukus transpiraciją. Priklausomai nuo šilumos atidavi-

mo koeficiento α ir saulės absorbuotos integralinės spinduliuotės q_1 , augalo lapo temperatūros priaugio priklausomybės pateiktos 2.7 pav. Iš paveikslą matyti, kad esant intensyviai saulės spinduliuotei, transpiracija yra svarbiausias veiksnys, saugantis augalą nuo terminio sunaikinimo. Tai dar kartą patvirtina, kad augalai maksimaliai adaptavosi prie natūralios aplinkos per ilgą evoliucijos laikotarpį.



2.7 pav. Teoriškai galimas augalo lapo temperatūros padidėjimas Δt nutraukus transpiraciją, priklausomai nuo šilumos atidavimo koeficiento α ir saulės integralinės spinduliuotės srauto tankio q_{sp}

Duomenys, pateikti 2.7 pav., rodo, kad esant intensyviai saulės spinduliuotei, nevėjuotą dieną, t. y. esant mažoms šilumos atidavimo koeficiento α reikšmėms, galimas augalo terminis pažeidimas, sukeltis letalų procesą augalo audiniuose.

2.2. Augalų energinės apykaitos procesai

Vandens skysčio fazės ir vandens garų dujinės fazės termodinaminė pusiausvyra, esant tam tikrai temperatūrai ir tam tikram suminiam aplinkos slėgiui yra tada, kai abiejų fazių cheminiai potencialai yra vienodi, t. y. $\mu_{sk} = \mu_g$ (J/mol). Vadinasi, vandens potencialas šiuo atveju yra

lygus 0. Kalbant apie žiotelinę ir kutikulinę transpiraciją teigiama, kad vandens potencialas lapo paviršiuje gali būti $\mu_{sk} - \mu_g = 0$ (Слейчер, 1970). Esant tokiai prielaidai (tai galioja esant mažam temperatūrų skirtumui), labai supaprastėja transpiracijos proceso nagrinėjimas $h-x$ (entalpija–drėgnis) diagramoje. Šiuo atveju lapo paviršiuje susidaręs vandens garų tūris nustatomas pagal garų parcialinį (dalinį) slėgį esant visiškam oro prisotinimui vandens garų ir tam tikrai augalo lapo temperatūrai (2.1 lentelė). Vadinasi, oro ir vandens garų mišinio būklę augalo lapo paviršiuje $h-x$ diagramoje vaizduoja ribinė kreivė $\varphi = 100\% = const$. Taigi norint nustatyti aplinkos oro ir oro mišinio parametrus transpiruojančio augalo lapo paviršiuje, būtina žinoti aplinkos oro temperatūrą t_0 , jo santykinį drėgnį φ_0 ir transpiruojančio augalo lapo paviršiaus temperatūrą t_1 .

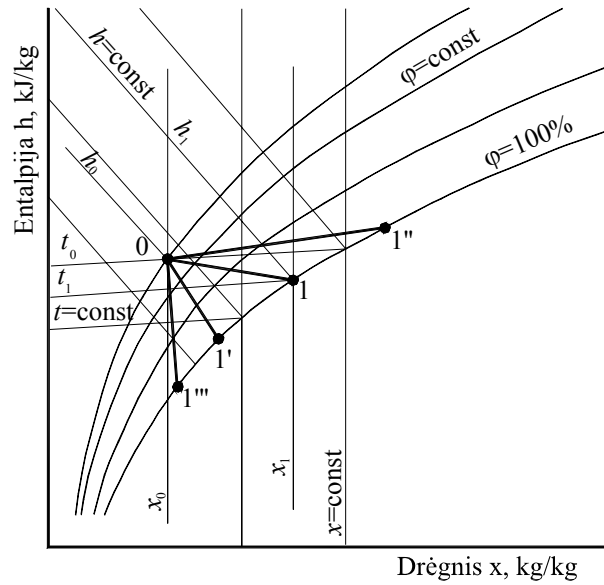
2.1 lentelė. Transpiracijos proceso energinių rodiklių priklausomybė nuo augalo lapo paviršiaus temperatūros

Transpiruojančio lapo temperatūra t_1 , °C	Vandens garavimo šiluma r , kJ/kg	Transpiruojančio paviršiaus parcialinis vandens garų slėgis, Pa	Transpiruojančio paviršiaus parcialinis vandens garo tūris, m ³ /kg
0	2500	610	206,3
5	2489	871	147,2
10	2477	1227	106,4
15	2465	1704	77,9
20	2453	2337	57,8
25	2441	3167	43,4
30	2430	4241	32,9
35	2418	5622	25,3
40	2406	7375	19,5

Žinant šiuos dydžius $h-x$ diagramoje galima grafiškai pavaizduoti transpiruojančio augalo lapo ir aplinkos energinės apykaitos procesus, juos nagrinėti esant įvairiems energijų apykaitos atvejams.

Drėgno oro $h-x$ diagramoje oro temperatūros $t_0 = const$ ir jo santykinio drėgno $\varphi_0 = const$ linijų sankirtoje esantis 0 taškas apibūdina nagrinėjamos aplinkos oro parametrus. Augalo lapo temperatūros t_1 ir $\varphi = 100\%$ linijų sankirtoje esantis 1 taškas apibūdina oro parametrus

augalo lapo paviršiuje (2.8 pav.). Priklausomai nuo transpiruojančio augalo lapo paviršiaus temperatūros t_1 , kurios dydis priklauso nuo lapo energijų apykaitos su augalo aplinka balanso, 1 taškas kreivėje $\varphi = 100\%$ gali įgyti įvairias padėtis – 1, 1', 1'', 1''' ir t. t. Sujungę taškus 1, 1', 1'', 1''' su 0 tašku gauname tieses, jungiančias taškus 0–1, 0–1', 0–1'', 0–1''' ir t. t. Lieka įrodyti, kad tiesės 0–1, 0–1', 0–1'' ir t. t. yra grafinis augalo lapo ir aplinkos energijų apykaitos procesų vaizdas $h-x$ diagramoje. Tai įrodę galėsime naudojantis $h-x$ diagrama nagrinėdami tarp augalo ir aplinkos vykstančius energijų ir drėgmės apykaitos procesus.



2.8 pav. Energinių procesų, vykstančių tarp augalo ir aplinkos esant skirtingoms vandenį garinančio lapo temperatūroms, schema $h-x$ diagramoje

Natūraliomis aplinkos sąlygomis aplink augalus esantis oras visuomet turi drėgmės. Todėl jis yra pajėgus absorbuoti mažiau augalo

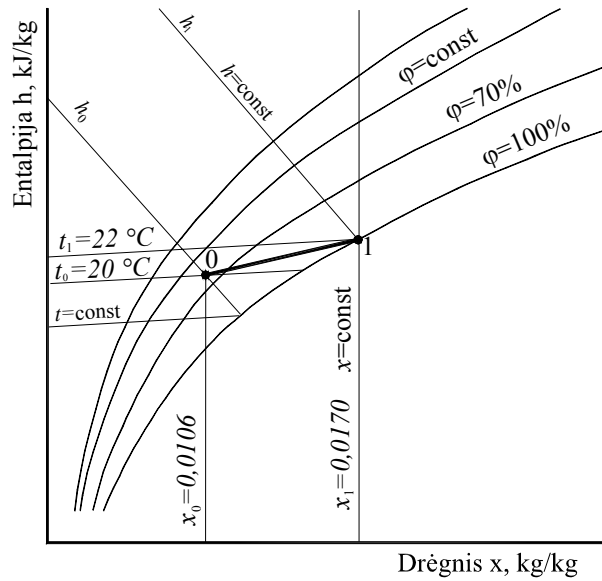
garinamos drėgmės negu absoliučiai sausas oras*. Oro drėgnių $x_1 - x_0$ skirtumas (2.8 pav.) parodo maksimalų drėgmės kiekį, kurį gali absorbuoti 1 kg aplinkos oro, dalyvaujantis augalo energinės apykaitos procese. Tuomet būtina minimalų transpiracijos procese dalyvaujantį oro kiekį $G_{1\min}$, kuris gali absorbuoti 1 kg augalų išgarintos drėgmės, galima nustatyti žinant oro drėgnių x_1 ir x_0 reikšmes pagal lygtį:

$$G_{1\min} = \frac{1}{x_1 - x_0}. \quad (2.14)$$

Naudojantis (2.14) lygtimi ir $h-x$ diagrama kiekvienu konkrečiu augalų energinės apykaitos atveju galima nustatyti augalo transpiracijai sunaudojamą minimalų oro kiekį $G_{1\min}$, kuris lapo paviršiuje visiškai prisotinamas drėgmės. Augalo energinėje apykaitoje (transpiracijos procese) dalyvauja labai dideli aplinkos oro kiekiai.

Panagrinėkime atvejį, kai aplinkos oro temperatūra $t_0 = 20$ °C, jo santykinis drėgnis $\varphi_0 = 70$ %, augalo lapo temperatūra 22 °C. Remdamiesi 2.9 pav. $h-x$ diagramoje kreivių t_0 ir φ_0 sankirtoje ($t_0 = 20$ °C, $\varphi_0 = 70$ %) randame 0 tašką aplinkos oro parametrų nustatyti. Analogiškai randame 1 tašką kreivių t_1 ir φ_1 sankirtoje ($t_1 = 22$ °C, $\varphi_1 = 100$ %). $h-x$ diagramoje randame oro drėgnių $x_1 - x_0$ skirtumą ($x_1 - x_0 = 0,0064$). Pasinaudoję (2.14) lygtimi gauname, kad išgarinant 1 kg drėgmės augalo lapų paviršiuje visiškai vandens garų prisotinama $G_{1\min} = 156$ kg (126 m³) aplinkos oro. Aplinkos oro temperatūrai mažėjant, išliekant tam pačiam 2 °C temperatūrų skirtumui, minimaliai reikalingas transpiracijai oro kiekis $G_{1\min}$ atitinkamai didėja. Pavyzdžiui, esant aplinkos oro temperatūrai 10 °C, $\varphi = 70$ %, augalo lapų temperatūrai 12 °C, gaunama, kad išgarinti 1 kg drėgmės augalo lapo paviršiuje visiškai prisotinama 286 kg (231 m³) oro.

* Nagrinėjant šilumos ir drėgmės mainus, taip pat analogiškus energinės apykaitos procesus, vykstančius tarp augalo ir aplinkos, yra patogiau juos atlikti 1 kg absoliučiai sauso oro. Absoliučiai sauso oro masės kiekis energinės apykaitos procese lieka tas pat, kinta tik drėgmės kiekis 1 kg sauso oro. Todėl oro entalpija, drėgnis ir kt. oro parametrai pateikiami drėgnam orui apskaičiuoti vienam kg absoliučiai sauso oro nagrinėjamomis sąlygomis.



2.9 pav. Būtinio minimalaus oro kiekio, dalyvaujančio transpiracijos procese $G_{1\min}$, kuris gali absorbuoti 1 kg augalų išgarintos drėgmės, skaičiavimo schema $h-x$ diagramoje

Transpiruojančio augalo lapo paviršiuje išgaravus 1 kg drėgmės (taškai 1, 1', 1'', 1''' (2.8 pav.)), drėgnas oras (absoliučiai sauso oro ir vandens garų mišinys), kurio minimali masė $G_{1\min}$ (kg), visiškai prisotinamas vandens garų. Pasišalinanti nuo lapo paviršiaus visiškai drėgmės prisotinto oro masė $G_{1\min}$ (kg) (tai yra būtina sąlyga, kad vyktų transpiracijos procesas) maišosi su aplinkos oru, kurio parametrus $h-x$ diagramoje apibūdina 0 taškas (2.8 pav.). Kol kas aplinkos oro masė G_0 (kg), dalyvaujanti šiame nuo lapo paviršiaus pasišalinančios oro masės $G_{1\min}$ maišymosi procese, mums nežinoma. Šių abiejų oro masių santykį pažymime S_k :

$$S_k = \frac{G_0}{G_{1\min}}. \quad (2.15)$$

Šis oro masių, dalyvaujančių transpiracijos procese, santykis S_k parodo, kad aplinkos oro masė G_0 kg ($G_0 = S_k G_{1\min}$), išgaravus 1 kg

drėgmės, susimaišo su oro mase G_{1min} kg, kuri lapo paviršiuje yra visiškai prisotinta vandens garų. Sąveikaujant šiems dviems skirtingų drėgnių oro masės srautams – G_{1min} (kurio entalpija h_1 , drėgnis x_1) ir G_0 (kurio entalpija h_0 , drėgnis x_0), augalo lapo sąlyčio su aplinkos oru sluoksnyje susidaro naujų parametrų oro mišinys, kurio masė $G_{miš}$ kg. Oro mišinio masę $G_{miš}$ sudaro abiejų srautų masių G_{1min} ir G_0 suma. Transpiracijos proceso metu nuo augalo lapo pašalinančią oro mišinio masę $G_{miš}$ apskaičiuojame pagal lygtį:

$$G_{miš} = G_{1min} + G_0 = (1 + S_k)G_{1min} . \quad (2.16)$$

Remiantis aptarta energine apykaita ir oro drėgmės kitimo procesais, vykstančiais aplink transpiruojantį augalo lapą, galima sudaryti šilumos (energijos) ir drėgmės (vandens masės garo pavidalo) balansų lygtis:

$$h_1 + S_k h_0 = (1 + S_k)h_{miš} ; \quad (2.17)$$

$$x_1 + S_k x_0 = (1 + S_k)x_{miš} . \quad (2.18)$$

Lygtis (2.17) rodo, kad 1 kg absoliučiai sauso oro, visiškai prisotinto drėgmės, augalo lapo paviršiaus 1 taške (2.8 pav.) yra sukaupęs šilumos h_1 kJ/kg_{s.o.}. Oras, pašalinamas nuo lapo paviršiaus, susimaišo su S_k kg aplinkos oro (0 taškas, 2.8 pav.), kurio entalpija h_0 kJ/kg_{s.o.}. Dėl skirtingų oro srautų maišymosi gaunamas naujų parametrų oro mišinys, kurio masė $(1 + S_k)$ kg, entalpija $h_{miš}$ kJ/kg_{s.o.}.

Lygtis (2.18) rodo, kad 1 kg absoliučiai sauso oro, visiškai prisotinto drėgmės, augalo lapo paviršiaus 1 taške (2.8 pav.) turi drėgmės x_1 kg/kg_{s.o.}. Visiškai prisotintas drėgmės oras, pašalinamas nuo lapo paviršiaus, susimaišo su S_k kg aplinkos oro (0 taškas, 2.8 pav.), kuris turi drėgmės x_0 kg/kg_{s.o.}. Gaunamas naujų parametrų oro mišinys, kurio masė $(1 + S_k)$ kg, drėgnis $x_{miš}$ kg/kg_{s.o.}.

Pasinaudodami lygtimi (2.15) ir iš (2.17) ir (2.18) lygčių nustatę S_k , gauname tokią lygtį S_k skaičiuoti:

$$S_k = \frac{h_1 - h_{miš}}{h_{miš} - h_0} = \frac{x_1 - x_{miš}}{x_{miš} - x_0} = \frac{G_0}{G_{1min}} . \quad (2.19)$$

Iš (2.19) lygties matome, kad santykio S_k skaičiaus reikšmei nustatyti galima naudoti $h-x$ diagramą, iš kurios randame oro entalpijų h ir oro drėgnių x parametrus. Kaip matome, S_k išreiškiamas procese dalyvaujančių energijų $\Delta h = h_1 - h_{mis}$ ir $\Delta h = h_{mis} - h_0$ (šilumų) santykiu, augalui išgarinant 1 kg drėgmės.

Lygtis (2.19) yra tiesės lygtis, jungianti pažymėtus taškus h_1x_1 ir h_0x_0 , t. y. $h-x$ diagramoje tiesės lygtis tarp 1 ir 0 taškų (2.8 pav.). Priklausomai nuo dalyvaujančių oro masės srautų G_0 , G_{1min} ir jų santykio S_k , naujai susidariusio oro mišinio parametrų reikšmės šioje tiesėje nepriklausys nuo transpiracijos intensyvumo. *Todėl tiesė, jungianti augalo aplinkos oro parametrų 0 tašką su transpiruojančio lapo paviršiaus oro parametrus atitinkančiu 1 tašku, yra grafinis energinės augalų apykaitos procesų (transpiracijos ir šilumos mainų) vaizdas $h-x$ diagramoje.*

Naudojant bedimensinį santykį S_k (2.19 lygtis) galima aprašyti ir įvertinti visus aplink augalą vykstančius procesus įvairiais jo gyvenimo atvejais. **Įvertinę šio bedimensinio santykio S_k reikšmę augalo gyvenime ir fizinę jo prasmę, toliau jį vadinsime transpiracijos skaičiumi.** Transpiracijos skaičius S_k augalo gyvenime yra svarbus. Jis nusako energijos srautų pasiskirstymo dėsningumus tarp energijų, dalyvaujančių transpiracijoje ir konvekciniuose šilumos mainuose su aplinka. Visais galimais augalo gyvenimo atvejais, įvertina oro masių ir drėgmės materialinį balansą transpiracijos proceso metu. Naudojantis (2.16) lygtimi leidžia nustatyti transpiracijos proceso metu nuo augalo lapo pasišalinančią oro mišinio masę G_{mis} , kuri būna kelis kartus didesnė už būtiną minimalų transpiracijos procese dalyvaujančių oro kiekį G_{1min} .

Augalų energinė apykaita sudaro nedalomą sistemą *transpiruojantis augalo lapas* \Leftrightarrow *aplinkos oras*. Abipusė rodyklė rodo, kad energinės apykaitos procesai gali vykti abiem kryptimis. Juos apibūdina garavimo kondensacijos ir šilumos apykaitos su aplinka procesai, kurių vyksmo kryptis priklauso nuo aplinkos parametrų. Matome, kad visus įmanomus augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesus galima grafiškai pateikti $h-x$ diagramoje. Ši galimybė leidžia nagrinėti visus augalo gyvenime sutinkamus energinės apykaitos atvejus (saulės energijos, transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų), vykstančius tarp augalo ir jo aplinkos. Teoriškai galimi 11 augalo energinės apykaitos atvejų. Realiai, natūralios aplinkos sąlygomis per vegetaciją pastebimi 7 augalo ir aplinkos energinės apykaitos atvejai, kuriuos toliau nagrinėsime.

2.3. Augalų energinė apykaita, kai augalo temperatūra didesnė už jo aplinkos temperatūrą

Saulėtu paros metu augalo lapo temperatūra t_1 būna didesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$). Saulėtu paros metu augalas sukuria organines medžiagas, kurios yra vienintelis heterotrofinių organizmų maisto šaltinis. Šiuo paros metu augalo asimiliacijos procesas atmosferoje pagausina deguonies ir sumažina anglies dioksido. Saulės energija yra pagrindinis energijos šaltinis augalų gyvybiniam procesams, ji lemia fotosintezės produktyvumą.

Saulėtu paros metu augalo absorbuota ir nepanaudota asimiliacijai saulės energija virsta prasčiausia energijos rūšimi – šiluma, kuri atiduodama aplinkai. Galimi du saulės energijos Q_1 , virtusios augale šiluma, atidavimo aplinkai procesai.

Pirmasis – tai tiesioginis, konvekcinis augalo lapo sukauptos šilumos Q_2 atidavimas aplinkai. Jis galimas tik tuo atveju, kai augalo lapo temperatūra t_1 didesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$). Augalo lapo sukauptos šilumos atidavimas aplinkai konvekcijos būdu nusakomas Niutono dėsnio.

Antrasis atvejis – tai šilumos sunaudojimas vandeniui garinti Q_3 , t. y. transpiracijai. Šiuo atveju augalas atiduoda šilumą, t. y. vandens garavimo šilumą aplinkai vandens garų pavidalu. *Augalo transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka procesai turi būti nagrinėjami kartu, tarp jų egzistuoja tiesioginė priklausomybė.* Augalas, priklausomai nuo lokalių mikroklimato parametrų, fiziologiškai gali daryti įtaką energijos, atduodamos aplinkai, paskirtymui tarp transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka. Šių energijų paskirstymą įvertina transpiracijos skaičius S_k . Augalo energinį balansą saulėtu paros metu, įvertinus pagrindinius energijų balanso narius, nusako (2.5) lygtis.

Saulėtu paros metu aplinkos oras yra drėgnas, todėl absorbuoti drėgmės jis gali mažiau negu absoliučiai sausas oras. Transpiracijos procese dalyvaujantį (būtina sąlyga) minimalų oro kiekį $G_{1\min}$, (kg), kuris gali absorbuoti 1 kg augalų išgarintos drėgmės, galima nustatyti pagal (2.14) lygtį. 2.2.1 skyriuje aprašytu būdu $h-x$ diagramoje randame absoliučius oro drėgnius: augalo lapo paviršiaus x_1 ir aplinkos x_0 . Saulėtu paros metu augalo lapo temperatūra t_1 visada didesnė už aplinkos oro temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$). Todėl augalo lapas ne tik atiduoda drėgmę aplinkai garindamas vandenį, bet ir šildo aplinkos orą atiduodamas šilumą kon-

vekcijos būdu. Kadangi žemės ūkio augalų lapų paviršiaus plotas labai didelis, 4–7 kartus didesnis už dirvos paviršių, augalų lapai sugeba atiduoti didelį šilumos kiekį aplinkos orui ir daryti įtaką aplinkos oro temperatūrai. Tarp augalo ir aplinkos vyksta sudėtingi šilumos ir drėgmės mainų procesai. Šių procesų tyrimui galima panaudoti termodinamikos dėsnius ir paaiškinti dėsningumus, pastebimus augalų energinės apykaitos sistemoje *transpiruojantis augalo lapas* \Leftrightarrow *aplinkos oras*.

Transpiruojančio augalo lapo paviršiuje išgarintą 1 kg drėgmės absorbuoja minimali oro masė $G_{1\min}$ kg. Ją randame iš (2.14) lygties. Be to, nagrinėjamoju atveju, kai $t_1 > t_0$, visiškai prisotinta drėgmės oro masė $G_{1\min}$ augalo lapo paviršiuje šildoma iki transpiruojančio augalo lapo paviršiaus temperatūros. Taigi energijų mainuose dalyvaujantis aplinkos oras lapo paviršiuje yra pašildomas iki lapo temperatūros t_1 . Aplinkos oras šildomas šiluma, kurią jis gauna iš saulės, absorbuodamas jos spindulių energiją. Minimalus šilumos kiekis Q_2 , sunaudojamas transpiracijos proceso metu aplinkos orui šildyti $Q_{2\min}^{pas}$, augalui išgarinant 1 kg drėgmės, randamas pagal tokią lygtį:

$$Q_{2\min}^{pas} = G_{1\min} c_p (t_1 - t_0) = c_p \frac{t_1 - t_0}{x_1 - x_0}. \quad (2.20)$$

Minimalų šilumos kiekį $Q_{2\min}$, kurį augalo lapas atiduoda aplinkos orui šildyti, išgarinant 1 kg drėgmės, remdamiesi (2.20) lygtimi galime rasti naudodamiesi $h-x$ diagrama (2.10 pav.). Oro pašildymo procesą, kuris vyksta augalo lapo paviršiuje, $h-x$ diagramoje pavaizduojame taip. Oras, kurio masė $G_{1\min}$, augalo lapo paviršiuje pašildomas nuo aplinkos oro temperatūros t_0 iki lapo paviršiaus temperatūros t_1 . Aplinkos oro šildymo procesas transpiruojančio augalo lapo paviršiuje vyksta pagal žinomą oro šildymo proceso dėsnį, kai $x = const$. Šildant orą absoliutus oro drėgnis nekinta. Kaip jau minėta, augalo lapo paviršiuje saulėtu paros metu vyksta du procesai: oro šildymas ir drėgmės garinimas (transpiracija). Šiuos procesus $h-x$ diagramoje galima nagrinėti atskirai arba kartu. Oro šildymo procesą $h-x$ diagramoje rodo vertikali tiesė $x = const$. Todėl iš 0 taško (2.10 pav.) brėžiame oro pašildymo proceso (vertikalią tiesę $x_0 = const$ iki izotermos $t_1 = const$). Kreivių $x_0 = const$ ir $t_1 = const$ sankirtoje gauname 2 tašką. Entalpijų skirtumas $h_2 - h_0 = \Delta h_{pas}$ parodo šilumos kiekį, kuris suteikiamas 1 kg oro pašildant nuo t_0 iki t_1 tempera-

tūros. Kadangi šiame transpiracijos procese dalyvauja G_{1min} (kg) oro, tai šilumos kiekis lapo paviršiuje orui pašildyti, išgarinant (transpiruojant) 1 kg drėgmės, yra toks:

$$Q_{2min}^{paš} = (h_2 - h_0)G_{1min} = (h_3 - h_0)G_{1min} = \Delta h_{paš} G_{1min}. \quad (2.21)$$

Sudėtingą, termodinaminiu požiūriu politropinį augalo energinės apykaitos procesą 0–1 nenusižengdami tikslumui galime pakeisti dviem termodinaminiais procesais 0–2 (oro pašildymo procesu, kai $x_0 = const$) ir 2–1 (izoterminiu transpiracijos procesu). Tuomet augalo lapo transpiracijai sunaudojamą šilumos kiekį J išgarinant 1 kg vandens ($w = 1$) apskaičiuojame pagal lygtį:

$$Q_3 = wr = r = (h_1 - h_3)G_{1min} = (h_4 - h_2)G_{1min} = \Delta h_r G_{1min}, \quad (2.22)$$

čia Δh_r – oro entalpijos prieaugis dėl oro drėgnio padidėjimo nuo x_0 iki x_1 , kurį sukėlė transpiracijos procesas, kJ/kg

Pagrindinis augalo transpiracijos organas – lapas. Lapai yra ploni. Augalo audinių šilumos laidumo koeficientas artimas $\lambda = 0,575 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Todėl pagrįstai galima laikyti, kad abiejų augalo lapo pusių temperatūra yra vienoda. Augalo lapo temperatūra kinta. Saulėtu paros metu augalo lapas ir yra nuolatinės dinaminės būsenos ir patiria staigius temperatūros pokyčius. Juos sukelia momentiniai energiniai aplinkos pokyčiai, kuriuos parodo augalo lapo energijų balansas (2.5 skyrius). Kintant augalo lapo temperatūrai, kinta fizikiniai transpiracijos proceso energiniai rodikliai. Jų priklausomybė nuo augalo lapo temperatūros pateikta 2.1 lentelėje.

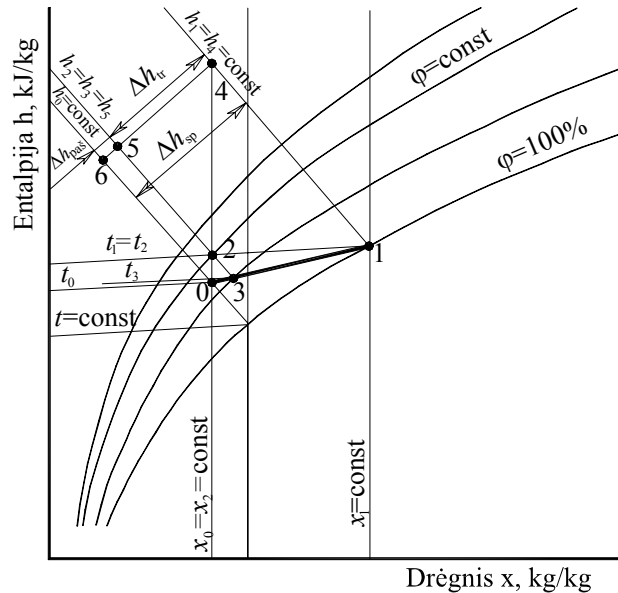
Saulės energijos kiekis, augalo lape transformuotas į šilumą, sunaudojamas augalo ir aplinkos konvekciniams šilumos mainams ir transpiracijai išgarinant 1 kg drėgmės lapų paviršiuje. Jis apskaičiuojamas pagal energijų balanso lygtį (2.5), išreikštą taip:

$$aQ_1 = Q_{2min}^{paš} + Q_3 = (h_1 - h_0)G_{1min} = \frac{h_1 - h_0}{x_1 - x_0}. \quad (2.23)$$

Naudodamiesi saulėtu paros metu transpiruojančio augalo lapo ir aplinkos energijos mainų schema $h-x$ diagramoje (2.10 pav.), galime

išplėsti transpiracijos skaičiaus S_k skaičiavimo galimybes. Tam naudojamesi trikampių $\Delta 604 \sim \Delta 524$ ir $\Delta 041 \sim \Delta 023$ (2.10 pav.) geometriniai panašumu ir lygtimis (2.15), (2.21) ir (2.22), taikydami $h-x$ diagramą gauname tokią lygtį transpiracijos skaičiui S_k apskaičiuoti:

$$S_k = \frac{G_0}{G_{1\min}} = \frac{h_1 - h_3}{h_3 - h_0} = \frac{Q_3}{Q_{2\min}^{paš}} = \frac{\Delta h_{tr}}{\Delta h_{paš}} = \frac{\overline{4-2}}{\overline{2-0}} = \frac{\overline{1-3}}{\overline{3-0}}^* \quad (2.24)$$



2.10 pav. Saulėtu paros metu transpiruojančio augalo lapo energijos mainų su aplinka schema $h-x$ diagramoje. Transpiruojančio lapo temperatūra didesnė už aplinkos temperatūrą ($t_1 > t_0$)

(2.24) lygtį galime sudaryti nauja išraiška, kad galėtume transpiracijos skaičiaus S_k reikšmes nustatyti pagal parametrus, randamus $h-x$ diagramoje. Transpiracijos procese augalo lapui išgarinant 1 kg drėgmės,

* $\overline{1-3}$ – tiesės, jungiančios 1 ir 3 taškus $h-x$ diagramoje, žymėjimas.

dalyvauja minimalus, bet būtinas oro kiekis (G_{1min}), kuris nagrinėjamo-
mis sąlygomis gali absorbuoti augalo transpiruojamą drėgmę ir yra pa-
šildamas nuo aplinkos temperatūros t_0 iki lapo temperatūros t_1 . Tai įverti-
tinę, naudodami (2.20), (2.22) ir (2.24) lygčių išraiškas, transpiracijos
skaičių S_k galime apskaičiuoti pagal lygtį:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_{2min}^{paš}} = \frac{r}{c_p \frac{t_1 - t_0}{x_1 - x_0}} = \frac{r(x_1 - x_0)}{c_p(t_1 - t_0)} = 2465z \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0}, \quad (2.25)$$

čia z – pataisos koeficientas, kuriuo įvertinama augalo lapo temperatū-
ros įtaka vandens garavimo ir savitajai oro šilumai (randamas 2.2 lentelė-
je).

2.2 lentelė. Koeficiento z , kuriuo įvertinama vandens garavimo ir
oro savitosios šilumos priklausomybė nuo temperatūros, reikšmės

Augalo lapo temperatūra, °C	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Pataisos koeficiento z reikšmės	1,019	1,015	1,010	1,005	1,000	0,995	0,991	0,986	0,981

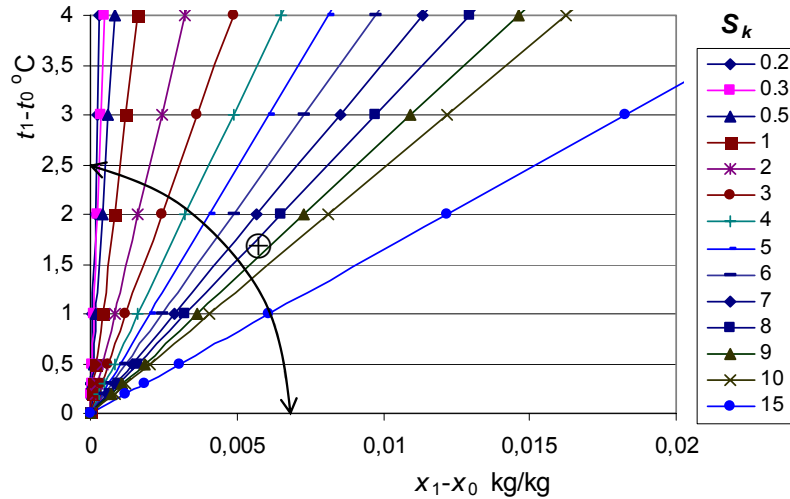
Transpiracijos skaičius S_k rodo šilumos srautų pasiskirstymą auga-
lo lape: kokia dalis gautos saulės energijos sunaudojama transpiracijai ir
kokia – aplinkos orui šildyti kiekvienu augalo energinės apykaitos atve-
ju. Iš lygties (2.25) matyti, kad tai priklauso nuo augalo lapo temperatū-
ros ir aplinkos oro parametrų (aplinkos temperatūros t_0 ir santykinio oro
drėgnio φ_0). Transpiracijos skaičiaus S_k funkcinė priklausomybė nuo ma-
tavimo priemonėmis išmatuojamų parametrų bendru atveju išreiškiama
lygtimi:

$$S_k = f(t_0, t_1, \varphi_0), \quad (2.26)$$

čia φ_0 – santykinis aplinkos oro drėgnis %.

Remdamiesi (2.25) lygtimi, 2.11 pav. pateikiame transpiracijos
skaičiaus S_k priklausomybę nuo aplinkos oro t_0 ir transpiruojančio lapo
paviršiaus oro, esant temperatūrų t_1 ($t_1 - t_0$) ir drėgnių $x_1 - x_0$ teigiamiems

skirtumams, kurie pastebimi saulėtu paros metu. Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė, pateikta 2.11 pav., galioja atvejui, kai augalo lapo temperatūra t_1 didesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$), t. y. konvekcinio šilumos srauto kryptis yra iš lapo į aplinką. Šiam augalo energinės apykaitos atvejui tinka (2.5) energijos balanso lygtis. Analizuodami augale vykstančius energinius procesus, kuriuos išreiškia (2.24) ir (2.25) lygtys, matome, kad drėgnių skirtumui ($x_1 - x_0$) mažėjant, t. y. didėjant santykiniam oro drėgniui ϕ_0 , esant mažam temperatūrų skirtumui ($t_1 - t_0$) pastebimas transpiracijos skaičiaus S_k kitimas.



2.11 pav. Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro (t_0 , x_0) ir transpiruojančio lapo paviršiaus oro (t_1 , x_1) parametrų saulėtu paros metu, kai augalo lapo temperatūra didesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 > t_0$. \oplus – teigiamo efektyviojo šiluminio spinduliavimo sritis

Žinodami transpiracijos skaičių S_k (2.25) ir būtiną minimalų oro kiekį $G_{1\min}$ (2.14), dalyvaujantį transpiracijos procese, galime nustatyti minimalų oro kiekį G_{oromin} , kuris dalyvauja transpiracijos ir konvecinių šilumos mainų su aplinka procese, lapui išgarinant 1 kg vandens. G_{oromin} randame naudodamiesi $h-x$ diagrama, taip pat nustatome oro mišinio, kuris pasišalina nuo augalo lapo į aplinką, parametrus. Oro mišinio parametrus $h-x$ diagramoje atitinka 3 taškas (2.10 pav.). Naudodami (2.14),

(2.15), (2.16), (2.25) lygtis ir pasinaudodami oro mišinių sudarymo dėsniais nustatyti taikoma sverto taisykle, galime sudaryti lygtis aplinkos oro (0 taško) masei G_0 (kg) ir minimalaus oro kiekiui G_{oromin} , dalyvaujantiems augalo lapo energinės apykaitos procese, apskaičiuoti:

$$G_{oromin} = G_{1min} + G_0 = G_{1min} + S_k G_{1min} = (1 + S_k) G_{1min}, \quad (2.27)$$

čia G_{oromin} – minimali oro masė, dalyvaujanti augalo lapo energinės apykaitos procese išgarinant 1 kg vandens, kg/kg.

Naudodamiesi (2.14) (2.15) (2.25) ir (2.27) lygčių išraiškomis sudarome lygtis G_0 ir G_{oromin} paskaičiuoti:

$$G_0 = S_k G_{1min} = \frac{S_k}{x_1 - x_0} = \frac{2465z}{t_1 - t_0}; \quad (2.28)$$

$$G_{oromin} = (1 + S_k) G_{1min} = \frac{1 + S_k}{x_1 - x_0}. \quad (2.29)$$

Siekdami parodyti, kad augalo lapo transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka procese, lapui išgarinant 1 kg drėgmės, dalyvauja labai didelė aplinkos oro masė, skaičiavimo duomenis pateikiame grafiškai 2.12 pav.

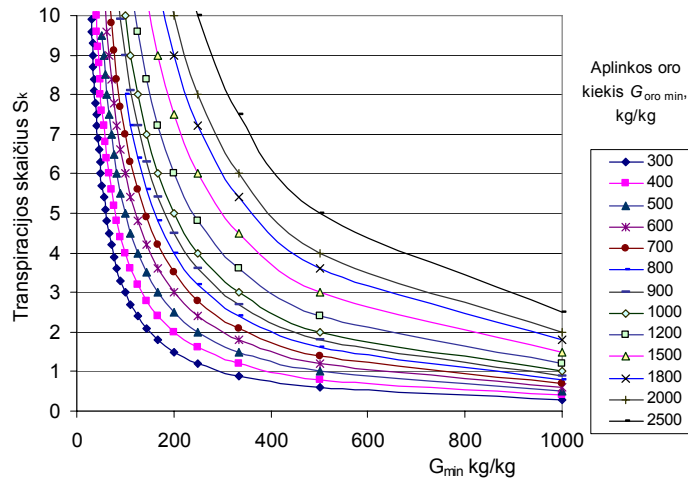
Žinodami G_{oromin} , t. y. minimalų aplinkos oro kiekį, dalyvaujantį transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų procesuose išgarinant 1 kg drėgmės (nagrinėjamosiomis sąlygomis), galime nustatyti šios oro masės G_{oromin} temperatūros padidėjimą. Jį sukelia konvekciniai šilumos mainai tarp augalo lapo ir aplinkos oro, nes $t_1 > t_0$. Naudodamiesi $h-x$ diagramos (2.10 pav.) duomenimis, randame oro masės G_{oromin} temperatūros padidėjimą pagal lygtį:

$$\Delta t_{oro} = t_3 - t_0. \quad (2.30)$$

Šį oro temperatūros padidėjimą Δt_{oro} galime rasti ir pasinaudoję (2.20) ir (2.29) lygtimis:

$$\Delta t_{oro} = \frac{Q_{2min}}{G_{oro min} c_p} = \frac{t_1 - t_0}{1 + S_k}, \quad (2.31)$$

Δt_{oro} – rodo, kiek augalo lapas nagrinėjamosiomis sąlygomis pašildo aplinkos orą, dalyvaujantį transpiracijos procese, °C.



2.12 pav. Oro masės $G_{oro min}$ (kg/kg), dalyvaujančios transpiracijos procese išgarinant 1 kg drėgmės, priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus S_k ir minimalios, visiškai prisotintos drėgmės oro masės G_{1min} augalo lapų paviršiuje

Saulėto paros meto augalo energijų balanso lygtį (2.5) galima užrašyti entalpine išraiška 1 kg oro, dalyvaujančio energinėje apykaitoje:

$$\Delta h_{sp} = \Delta h_{tr} + \Delta h_{pas}, \quad (2.32)$$

čia Δh_{sp} – saulės energija, paskaičiuota 1 kg oro, dalyvaujančio energinės apykaitos procese, kJ/kg_{s.o.};

Δh_{tr} – energija, sunaudojama augalo transpiracijai, paskaičiuota 1 kg oro, dalyvaujančio energinės apykaitos procese, kJ/kg_{s.o.};

Δh_{pas} – energija, sunaudojama augalo konvekciniam šilumos mainams su aplinka, paskaičiuota 1 kg oro, dalyvaujančio energinės apykaitos procese, kJ/kg_{s.o.}

Nagrinėjant augalo lapo energinės apykaitos procesus saulėtu paros metu, kai augalo temperatūra t_1 yra didesnė už aplinkos temperatūrą

t_0 , t. y. $t_1 > t_0$, teoriškai galimi trys augalo energinės apykaitos atvejai, kintant aplinkos oro drėgniui, kuriuos nusako šie aplinkos parametrai:

$$t_1 > t_0, \quad x_1 > x_0; \quad (2.33)$$

$$t_1 > t_0, \quad x_1 = x_0; \quad (2.34)$$

$$t_1 > t_0, \quad x_1 < x_0. \quad (2.35)$$

Augalo temperatūra t_1 aukštesnė už aplinkos oro temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$) pastebima dienos metu, kai saulės spinduliuojamas energijos srautas yra pakankamas augalui vykdyti transpiraciją ir konvekcijos būdu atiduoti šilumą aplinkai. Nagrinėjamo atvejo energinės apykaitos sąlygas išreiškia (2.5) ir (2.32) energijų balanso lygtys. Transpiruojančio augalo lapo temperatūra aukštesnė už aplinkos temperatūrą ($t_1 > t_0$), taip pat pastebima naudojant dirbtinį augalų švitinimą šiltnamiuose.

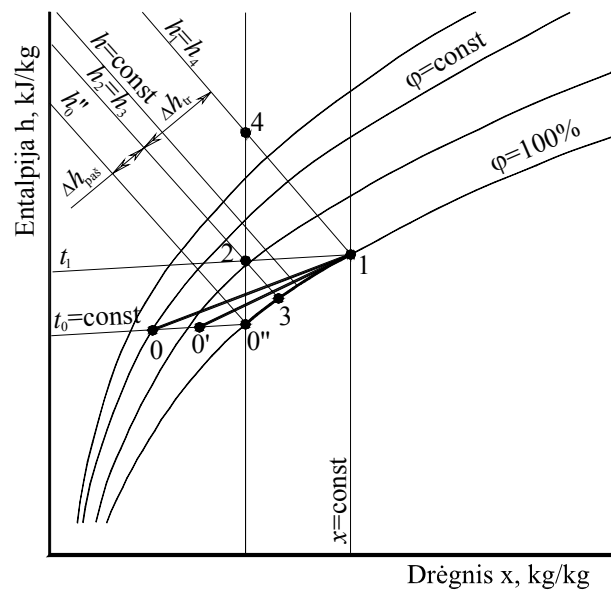
Pirmuoju atveju (2.33), kai $t_1 > t_0$, o $x_1 > x_0$, $h-x$ diagramoje tiesė 1–0 (2.10 pav.), vaizduojanti augalo energijų apykaitos (transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų) su aplinka procesą, visuomet yra aukščiau izotermos $t_0 = const$. Iš 2.10 pav. ir (2.24) bei (2.25) lygčių matome, kad nuo transpiruojančio augalo lapo temperatūros t_1 priklauso transpiracijos skaičiaus S_k dydis. Esant mažam temperatūrų skirtumui tarp transpiruojančio augalo lapo ir aplinkos ($t_1 - t_0$), daug didesnę absorbuotos energijos dalį augalo lapas atiduoda transpiracijai nei konvekciniams šilumos mainams su aplinka, t. y. aplinkos orui šildyti. Didėjant temperatūrų skirtumui ($t_1 - t_0$), santykinai mažėja transpiracijos skaičius S_k , didėja konvekciniai šilumos mainai su aplinka, aplinkos oras intensyviau šildomas. Pastebėta, kad tokie pokyčiai būna šiltnamiuose, esant dideliame santykiniam oro drėgniui.

Nagrinėjant pirmąjį atvejį (2.33) $h-x$ diagramoje, kai didėja santykinis oro drėgnis φ (2.13 pav.), esant tai pačiai aplinkos temperatūrai $t_0 = const$ ir tam pačiam temperatūrų skirtumui ($t_1 - t_0$), augalo ir aplinkos energijų mainų procesai yra nevienodi. $h-x$ diagramoje tai akivaizdžiai rodo energinės apykaitos procesų tiesės 1–0, 1–0', 1–0'' ir t. t. Nagrinėdami šios grupės energijos mainų procesus, konstatuojame atvejį, kai transpiracijos procesas vyksta visiškai prisotintoje drėgmės aplinkoje, t. y. kai $\varphi = 100\%$. Šį procesą $h-x$ diagramoje vaizduoja tiesė 1–0''. Kaip matome, procesas vyksta kreive $\varphi = 100\%$. Tokie procesai vyksta dirbtinio klimato sąlygomis (būdingi miškininkystei, dekoratyvinei augali-

ninkystei), pvz., naudojant vegetatyvinį augalų išaknydinimą arba šiltnamiuose, naudojant tam tikrą augalų auginimo technologiją drėgmės prisotintoje aplinkoje (Юшка et al., 1985).

Yra teigiama, kad augalas, taip pat kaip ir divožemis ar kitas vandens turintis paviršius, esant vandens garo neprisotintai aplinkai, garina vandenį (Kajalavičius, 1992; Ruseckas, 2002; ЛЫКОВ, 1968). Remdamiesi 2.13 paveikslu duomenimis galime teigti, kad gyvam augalui tai negalioja. Fiziologiniu požiūriu šis procesas svarbus tuo, kad *transpiracija gali vykti visiškai prisotintoje drėgmės aplinkoje* (santykinis aplinkos oro drėgnis $\varphi = 100\%$). Tokioje aplinkoje gali vykti ir kiti energinės apykaitos su aplinka procesai, skirti augalo gyvybinėms funkcijoms palaikyti. Tokiais atvejais (esant mažiausiam transpiracijos skaičiui S_k) augalo biologiniai procesai vyksta esant minimaliai transpiracijai ir energijų apykaitai. Šiuo atveju minimalų augalo gyvybinių funkcijų vyksmą palaiko augalo ir jo aplinkos temperatūros gradientas.

Toliau nagrinėdami pirmąjį atvejį, kai transpiruojančio augalo temperatūra t_1 didesnė už aplinkos t_0 temperatūrą $t_1 > t_0$, oro drėgnis $x_1 > x_0$, matome, kad transpiracijos skaičius S_k negali būti lygus begalybei ($S_k \neq +\infty$). Remdamiesi (2.25) ir (2.26) lygtimis galime teigti, kad toks atvejis galimas tik tada, kai $Q_2 = 0$, t. y. kai augalo lapo temperatūra t_1 lygi aplinkos temperatūrai t_0 ($t_1 = t_0$). Čia nagrinėjame atvejį, kai $t_1 > t_0$. Taigi transpiracijos skaičius yra mažesnis už $+\infty$ ($S_k < +\infty$). S_k gali būti lygus vienetui (2.25) (2.26), kai saulėtu paros metu augalas gautą saulės energiją Q_1 lygiomis dalimis naudoja transpiracijai ir konvekciniam šilumos mainams su aplinka $\frac{1}{2}Q_1 = Q_2 = Q_3$. Transpiracijos skaičius būna mažesnis už 1 esant dideliame temperatūrų $t_1 - t_0$ ir mažam drėgnių $x_1 - x_0$ skirtumui. Remdamiesi pateikta S_k analize, (2.24) ir (2.25) lygtimis, taip pat 2.10 pav. duomenimis galime teigti, kad saulėtu paros metu, kai augalo lapo temperatūra didesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 > t_0$, transpiracijos skaičiaus S_k kitimo ribos yra $0 < S_k < +\infty$.



2.13 pav. Augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesų schema $h-x$ diagramoje, kintant santykiniam aplinkos oro drėgnumui φ , kai $t_1 - t_0 = const$, $t_1 > t_0$

Pradedant nagrinėti antrąjį (2.34) ($t_1 > t_0$, $x_1 = x_0$) ir trečiąjį (2.35) ($t_1 > t_0$, $x_1 < x_0$) atvejus, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad drėgno oro mišinys transpiruojančio lapo paviršiuje yra visiškai prisotintas drėgmės, kai augalo dalies temperatūra t_1 . Šią drėgno oro būseną $h-x$ diagramoje vaizduoja kreivė $\varphi = 100\%$. Kai $\varphi = 100\%$, oro drėgnis maksimalus x_{1max} , esant temperatūrai t_1 . Kuo mažesnė temperatūra, tuo maksimalaus oro drėgnio x_{1max} vertė mažesnė. Vadinasi, esant transpiruojančio lapo temperatūrai t_1 , oro būseną, atitinkanti antrąjį teorinį atvejį $t_1 > t_0$ ($x_1 = x_0$), yra galima tik tuo atveju, kai augalo lapo ir aplinkos temperatūros vienodos $t_1 = t_0$. Tuo remiantis galima teigti, kad nagrinėjamas antrasis teorinis augalo ir aplinkos energijų mainų atvejis, kai $t_1 > t_0$, o $x_1 = x_0$, gamtoje neegzistuoja ir prieštarauja drėgno oro termodinaminių procesų dėsningumams.

Nagrinėdami trečiąjį augalo ir aplinkos energijų mainų atvejį (2.35), kai $t_1 > t_0$, $x_1 < x_0$, matome, kad $x_1 < x_0$ yra galimas tik tada, jei augalo lapo temperatūra t_1 būtų mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 , t. y. $t_1 < t_0$. Nagrinėjame atvejį, kai transpiruojančio augalo temperatūra t_1 didesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$). Todėl trečiasis teorinis augalo ir aplinkos energijų mainų atvejis ($t_1 > t_0$, o $x_1 < x_0$) yra negalimas, nes tokiomis sąlygomis transpiracija negalima. Toks augalo energinės apykaitos atvejis saulėtu paros metu negalimas, tai prieštarauja drėgnojo oro termodinaminių procesų dėsningumams.

Apibendrinami nagrinėtus energinius procesus saulėtu paros metu matome, kad galimas tik vienas augalo ir jo aplinkos energinių mainų atvejis. Jį apibūdina augalo lapo temperatūra t_1 , kuri yra aukštesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($x_1 > x_0$). Šis atvejis išnagrinėtas, vykstantys procesai pavaizduoti grafiškai $h-x$ diagramoje (2.10 ir 2.13 pav.). Kiti du teoriškai galimi atvejai, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra aukštesnė už aplinkos temperatūrą t_0 , t. y. $t_1 > t_0$, $x_1 = x_0$ ir $t_1 > t_0$, $x_1 < x_0$, gamtoje neegzistuoja ir prieštarauja oro termodinamikos dėsningumams. Augalų energinės apykaitos analizė ir grafinis energijos apykaitos procesų (transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų) nagrinėjimas $h-x$ diagramoje paaiškina procesus, vykstančius tarp augalo ir aplinkos.

Pagal pateiktą analizę galima teigti, kad pagrindinis augalo ir aplinkos energijos mainų rodiklis yra transpiracijos skaičius S_k , išreiškiamas energijų, sunaudotų transpiracijai ir konvekciniams šilumos mainams, santykiu. Galima teigti, kad augalo transpiracija visiškai prisotintoje vandens garų aplinkoje galima, jei augalo lapo temperatūra t_1 yra aukštesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$). Toks augalo ir aplinkos energijų mainų atvejis būdingas vegetatyviniam dauginimui rūke.

2.4. Augalų energinė apykaita, kai augalo temperatūra mažesnė už jo aplinkos temperatūrą

Augalo lapų temperatūrai t_1 esant mažesnei už jo aplinkos temperatūrą t_0 ($t_0 > t_1$), vyksta minimali augalų ir aplinkos energinė apykaita. Energinių procesų analizė esant minimaliai augalo energinei apykaitai atskleidžia tuos procesus, kuriuos augalas patiria rytinėmis, popietinėmis valandomis ir naktį. Augalo lapo poreikiai aplinkai neapsiriboja vien tik

maisto medžiagų (CO_2) ir energijos tiekimu. Būtina sąlyga aplinkai – sudaryti galimybes medžiagų apykaitai. Augalo lapo gyvybiniai procesai susieti su maisto medžiagų tiekimu ir organinių medžiagų gamybos atliekų – metabolitų – šalinimu. CO_2 ir metabolitų (vandens garų, šilumos, deguonies) judėjimas augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje galimas tik esant varomajai jėgai. Šią jėgą sukuria augalo energijų ir medžiagų apykaita, kuri sukelia atitinkamus dujų medžiagų koncentracijų, temperatūros ir drėgmės gradientus. Vakare, naktį ir ryte yra blogiausia augalo gyvenimo sąlygos gradientams apykaitos su aplinka sluoksnyje susidaryti. Tai sukelia sumažėjusi augalo energinė apykaita aplinkai. Šiuo laikotarpiu augalas turi tenkintis minimalia energine apykaita. Todėl gyvybiniais procesams palaikyti jis turi panaudoti kitų savo gradientų galimybes. Tai sukelia dažną sistemos *augalas–aplinka* gradientų ir vykstančių procesų kaitą. Todėl šio minimalios energijų apykaitos laikotarpio sąlygomis įvyksta daugiausia augalų energinės apykaitos pokyčių, dažna termodinaminių procesų kaita. Ypatingas vaidmuo tenka neproduktyviai aplinkos termodinaminei būklei, prie kurios augalas per ilgą evoliucijos laikotarpį maksimaliai prisitaikė, siekdamas išverti visus galimus savo gyvybinei veiklai nepalankius energinės apykaitos su aplinka veiksnius. Esant minimaliai augalo energinei apykaitai galimi 7 augalo energinės apykaitos atvejai, kuriuos žemiau aptarsime.

Minimali augalo energinė apykaita pastebima, kai aplinkos temperatūra t_0 aukštesnė už augalo lapo temperatūrą t_1 ($t_0 > t_1$). Minimalios energinės apykaitos periodas būna ir dienos metu, kai saulės spinduliuotė maža. Tokiomis sąlygomis augalas energiją transpiracijos procesui gauna iš aplinkos spinduliavimo ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka būdu, nes $t_0 > t_1$. Esant minimaliai energinei apykaitai, transpiracijos procesas yra svarbus augalui, kadangi skatina bent minimalų metabolitų judėjimą augalo lapų apykaitos su aplinka sluoksnyje veikiant drėgmės gradientui. Transpiracijos procesas yra vienas iš didžiausių augalo energijos vartotojų. Vienam kilogramui vandens išgarinti esant $15\text{ }^\circ\text{C}$, kaip matome iš 2.1 lentelės, augalas sunaudoja 2465 kJ/kg . Vandens garinimo procese išgarinant 1 kg drėgmės dalyvauja didžiulės oro masės (2.12 pav.). Vanduo garuodamas esant $15\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, padidina savo tūrį 1696 kartus kai aplinkos slėgis 101325 Pa . Vandens garų tankis augalo lapo paviršiuje esant $15\text{ }^\circ\text{C}$ yra $0,737\text{ kg/m}^3$. Tomis pačiomis sąlygomis sauso oro tankis $1,2\text{ kg/m}^3$. Taigi transpiracija augalo lapo sąlyčio su aplinka sluoksni veikia ardančiai:

1) skirtingi oro ir vandens garo tankiai sukuria oro judėjimo gravitacinę jėgą;

2) transpiracijos procese garuojant vandeniui jo tūrio padidėjimas 1696 kartus sukelia oro masės atstūmimą nuo transpiruojančio paviršiaus.

Įvertinę pagrindinius augalo energijos šaltinius ir jos vartotojus, minimalios energinės apykaitos atvejais energijų balansą galime išreikšti taip:

$$Q_3 = Q_2 \pm Q_1 \quad \text{arba} \quad q_3 = q_2 \pm q_1. \quad (2.36)$$

(2.36) lygtis rodo mūsų nagrinėtus antrąjį ir trečiąjį augalo energijos srautų pasiskirstymo atvejus, kurie buvo išreikšti (2.7), (2.8) ir (2.9) lygtimis.

Minimalios energinės apykaitos atvejais ypatingas vaidmuo augalo gyvenime tenka efektyviam augalo šiluminiam spinduliavimui. Priklausomai nuo šio spinduliavimo krypties galima išskirti tris augalo energijų balanso atvejus. Augalo lapo šiluminis spinduliavimas į aplinką gali būti mažesnis ((2.7) energijų balanso lygtis), lygus ((2.9) energijų balanso lygtis) arba didesnis ((2.8) energijų balanso lygtis) už aplinkos šiluminį spinduliavimą augalui. Visais šiame skyriuje nagrinėjama atvejais augalo temperatūra t_1 išlieka mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 < t_0$).

Pirmuoju atveju aplinka augalui teikia daugiau šilumos negu jis atiduoda aplinkai. Ši atvejį nusako tokia energinio balanso lygtis:

$$Q_3 = Q_2^{aus} + Q_{sp}, \quad \text{kai } Q_{sp} \text{ teigiamas.} \quad (2.37)$$

Antruoju atveju aplinkos ir augalo šiluminiai spinduliavimai yra lygūs. Tai atskiras atvejis, kai augalo energinės apykaitos procese šiluminis spinduliavimas ($Q_{sp} = 0$) nedalyvauja. Šiuo atveju augalas energiją transpiracijai gauna iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka. Tai galima išreikšti šia energijų balanso lygtimi:

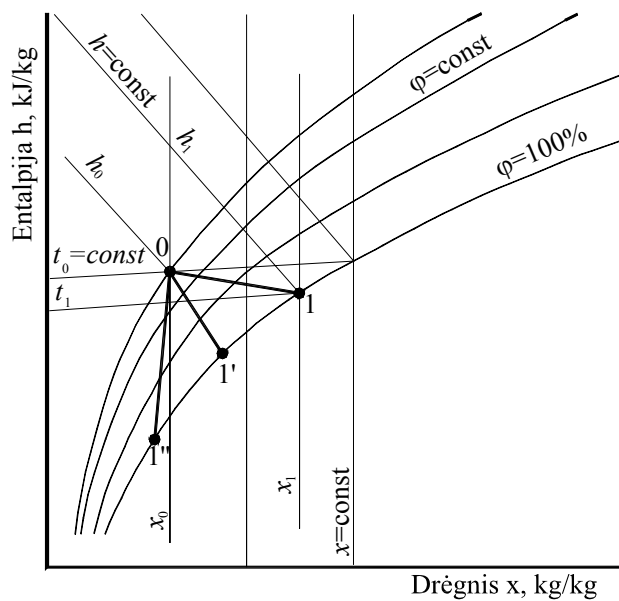
$$Q_3 = Q_2^{aus}, \quad \text{kai } Q_{sp} = 0. \quad (2.38)$$

Trečiuoju atveju augalas aplinkai šiluminio spinduliavimo būdu atiduoda daugiau šilumos negu gauna iš aplinkos. Ši atvejį galima išreikšti tokia energijų balanso lygtimi:

$$Q_3 = Q_2^{aus} - Q_{sp}, \text{ kai } Q_{sp} \text{ neigiamas,} \quad (2.39)$$

čia $Q_{2\min}^{aus}$ – energija (šiluma) kurią augalas gauna iš šiltesnės aplinkos konvekcinių šilumos mainų būdu išgarindamas 1 kg drėgmės, J/kg.

Šiame skyriuje nagrinėjami augalo energinių balansų (2.36) minimalios energinės apykaitos atvejai ir grafiškai pavaizduojami $h-x$ diagramoje. Tai suteikia daug informacijos apie procesus, vykstančius tarp augalo ir aplinkos, kai transpiruojančio augalo lapo temperatūra t_1 mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 < t_0$). Esant minimaliai augalo energinei apykaitai, kai $t_1 < t_0$, energinės apykaitos procesų tiesės $h-x$ diagramoje, jungiančios taškus 0–1, 0–1', 0–1'', turi eiti žemiau aplinkos oro izotermos $t_0 = const$ (2.14 pav.). Tai energinių procesų grupė, kai aplinkos temperatūra aukštesnė už augalo lapo temperatūrą ir aplinkos oras augalo lapui teikia šilumą.



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

Nagrinėjamoju augalo minimalios energinės apykaitos atveju aplinkos oras labiau prisotintas drėgmės negu 2.3 skyriuje nagrinėtu saulėtu paros metu. Todėl aplinkos oras absorbuoti augalo garinamos drėgmės iki visiško prisotinimo gali mažiau. Būtiną minimalų oro kiekį G_{1min} , kuris gali absorbuoti 1 kg augalų išgarintos drėgmės (arba sukondensuoti 1 kg drėgmės augalo paviršiuje rasos pavidalu), galime rasti žinodami absoliučius oro drėgnius transpiruojančio augalo lapo paviršiuje x_1 , ir aplinkoje x_0 . Šių drėgnių teigiamas skirtumas $x_1 - x_0$, kai $x_1 > x_0$ parodo, kiek 1 kg oro gali absorbuoti augalo išgarintos drėgmės. Drėgnių teigiamas skirtumas $x_0 - x_1$, kai ($x_0 > x_1$), parodo, kiek 1 kg oro augalo lapo paviršiuje gali išskirti rasos pavidalo drėgmės. Būtiną oro kiekį G_{1min} transpiracijos atveju randame iš lygties:

$$G_{1min} = \frac{1}{x_1 - x_0}. \quad (2.40)$$

Būtiną oro kiekį G_{1min} rasos iškritimo atveju randame iš lygties:

$$G_{1min} = \frac{1}{x_0 - x_1}. \quad (2.41)$$

Transpiruojančio augalo lapo paviršiuje išgarintą 1 kg drėgmės absorbuoja minimali oro masė G_{1min} . Visiškai prisotintas drėgmės oro masės kiekis G_{1min} kg augalo paviršiuje susilygina su transpiruojančio augalo lapo temperatūra. Taigi šiltesnės aplinkos temperatūros t_0 oras atiduoda šilumą lapui. Lapo paviršiuje oras atšaldomas iki lapo temperatūros t_1 . Tuomet minimalų šilumos kiekį, kurį turi atiduoti aplinkos oras, aušdamas transpiruojančio augalo lapo paviršiuje, išgarindamas 1 kg drėgmės, galime nustatyti iš lygties:

$$Q_{2min}^{aus} = G_{1min} c_p (t_0 - t_1) = c_p \frac{t_0 - t_1}{x_1 - x_0}, \quad (2.42)$$

čia Q_{2min}^{aus} – minimalus šilumos kiekis, kurį atiduoda šiltesnis aplinkos oras augalo lapų paviršiui, kol išgarina 1 kg drėgmės, J/kg.

Transpiruojančio augalo lapo ir aplinkos energinių mainų schema $h-x$ diagramoje, kai lapo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą ($t_0 > t_1$), o aplinka augalui šiluminio spinduliavimo būdu suteikia daugiau šilumos (teigiamo efektyvaus šiluminio spinduliavimo), negu jis atiduoda aplinkai, pateikta 2.15 pav. Transpiracijos procese išgarinant 1 kg drėgmės dalyvauja minimali aplinkos oro masė G_{1min} (2.40), kuri augalo lapo paviršiuje visiškai prisotinama drėgmės. Oras, atiduodamas šilumą augalo lapui, atšąla nuo temperatūros t_0 iki lapo temperatūros t_1 .

Minimalų šilumos kiekį G_{1min} , kurį atiduoda oras augalui aušdamas lapo paviršiuje (Q_{2min}^{aus}), galima rasti naudojant $h-x$ diagramą. Oro aušimo procesą pagal $h-x$ diagramą nustatome taip (2.15 pav.): oras, kurio masė G_{1min} , augalo lapo paviršiuje atšąla nuo temperatūros t_0 iki t_1 . Orui lapo paviršiuje auštant, absoliutus oro drėgnis nekinta. Todėl oro atšaldymo procesas lapo paviršiuje $h-x$ diagramoje vaizduojamas tiese $x_0 = \text{const}$. Ji brėžiama iš 0 taško iki izotermos $t_1 = \text{const}$. Kreivių $x_0 = \text{const}$ ir $t_1 = \text{const}$ sankirtoje gauname 2 tašką. Tuomet entalpijų skirtumas $h_0 - h_2 = \Delta h_{aus}$ parodo šilumos kiekį, kurį atiduoda 1 kg oro masė, atšaldama augalo lapo paviršiuje nuo t_0 iki t_1 temperatūros. Kadangi šiame procese dalyvauja G_{1min} kg oro, tai šilumos kiekis, kurį suteikia aplinkos oras augalo lapui konvekcinį šilumos mainų būdu išgarinant iš augalo 1 kg drėgmės, yra toks:

$$Q_{2min}^{aus} = (h_0 - h_2)G_{1min} = \Delta h_{aus}G_{1min}, \quad (2.43)$$

čia h_2, h_0 – oro entalpijos atitinkamai 2 ir 0 taškuose, randamos $h-x$ diagramoje arba apskaičiuojamos, J/kg.

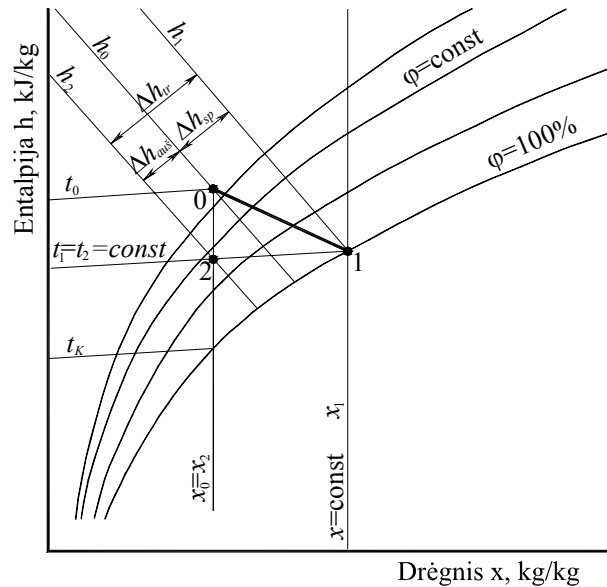
Augalo energinės apykaitos procesą nagrinėjamoju atveju vaizduos tiesė 0–1 (2.15 pav.). Nagrinėjant augalo energijų mainus su aplinka, kuriuos apibūdina parametrai $t_0 > t_1, x_1 > x_0$, energiją transpiracijai augalas gauna iš konvekcinį šilumos mainų Q_{2min}^{aus} ir teigiamo aplinkos efektyvaus šiluminio spinduliavimo Q_{sp} . Šiuo atveju augalo energijų balansas išreiškiamas (2.6), (2.37) ir (2.44) lygtimis:

$$Q_{tr} = Q_{sp} + Q_{2min}^{aus}. \quad (2.44)$$

Augalo energijų balansą (2.44) entalpine išraiška galime užrašyti taip:

$$\Delta h_{tr} = \Delta h_{sp} + \Delta h_{aus}. \quad (2.45)$$

Šis augalo energinės apykaitos su aplinka atvejis, kai $t_0 > t_1$, yra sudėtingesnis negu nagrinėto saulėto paros meto atveju, kai $t_0 < t_1$ (2.9 pav.). Kai $t_0 > t_1$, yra sudėtingiau nustatyti energijų apykaitos proceso 0–1 metu energijų pasiskirstymą tarp $Q_{2\min}^{aus}$ ir Q_{tr} . Nagrinėjamoju atveju augalo ir aplinkos energijų apykaitos procesas 0–1 $h-x$ diagramoje yra virš izotermos $t_1 = const$ (nes $t_1 < t_0$) ir žemiau entalpijos $h_1 = const$. Lygindami augalo energijų apykaitos procesus 0–1 $h-x$ diagramoje (2.15 pav.) su saulėto paros meto transpiruojančio augalo lapo energijos mainų procesu (2.9 pav.) matome, kad nagrinėjamoju augalo energinės apykaitos atveju procese 0–1 (2.15 pav.) nėra 3 taško. Žinant 3 taško parametrus x_3 , t_3 nagrinėjamosiomis sąlygomis, naudojantis $h-x$ diagrama galima nustatyti minimalią oro masę, dalyvaujančią transpiracijos procese G_{oromin} (kg/kg).

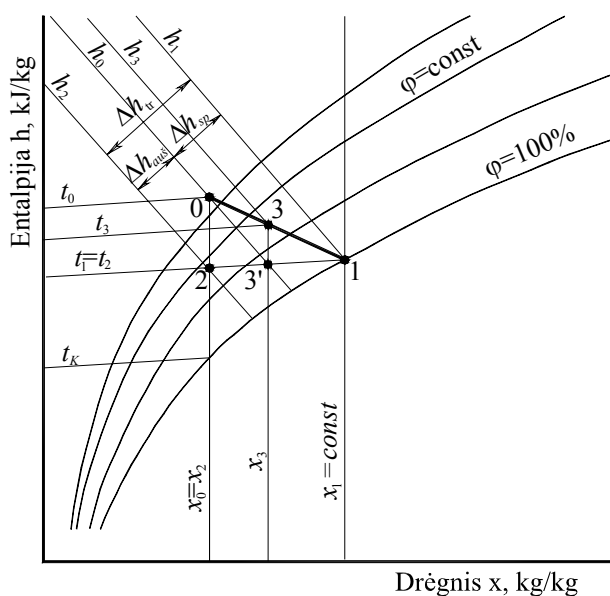


2.15 pav. Transpiruojančio augalo lapo ir aplinkos energijų mainų schema, kai lapo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$

3 taškui rasti termodinaminio požūriu sudėtingą politropinį augalo energinės apykaitos procesą 0–1 (2.16 pav.), nenusižengdami tikslumui, galime pakeisti dviem termodinaminiais procesais: oro aušinimo procesu 0–2 tiekiant šilumą augalui, kai $x_0 = const$, ir izoterminiu transpiracijos procesu 2–1. Tuomet augalo lapo transpiracijai sunaudojamą šilumos kiekį J išgarinant 1 kg vandens ($w = 1$) naudodami $h-x$ diagramą skaičiuojame pagal lygtį:

$$Q_{tr} = G_{1min}(h_2 - h_1) = \Delta h_{tr} G_{1min}. \quad (2.46)$$

Aplinkos šiluma Q_{2min}^{aus} (Δh_{aus}), suteikta augalo lapui konvekcinių šilumos mainų būdu (nes $t_0 > t_1$), sunaudojama transpiracijai. Vandens garinimo procesas aplinkos šilumos dėka vyksta esant pastoviai entalpijai $h_0 = const$ iki izotermos $t_1 = const$. Tiesių $t_1 = const$ ir $h_0 = const$ sankirtoje gauname 3' tašką, kuriame oro drėgnis $x_{3'} = const$.



2.16 pav. Augalo ir aplinkos energijų mainų schema $h-x$ diagramoje, kai energija transpiracijai gaunama iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka ir teigiamo aplinkos šiluminio spinduliavimo ($t_0 > t_1, x_1 > x_0$)

Kaip matome iš (2.16 pav.), $\Delta h_{auš} = h_0 - h_2 = h_2 - h_3$. Toliau transpiracijos procesas, esant temperatūrai $t_1 = const$, vyks dėka šilumos Δh_{sp} , kurią teikia spinduliuojanti aplinka. 3' tašką, esant $x_{3'} = const$, perkeliame į augalo energinių mainų procesą 0–1, pažymėdami 3 tašku (2.16 pav.). Lieka įrodyti, kad 3 taškas surastas teisingai. Tam naudodamiesi trikampių $\Delta 021 \sim \Delta 33'1$ (2.16 pav.) geometrinio panašumu gauname:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_{2min}^{paš}} = \frac{\Delta h_{tr}}{\Delta h_{paš}} = \frac{h_1 - h_2}{h_{3'} - h_2} = \frac{\overline{1-2}}{\overline{3'-2}} = \frac{\overline{1-0}}{\overline{3-0}} = \frac{h_1 - h_0}{h_3 - h_0} \quad (2.47)$$

3 taškas surastas teisingai, nes tenkina lygtį transpiracijos skaičiui S_k skaičiuoti.

Mūsų nagrinėjamam augalo energijų mainų atvejui, kai aplinkos oro temperatūra didesnė už augalo lapo temperatūrą $t_0 > t_1$, oro mišinio, transpiruojančio augalo lapo aplinkoje, sudarymo dėsningumai nusakomi (2.16), (2.17) ir (2.18) lygtimis. Remdamiesi (2.16), (2.17) ir (2.18) lygtimis galime rasti oro masės G_{oromin} , dalyvaujančios energijų mainų procese, išgarinant 1 kg drėgmės, skaičiavimo lygtį:

$$G_{oromin} = G_{1min} + G_0 = G_{1min} + S_k G_{1min} = (1 + S_k) G_{1min} \quad (2.48)$$

Pasinaudoję (2.40), (2.41) ir (2.48) lygčių išraiškėmis gauname:

$$G_{oromin} = (1 + S_k) G_{1min} = \frac{1 + S_k}{x_1 - x_0} \quad (2.49)$$

Šilumos kiekį, kurį augalo lapas gauna iš teigiamo efektyvaus šiluminio spinduliavimo, randame iš lygties:

$$Q_1 = (h_1 - h_0) G_{1min} = \Delta h_{sp} \cdot G_{1min} \quad (2.50)$$

Žinodami G_{oromin} , t. y. minimalų aplinkos oro kiekį, dalyvaujantį transpiracijos ir konvencinių šilumos mainų procesuose išgarinant 1 kg drėgmės (nagrinėjamomis sąlygomis), galime nustatyti šios oro masės G_{oromin} temperatūros sumažėjimą (dėl šilumos, kurią atiduoda aplinkos oras lapui šildyti), naudodami $h-x$ diagramos duomenis (2.16 pav.) iš lygčių:

$$Q_{2\min}^{aus} = c_p(t_0 - t_1) G_{1\min} = c_p(t_0 - t_3) G_{oromin}; \quad (2.51)$$

$$\Delta t_{oro} = t_0 - t_3. \quad (2.52)$$

Ši oro temperatūros sumažėjimą Δt_{oro} galime apskaičiuoti pasinaudoję (2.42), (2.49) ir (2.51) lygtimis:

$$\Delta t_{oro} = \frac{Q_{2\min}^{aus}}{G_{oro\min} c_p} = \frac{t_0 - t_1}{1 + S_k}. \quad (2.53)$$

Δt_{oro} – rodo, kiek sumažėja aplinkos oro G_{oromin} , dalyvaujančio augalo lapo energinės apykaitos procese, temperatūra, °C.

Šilumos kiekį, kurį augalas sunaudoja transpiracijai išgarindamas 1 kg drėgmės ($w = 1$), randame iš lygties:

$$Q_3 = wr = r = (h_1 - h_2) G_{1\min} = \Delta h_{tr} G_{1\min}. \quad (2.54)$$

Atkreipiame dėmesį į tai, kad drėgmei garinti fizikiniu požiūriu sunaudojamas vienodas šilumos kiekis žymimas vandens garavimo šiluma r . Esant 15 °C, išgarinant 1 kg vandens, $r = 2465$ kJ/kg. Transpiracijos procesas nėra vien tik vandens garinimas. Šio proceso metu augalas būtinai dalyvauja konvekciniuose šilumos mainuose su aplinka. *Augalas, kurio temperatūra aukštesnė negu aplinkos $t_1 > t_0$, šilumą atiduoda aplinkai, ją šildo. Jei augalo temperatūra mažesnė negu aplinkos $t_0 > t_1$, aplinka atiduoda augalui šilumą, kuri dažniausiai naudojama transpiracijos procesui intensyvinti.* Svarbiausią augalo energinės apykaitos rodiklį – transpiracijos skaičių S_k – galime rasti iš šios lygties:

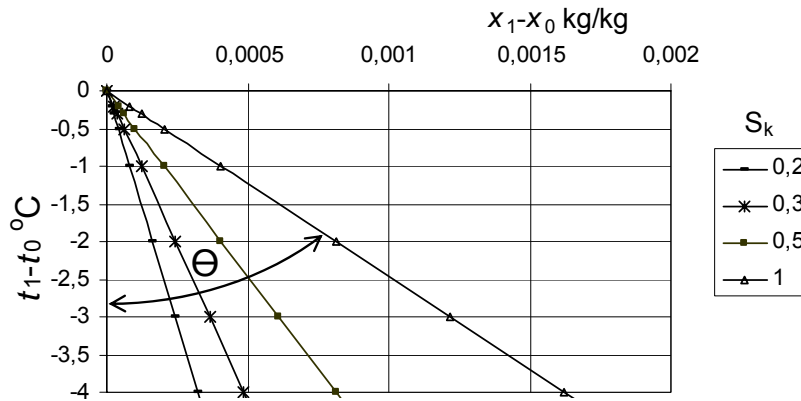
$$S_k = \frac{Q_3}{Q_2^{aus}} = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_2} = \frac{\Delta h_{tr}}{\Delta h_{aus}}. \quad (2.55)$$

Nagrinėjamoju atveju transpiracijos procese, kai $t_0 > t_1$, išgarinant 1 kg drėgmės, dalyvaus minimalus oro kiekis $G_{1\min}$. Jis konvekcinių šilumos mainų būdu transpiruojančiam augalo lapui suteiks šilumos

$Q_{2\min}^{aus}$. Naudodamiesi (2.56) lygtimi ir $h-x$ diagrama galime nustatyti transpiracijos skaičių iš lygties:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_2^{aus}} = \frac{r}{c_p \frac{t_0 - t_1}{x_1 - x_0}} = 2465z \frac{x_1 - x_0}{t_0 - t_1}. \quad (2.56)$$

Koeficiento z reikšmės, įvertinančios vandens garavimo ir oro savišios šilumos priklausomybę nuo temperatūros, pateiktos 2.2 lentelėje.



2.17 pav. Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro (t_0, x_0) ir transpiruojančio lapo paviršiaus oro (t_1, x_1) parametrų, kai augalo lapo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą $t_0 > t_1$. Θ – neigiamo efektyviojo šiluminio spinduliavimo sritis

Transpiracijos skaičius (2.56) reiškia energinių srautų Q_3 ir Q_2^{aus} pasiskirstymą augalo lape, esant ($t_0 > t_1$) teigiamam temperatūros gradientui. Tai pavakario, negiedros dienos ar vakaro metu vykstančių augalo energinių procesų vertinimo skaičius S_k . Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro ir transpiruojančio lapo paviršiaus temperatūrų skirtumo $t_0 - t_1$ ir drėgnių skirtumo $x_1 - x_0$, pateikta 2.17 pav. Ši paros laiką apibūdina mažas teigiamas efektyvus spinduliavimas Q_1 , ir neigiamas temperatūros gradientas $t_0 > t_1$.

2.5. Augalų energinė apykaita, kai augalo ir jo aplinkos temperatūros vienodos

Augalų energinė apykaita, kai augalo lapo t_1 ir jo aplinkos temperatūra t_0 yra vienodos ($t_1 = t_0$), vyksta esant vienam drėgnio gradientui. Tai atskiras augalo gyvenimo atvejis, kuris pastebimas mažiausiai 2 kartus per parą, pereinant iš teigiamo į neigiamą (arba atvirkščiai) temperatūros gradientą. Šis atskiras augalo energinės apykaitos atvejis nusako transpiracijos procesą, kai aplink augalo lapą nėra gravitacinių jėgų, kurias sukelia temperatūrų skirtumas (temperatūros gradientas). Drėgmės judėjimas aplink augalą vyksta tikrai dėl gravitacinių jėgų, kurias sukelia augalo lapo paviršiaus ir aplinkos oro drėgnių skirtumas ($x_1 - x_0$), esant tai pačiai temperatūrai ($t_1 = t_0$). Tokiais atvejais energinės apykaitos procesas augalo lapo paviršiuje termodinaminiu požiūriu yra izoterminis. Jis $h-x$ diagramoje sutampa su izoterma $t_1 = t_0 = const$. Todėl visi galimi energijų mainų procesai tarp augalo ir aplinkos vyks veikiant drėgnio gradientui augalo lapo paviršiuje ir išsidėstys tiesėje $t_1 = t_0 = t_2 = t_3 = const$ (2.18 pav.).

Kadangi augalo lapo ir aplinkos temperatūros lygios, $t_1 = t_0 = const$, temperatūros gradiento augalo lapo aplinkos sluoksnyje nebus. Nebus ir augalo konvekcinų šilumos mainų su aplinka, nes $t_1 = t_0$. Tai penktas augalų energinės apykaitos atvejis, aptartas 2.1 skyriuje. Šiuo atveju augalo lapo energijų balanso narys $Q_2 = 0$. Tuomet energijų balanso lygtis (2.2) (2.9) bus tokia:

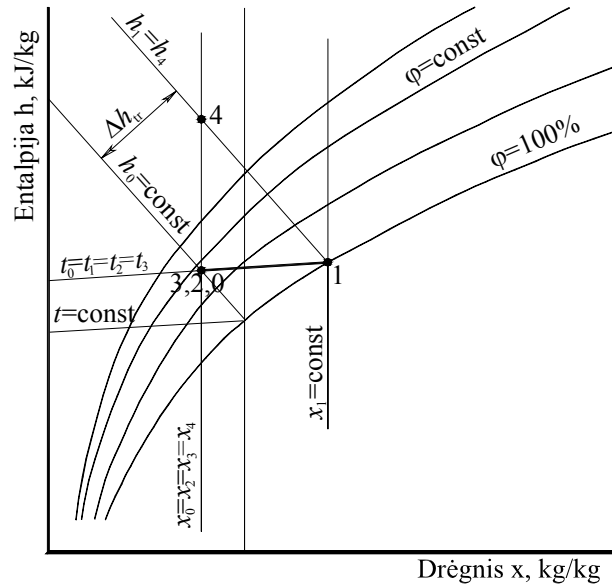
$$abQ_{sp} = aQ_1 = Q_3 \text{ arba } abq_{sp} = aq_1 = q_3. \quad (2.57)$$

Transpiracijos atiduodamas aplinkai šilumos srautas išreiškiamas transpiracijos intensyvumo ir vandens garavimo šilumos sandauga ($Q_3 = rw$). Iš (2.57) lygties randame transpiracijos intensyvumą w :

$$w = \frac{abQ_{sp}}{r} = \frac{aQ_1}{r}. \quad (2.58)$$

Kaip matome iš (2.58) lygties, transpiracijos intensyvumas šiuo atveju priklauso tik nuo augalo absorbuotos saulės energijos aQ_1 , kuri,

virtusi šiluma, bus sunaudota vien tik transpiracijai, nes nėra šilumos mainų su aplinka, $Q_2 = 0$.



2.18 pav. Augalo ir aplinkos energijų mainų schema, kai augalo lapo temperatūra lygi aplinkos temperatūrai $t_1 = t_0$, oro drėgnis $x_1 > x_0$

Augalo lapo temperatūra lygi aplinkos oro temperatūrai ($t_1 = t_0$) per parą pastebima mažiausiai du kartus. Natūraliomis aplinkos sąlygomis toks atvejis būna vakare ir ryte, t. y. perėjimo periodu iš teigiamo į neigiamą (ir atvirkščiai) temperatūros gradientą. Tokius trumpalaikius energijos mainų atvejus, kai $t_1 = t_0$, pastebime saulėtu paros metu lyjant, saulėtu metu laistant augalus, taip pat veikiant kitiems trumpalaikiams išorės veiksniams. Šiuo atveju, kai aplinkos temperatūra lygi transpiruojančio augalo lapo paviršiaus temperatūrai ($t_1 = t_0$), transpiracijos skaičius lygus:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_2} = \lim_{Q_2 \rightarrow 0} \frac{Q_3}{Q_2} = \infty. \quad (2.59)$$

Kai augalo lapų paviršiaus temperatūra lygi aplinkos oro temperatūrai $t_1 = t_0$, susiduriame su atskiru augalo gyvenimo atveju. Šio energinės apykaitos proceso metu visa augalo lapų absorbuota saulės energija sunaudojama transpiracijai. Transpiracijos intensyvumas šiuo atveju randamas iš (2.58) lygties. Esant vienodai augalo ir aplinkos oro temperatūrai $t_1 = t_0$, priklausomai nuo aplinkos oro drėgnio kitimo x_0 , teoriškai galimi trys augalo ir aplinkos energijų mainų atvejai:

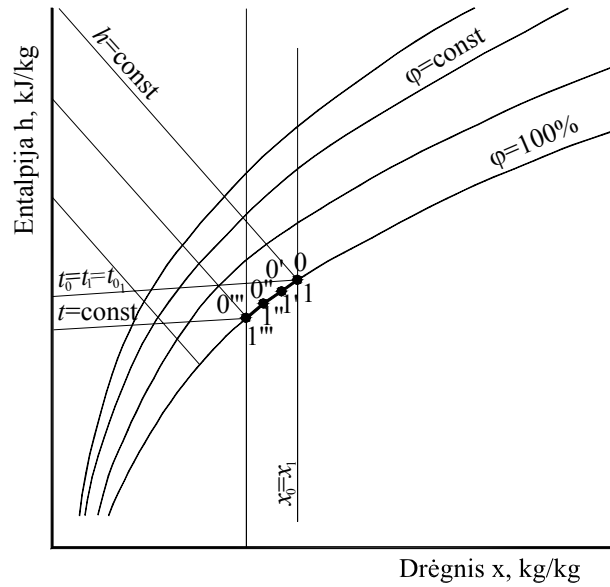
$$x_1 > x_0, \quad t_1 = t_0; \quad (2.60)$$

$$x_1 = x_0, \quad t_1 = t_0; \quad (2.61)$$

$$x_1 < x_0, \quad t_1 = t_0. \quad (2.62)$$

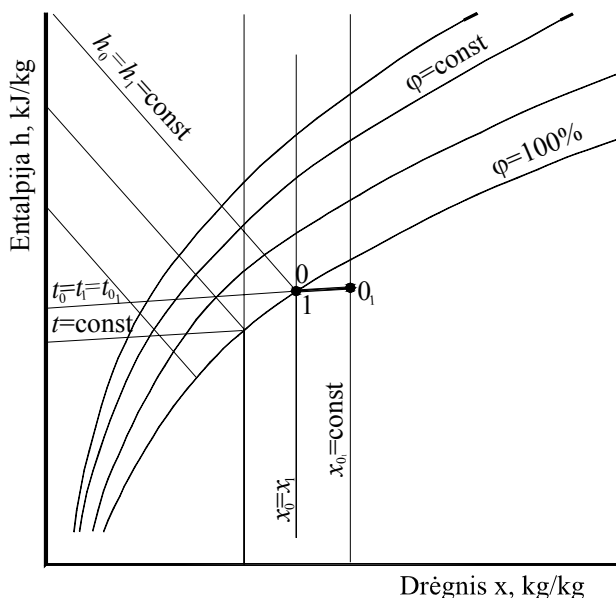
Pirmasis energijų mainų atvejis, kai $t_1 = t_0$, o $x_1 > x_0$, yra realus. Toks atvejis pastebimas mažiausiai du kartus per parą. Ši augalo ir aplinkos energijų mainų atvejį jau aptarėme, jis pavaizduotas $h-x$ diagramoje 2.18 pav.

Antrasis energijų mainų atvejis būna, kai augalo lapo temperatūra lygi aplinkos oro temperatūrai $t_1 = t_0$, esant vienodam oro drėgniui $x_1 = x_0$. Tokiomis augalo energinės apykaitos sąlygomis nėra temperatūros ir drėgmės gradientų, nėra konvekcinių šilumos mainų su aplinka ir transpiracijos (nes $x_1 = x_0$). Šiuo atveju $h-x$ diagramoje 0 ir 1 taškai sutampa (2.19 pav.). Toks augalo gyvenimo atvejis ilgesnį laiką egzistuoti negali, o augalo energinės apykaitos procesas teoriškai yra galimas trumpą laiką. Tokiu augalo gyvavimo momentu yra nutrūkę bet kokie energijų ir medžiagų mainai su aplinka. Ilgiau užsitęsęs tokiam augalo energinės apykaitos procesui be energijų mainų su aplinka, biologiniai procesai sukelia tam tikrus temperatūros pokyčius augalo audiniuose. Temperatūros ir drėgmės gradientai kartu su kitais (O_2 , CO_2 koncentracijų) gradientais, egzistuojančiais tarp augalo ir aplinkos, sužadina gravitacines jėgas, skatinančias CO_2 ir metabolitų judėjimą augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje.



2.19 pav. Energijų mainų su aplinka schema, kai augalo audinių paviršiaus ir aplinkos oro temperatūros vienodos $t_1 = t_0$, o oro drėgnis $x_1 = x_0$

Nagrinėjamoju (2.61) antruoju augalo energinės apykaitos atveju ($t_1 = t_0, x_1 = x_0$), keičiantis absoliučioms temperatūrų ir drėgnio reikšmėms, procesas $h-x$ diagramoje vykėtų ribine kreive $\varphi = 100\%$. Mažėjant absoliučiai temperatūros reikšmei, drėgmė rasos pavidalu iškrinta lapo paviršiuje. Rasos iškritimo procesas vyksta kreive $\varphi = 100\%$ (2.19 pav.). Teoriškai toks augalo energinės apykaitos procesas yra galimas augalo lape vykstant endoterminiams procesams.



2.20 pav. Energijų mainų su aplinka schema, kai augalo audinių paviršiaus ir aplinkos oro temperatūros vienodos $t_1 = t_0$, kai oro drėgnis $x_1 < x_0$

Trečiasis augalo energinės apykaitos atvejis, kai $t_1 = t_0$, o $x_1 < x_0$, yra galimas tik rūke. Tokią aplinkos oro būklę atitinka 0_1 taškas (2.20 pav.). Šis taškas $h-x$ diagramoje yra persotinto aplinkos oro srityje, kur dalis oro drėgmės yra mažyčių vandens lašelių pavidalo. Augalo transpiracija nevyksta $Q_3 = 0$. Konvekciniai šilumos mainai taip pat nevyksta $Q_2 = 0$, nes persotinto aplinkos oro srityje nėra temperatūrų gradiento $t_1 = t_0$, $h-x$ diagramoje kreivė $\varphi = 100\%$ rodo maksimaliai prisotinto drėgmės aplinkos oro būseną esant tam tikrai temperatūrai. Skirtumas $x_0 - x_1$ rodo oro drėgmės kiekį, kuris yra vandens lašelių pavidalo 1 kg absoliučiai sauso oro. Šioje aplinkos oro būsenoje drėkinami augalo paviršiniai audiniai, kadangi $x_0 > x_0$.

Išnagrinėję aprašomus lygtimis (2.60), (2.61), (2.62) augalo energinės apykaitos procesų su aplinka atvejus, kai augalo lapo paviršiaus ir aplinkos oro temperatūros ($t_1 = t_0$) vienodos (keičiasi oro drėgniai), ma-

tome, kad tokie augalo energinės apykaitos procesai galimi, tačiau mažai tikėtina, kad jie gali trukti ilgesnį laiką.

2.6. Augalų energinė apykaita esant tik vienam temperatūros gradientui

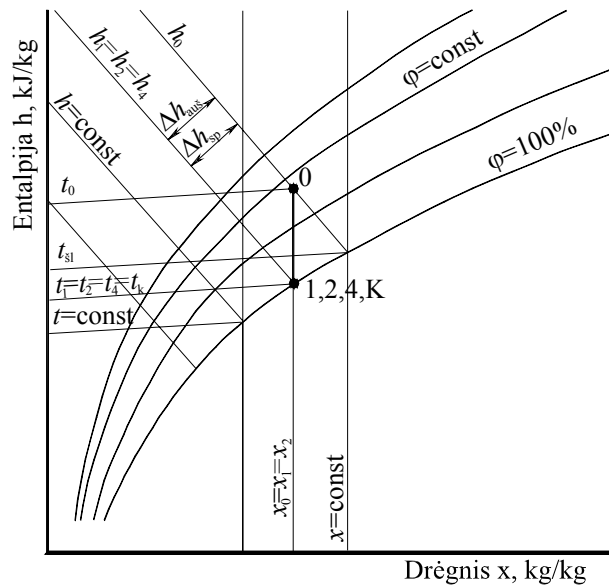
Augalo lapų paviršiaus temperatūra ir oro drėgnis (išskyrus pereinamuosius momentus) visuomet skiriasi nuo aplinkos oro temperatūros ir drėgnio. Tarp augalo lapo ir aplinkos visuomet egzistuoja temperatūros ir oro drėgnio teigiami arba neigiami gradientai. Šie gradientai augalo lapo paviršiuje visuomet sukelia augalo lapo temperatūros ir drėgnio apykaitos su aplinka sluoksnio susidarymą.

Šiame skyriuje aptariama augalų energinė apykaita, kuri vyksta esant tik tai vienam augalo ir aplinkos temperatūros gradientui. Oro drėgniai augalo lapo paviršiuje x_1 ir augalo aplinkoje x_0 vienodi, $x_1 = x_0$. Drėgnio gradiento nėra. Vienodas oro drėgnis augalo lapo paviršiuje x_1 ir aplinkoje x_0 yra atskiras augalo gyvenimo atvejis. Kai, oro drėgnio pokyčių aplink augalą nėra, transpiracija $w = 0$ nevyksta, $Q_3 = 0$. Toks augalo energinės apykaitos atvejis pastebimas, kai visa lapo absorbuota saulės energija αQ_1 , virtusi šiluma, sunaudojama augalo lapo konveciniams šilumos mainams su aplinka. Šį atvejį nusako (2.10) lygtis. Tai šeštasis augalų energinės apykaitos atvejis, aptartas 2.1 skyriuje. Galimas ir atvirkštinis procesas – visa augalo lapo gauta šiluma iš aplinkos konvecinių mainų būdu bus išspinduliuota aplinkai. Tai pereinamasis, trumpalaikis energinės apykaitos procesas prieš rasos iškritimą. Šis augalo energinių mainų procesas, kai $x_1 = x_0 = \text{const}$, $h-x$ diagramoje sutampa su oro aušinimo procesu ir vaizduojamas vertikalia tiese. Nagrinėjamoju atveju augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje CO_2 ir metabolitų judėjimui varomąją jėgą suteikia teigiamas $t_0 > t_1$ arba neigiamas $t_0 < t_1$ temperatūros gradientas. Nagrinėjamasis augalo energinės apykaitos atvejis yra momentinis. Kiti augalo aplinkos energinės apykaitos gradientai, galintys sukelti gravitacines jėgas orui judėti, augalo lapo paviršiuje mažai tikėtini. Toks energinės apykaitos atvejis ilgiau pastebimas esant augalo aplinkos temperatūrai artimai $0\text{ }^\circ\text{C}$ arba termiškai naikinant piktžolės $100\text{ }^\circ\text{C}$ vandens garo aplinkoje. Nagrinėjamoju atveju augalo transpiracija nevyksta, $Q_3 = 0$, nes $x_1 = x_0$. Iš energijų balanso lygties

(2.11) matyti, kad tarp augalo lapo ir aplinkos vyksta energijų apykaita tikrai spinduliavimo ir konvekcijos būdu. Nagrinėjamojo atvejo energijų balanso lygtis (2. 3) atrodo taip:

$$abQ_{sp} = \alpha Q_1 = \pm Q_2. \quad (2.63)$$

Šiuo atveju visa augalo lapo gauta šiluma iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka sunaudojama augalo šiluminiam spinduliavimui į aplinką. Tokiu energijų mainų tarp augalo ir jo aplinkos atveju 1, 2, 4 taškai ir K $h-x$ diagramoje sutampa. Vadinasi, visi galimi energijų mainų procesai tarp augalo lapo ir aplinkos vyks tiesėje $x_0 = x_1 = x_2 = x_K$ (2.21 pav.).



2.21 pav. Augalo ir aplinkos energijų mainų schema, kai nėra drėgmės gradiento $x_1 = x_0 = const$. Augalo lapo temperatūra t_1 mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 < t_0$) $\Delta h_{aus} = \Delta h_{sp}$

Kaip matome iš 2.21 pav., termodinaminiu požiūriu augalo ir aplinkos energijų mainų procesas prilygsta oro atšaldymo procesui nuo t_0 iki t_1 , kai oro drėgnis pastovus $x_1 = x_0 = const$. Transpiracija nevyksta,

nes $x_1 = x_0$. Transpiracijos skaičius $S_k = 0$, nes $Q_{tr} = 0$. Kaip matome iš 2.21 pav., 1 taškas sutampa su ore esančios drėgmės kondensacijos tašku K. Taško K temperatūra lygi ore esančių vandens garų kondensacijos temperatūrai t_k .

Kai tarp augalo ir aplinkos yra tik temperatūros gradientas, drėgmės gradiento nėra, transpiracijos procesas nevyksta ir jam energija nenaudojama. Šiam atvejui 2.21 paveiksle pateikta $h-x$ diagramoje visų galimų augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesų tiesė $x_1 = x_0 = const$. Esant nagrinėjamiems sąlygoms teoriškai galimi trys atvejai:

$$x_1 = x_0, \quad t_1 > t_0; \quad (2.64)$$

$$x_1 = x_0, \quad t_1 = t_0; \quad (2.65)$$

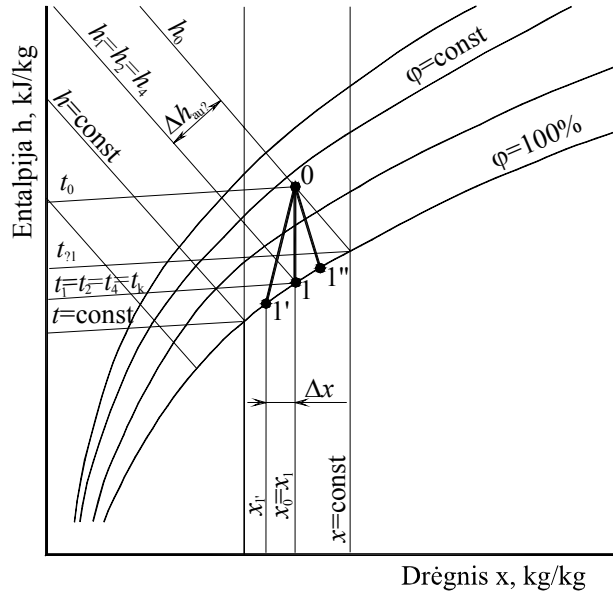
$$x_1 = x_0, \quad t_1 < t_0. \quad (2.66)$$

Pirmasis augalo lapo energijų mainų su aplinka atvejis (2.64) galimas, kai $x_1 = x_0$, $t_1 > t_0$. Transpiracija nevyksta, nes $x_1 = x_0$. Natūraliomis aplinkos sąlygomis, kai $x_1 = x_0$, o augalo lapo temperatūra t_1 didesnė už aplinkos temperatūrą, t_0 yra negalima, nes prieštarauja drėgno oro termodinamikos dėsniams. Taigi realiomis aplinkos sąlygomis toks atvejis neegzistuoja. Eksperimento sąlygomis pastebimas tada, kai nagrinėjama maksimaliai galima augalo lapo, ištepto vazelinu, temperatūra.

Antrasis energijų mainų atvejis (2.65), kai $x_1 = x_0$, o $t_1 = t_0$, yra aptartas 2.2.4 skyriuje nagrinėjant augalų energinės apykaitos procesus, aprašomus lygtimi (2.61), kai augalo ir jo aplinkos temperatūros vienodos.

Trečiasis augalo lapo energijų mainų su aplinka atvejis (2.66) vyksta aplinkoje, kai $x_1 = x_0$, $t_1 < t_0$. Transpiracija nevyksta $Q_3 = 0$, nes drėgnis $x_1 = x_0$. Aplinkos temperatūra didesnė už augalo lapo temperatūrą $t_0 > t_1$. Nagrinėjamoju atveju realiomis aplinkos sąlygomis augalo lapo temperatūra (2.21 pav.) lygi ore esančios drėgmės kondensacijos proceso pradžios temperatūrai t_k . Iš (2.63) lygties matyti, kad visa augalo lapo gauta šiluma konvekcijos būdu yra išspinduliuojama į aplinką. Kad prasidėtų energinė apykaita, augalas turi padidinti arba sumažinti lapo temperatūrą. Ji mažėja, kai augalo gauta šiluma konvekcinių šilumos mainų būdu iš aplinkos nepadengia augalo šiluminio spinduliuavimo į

aplinką. Tuomet šilumos trūkumą turi padengti kondensacijos (rasos iškritimo) procesas augalo lapo paviršiuje. Šio proceso metu dėl iškritusios augalo paviršiuje rasos mažėja oro drėgnis aplink augalą. Kondensacijos procesą $h-x$ diagramoje rodo procesas 1–1', kuris vyksta ribine kreive $\varphi=100\%$, mažėjant temperatūrai. Vyksta rasos augalo lapų paviršiuje iškritimo procesas. Iškritusį rasos kiekį Δx iš 1 kg absoliučiai sauso oro randame iš $h-x$ diagramos. $x_0 - x_{1'} = \Delta x$ kg/kg (2.22 pav.).



2.22 pav. Augalo energijų mainų proceso schema, kai augalo lapo temperatūra t_1 mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 < t_0$), o $x_1 = x_0 = const$

Analogiškai galimas atvejis, kai pasikeitęs augalo energijų balansas padidina lapo temperatūrą $t_{1'} > t_1$, o tai sukelia drėgmės gradientą $\Delta x = x_{1'} - x_1$. Abu galimus energijų mainų su aplinka procesus, leidžiančius augalui vėl sugrįžti prie transpiracijos proceso, $h-x$ diagramoje rodo tiesės 0–1', ir 0–1'' (2.22 pav.).

Aptariamas augalo energijų mainų su aplinka procesas 0–1 yra galimas, tačiau jis gali būti tik trumpalaikis pereinamojo laikotarpio procesas.

Transpiracijos skaičius, augalo energijų mainų su aplinka atveju, kai nėra drėgmės $x_1 = x_0 = \text{const}$ gradiento, lygus 0 ($S_k = 0$).

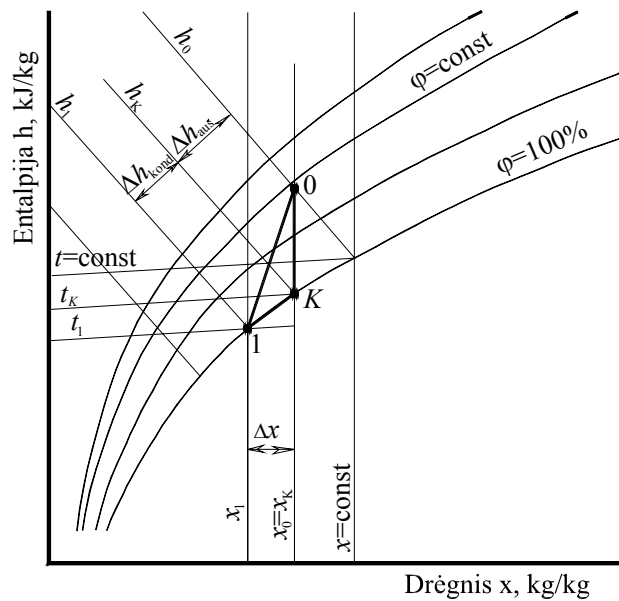
2.7. Augalų energinė apykaita rasos iškritimo ir radiacinės šalnos metu

Augalų ir aplinkos energinės apykaitos atvejis, kurį apibūdina (2.66) lygtis ir parametrai $t_1 < t_0$, $x_1 = x_0 = \text{const}$, pastebimas, kai visa augalo lapo gauta šiluma konvekcinių šilumos mainų su aplinka būdu sunaudojama šiluminiam spinduliavimui į aplinką. Augalas konvekcijos būdu šilumą iš aplinkos gauna, kai jo temperatūra mažesnė už augalo aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$. Tokiu atveju $h-x$ diagramoje 1 taškas sutampa su 4 tašku (2.21 pav.). Transpiracija nevyksta $Q_{tr} = 0$, nes $x_1 = x_0 = \text{const}$. Transpiracijos skaičius $S_k = 0$. Augalo energijų mainų su aplinka procesas yra ne kas kita, kaip oro šaldymo procesas esant ($x_1 = x_0 = \text{const}$) pastoviam drėgniui. Augalo lapo temperatūra lygi drėgmės, esančios ore, kondensacijos pradžios temperatūrai, kurią $h-x$ diagramoje atitinka taškas K . Nagrinėjamoju atveju, kai $t_1 < t_0$, $x_1 = x_0 = \text{const}$, yra galimas tik vienas augalų ir aplinkos energinės apykaitos atvejis, kuris aptartas 2.6 skyriuje, pavaizduotas $h-x$ diagramoje 2.21 pav.

Augalo energijų mainų su aplinka procesas, kurį apibūdina aplinkos parametrai $t_1 < t_0$, $x_1 < x_0$, pastebimas tada, kai augalo lapo gauta šiluma konvekcinių šilumos mainų būdu iš aplinkos nepadengia augalo šiluminio spinduliavimo į aplinką. Augalo paviršiaus temperatūra krenta. Ji sumažėja iki drėgmės, esančios ore, rasos taško temperatūros. Tuomet šilumos trūkumą tarp konvekcinių šilumos mainų ir spinduliavimo turi padengti kondensacijos (rasos iškritimo) proceso metu išskirta šiluma augalo lapo paviršiuje. Kondensacijos proceso metu mažėja absoliutus aplinkos oro drėgnis. Šį procesą $h-x$ diagramoje vaizduoja procesas, vykstantis ribine kreive $\varphi = 100\%$, mažėjant augalo paviršiaus temperatūrai. Išškrenta rasa augalo paviršiuje. Iškritusį rasos kiekį iš 1 kg oro randame iš drėgnių pokyčio $x_0 - x_1 = \Delta x$ kg/kg_{s.o.} $h-x$ diagramoje (2.23 pav.). Nagrinėjamomis sąlygomis (2.66), kurias nusako aplinkos para-

metrai, kai $t_1 < t_0$, $x_1 < x_0$, yra galimas tik vienas atvejis, kuris grafiškai pavaizduotas 2.23 pav.

Priklausomai nuo aplinkos temperatūros, kuriai esant vyksta augalo audinių temperatūros mažėjimo procesas, augalo gyvenime gali vykti du procesai, sukeliantys skirtingas pasekmes augalui. Rasa iškrinta augalo paviršiuje kondensuojantis oro drėgmei tuomet, kai augalas išspinduliuoja į aplinką daugiau energijos, negu jos gauna konvekcinę šilumos mainų būdu iš aplinkos. Tokia augalo energinė apykaita pastebima vasaros vakarais, naktį, anksti ryte, kai aplinkos oro temperatūra mažėja. Mažėjant aplinkos temperatūrai, santykinis oro drėgnis φ didėja. Ši procesą, vykstantį aplink augalą 0–2 (2.21 pav.), apibūdina procesas $x_0 = x_K = x_2 = \text{const}$. Augalo audiniams pasiekus kondensacijos proceso pradžios temperatūrą t_k (tašką K), toliau mažėjant augalo audinių temperatūrai, iškrinta rasa.



2.23 pav. Augalo energijų mainų proceso h - x diagramoje schema rasos susidarymo metu $t_1 < t_k$, $x_1 < x_0$

Nenutrūkstamas rasos iškritimas augalo lapų paviršiuje vyksta, kai jų temperatūra būna žemesnė kaip t_k (esant tam tikram parcialiniam vandens garų slėgiui ore). Rasos susidarymui augalo audinių paviršiuje turi įtakoti išoriniai aplinkos veiksniai. Šiluminį augalo spinduliavimą į aplinką ir rasos iškritimą didina debesuotumo mažėjimas, giedras dangus. Augalo ir aplinkos konvekciniam šilumos mainams daro įtaką vėjo greitis, kuriam didėjant šiltesnis aplinkos oras daugiau atiduoda šilumos augalo audiniams. Oro drėgmės kondensacija augalų paviršiuje retai trunka visą naktį. Dažniausiai šis procesas yra permainingas, paprastai vyksta kartu su garavimu, priklausomai nuo vėjo greičio ir debesuotumo pokyčių. Nutraukus rasos iškritimo procesą rasa nuo augalų paviršiaus išgaruoja per 1–2 valandas. Augalų paviršiuje iškrenta ne didesnis kaip 1 mm storio rasos sluoksnis.

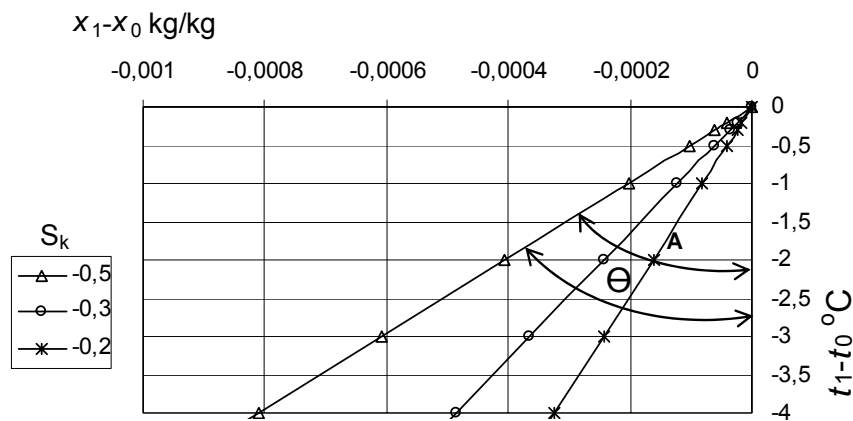
Rasos iškritimas augalui suteikia labai daug šilumos, kurią augalas sunaudoja šiluminio spinduliavimo nuostoliams į aplinką padengti. Rasos iškritimo šiluma lygi vandens garavimo šilumai (2489 kJ/kg, kai 5 °C). Iškritus 1 mm rasos 1 m² lapų paviršiaus susidarys 1 kg vandens. Tai reiškia, kad 1 m² augalo lapų paviršiaus gaus šilumos (kai aplinkos temperatūra 5 °C), kurią turi 6,2 kg verdančio vandens. Taigi šaltą naktį rasos iškritimas augalui yra labai svarbus šaltinis energijos, kurią sunaudoja spinduliavimo į aplinką šilumos nuostoliams padengti. Dideli rasos kiekiai kai kuriais atvejais padeda kovoti augalui, siekiant išvengti radiacinės šalnos. Tai lengvai pastebime, kai netoliese esantys pasėlių plotai patiria nevienodą radiacinės šalnos poveikį.

Rasos susidarymo procese dalyvauja didžiulės oro masės. Pavyzdžiui, pasinaudoję $h-x$ diagrama galime nustatyti, kad sumažinus rasos iškritimo temperatūrą 2 °C, 1 m³ oro išskiria 1 g drėgmės augalo paviršiuje. 1 mm storio rasos sluoksnis ant 1 m² lapų paviršiaus sveria 1 kg. Vadinasi, 1 mm storio rasos sluoksnį, sumažėjus oro temperatūrai 2 °C, išskirs paviršinis oro sluoksnis, kurio storis 1000 m. Todėl rasos iškritimo procesas susijęs su labai didžiulių oro masių dalyvavimu. Laikoma, kad optimalus rasai iškristi vėjo greitis yra 1–3 m/s. Drėgmės kiekį, kurį išskiria 1 kg oro rasos susidarymo procese, galime rasti naudodamiesi $h-x$ diagrama. Išskirtas drėgmės kiekis - $\Delta x = x_0 - x_1$ (2.23 pav.).

Pavasariį, naktį, esant žemoms aplinkos temperatūroms, ankstyvą rytą, mažėjant augalo paviršiaus temperatūrai, t. y. taškui K slenkant žemyn linija $\varphi = 100\%$, 1 taškas gali pasiekti aplinkos temperatūrą, artimą 0 °C (2.23 pav.). Jei augalo konvekciniai šilumos mainai su aplinka ne-

padengia energijos poreikių šiluminiam spinduliavimui į aplinką, toliau mažėjant augalo temperatūrai pasireiškia radiacinė šalna, esant teigiamai aplinkos oro temperatūrai. Pradiniu radiacinės šalnos pasireiškimo periodu lapų šilumos trūkumą dengia rasos susidarymo šiluma, vėliau – ledo susidarymo šiluma.

Ledo susidarymo (rasos lapų paviršiuje ir lapuose esančio vandens) šiluma labai didelė (333 kJ/kg), artima šilumai vandeniui užvirinti (419 kJ/kg). Ledo susidarymo metu augalo lapų audinių temperatūra artima 0 °C. Augalo audinių temperatūra 0 °C būna kol augalo lapo konveciniai šilumos mainai su aplinkos oru, rasos iškritimas, vandens virimo ledu šiluma padengia augalo šiluminį išspinduliavimą į aplinką. Augalo lapo temperatūra krenta žemiau 0 °C tik tai susidarius ledu augalo lapo audiniuose. Toks reiškinys pastebimas rytmečiais, esant giedram dangui. Taip paaiškinamas radiacinės šalnos procesas $h-x$ diagramoje (2.23 pav.), pasireiškiantis esant teigiamoms aplinkos temperatūroms lauke ir po polietileninėmis uždangomis. Taigi sąlygos rasai iškristi ir radiacinei šalnai pasireikšti yra vienodos. Skiriasi tik aplinkos temperatūros, kurioms esant vyksta šie procesai. Radiacinę šalną, stebėtą tyrimų metu, esame aprašę spaudoje.



2.24 pav. Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro (t_0 , x_0) ir transpiruojančio lapo paviršiaus oro (t_1 , x_1) parametrų, kai augalo lapo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą $t_0 > t_1$. A – rasos iškritimo arba radiacinės šalnos sritis. Θ – neigiamo efektyviojo šiluminio spinduliavimo sritis

Rasos iškritimo arba radiacinės šalnos metu transpiracijos skaičius yra didesnis kaip $-\infty$ ir mažesnis kaip 0 ($-\infty < S_k < 0$). Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro (t_0, x_0) ir transpiruojančio lapo paviršiaus oro (t_1, x_1) parametru, kai augalo lapo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą $t_0 > t_1$ ir yra artima 0 °C, pateikta 2.24 pav.

2.8. Augalų energinė apykaita minimalios energinės apykaitos periodu

Augalų energinę apykaitą, kai augalo temperatūra mažesnė už jo aplinkos temperatūrą, nagrinėjome 2.4 skyriuje. Čia pateikiame tris būdingus augalo gyvenimo atvejus, kuriuos jis patiria minimalios energinės apykaitos periode. Nagrinėsime energinius procesus, kai augalo dalies temperatūra t_1 mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ($t_1 < t_0$). Ši augalo energinės apykaitos analizė padeda atskleisti, kaip ilgame evoliucijos kelyje augalas prisitaikė prie nepalankių aplinkos veiksnių.

Nagrinėjant augalo energinę apykaitą, kai $t_1 < t_0$, ypatingas vaidmuo tenka augalo efektyviajam šiluminiam spinduliavimui, kuris sukelia daugybę ciklinių ir stresinių situacijų augalo gyvenime. Nagrinėsime augalo lapo energinės apykaitos procesus (energinio balanso (2.37), (2.38), (2.39) lygtis), kai augalo temperatūra t_1 yra mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 , t. y. $t_1 < t_0$. Kai $t_1 < t_0$, teoriškai galimi trys augalo energinės apykaitos atvejai, kintant augalo aplinkos drėgmeniui:

$$t_1 < t_0, \quad x_1 > x_0; \quad (2.67)$$

$$t_1 < t_0, \quad x_1 = x_0; \quad (2.68)$$

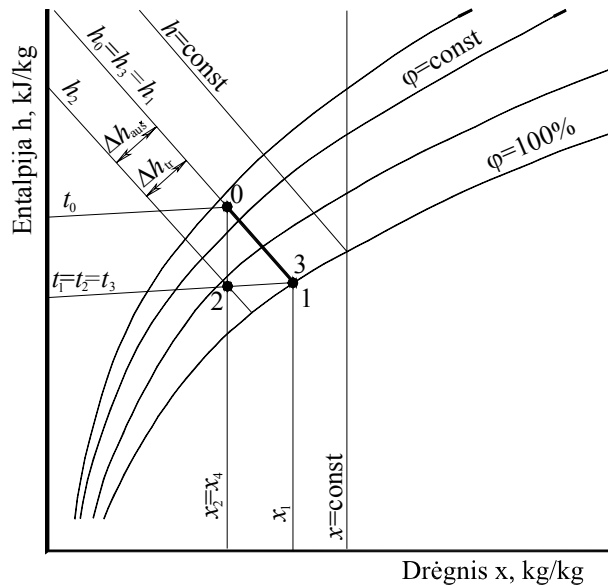
$$t_1 < t_0, \quad x_1 < x_0. \quad (2.69)$$

Aplinkos oro temperatūra t_0 didesnė už augalo temperatūrą t_1 ($t_0 > t_1$) pastebima minimalios energinės apykaitos atvejais, esant mažam efektyviajam šiluminiam spinduliavimui. Kaip esame aptarę (2.37), (2.38), (2.39), augalo lapo šiluminis spinduliavimas į aplinką gali būti mažesnis, lygus arba didesnis už aplinkos šiluminį spinduliavimą augalui. Nepriklausomai nuo šiluminio spinduliavimo krypties, dėka konvekcijos būdu

iš aplinkos gaunamos šilumos (nes $t_0 > t_1$) augalas visais atvejais vykdo transpiraciją. Efektyvusis šiluminis spinduliavimas tarp augalo ir aplinkos daro įtaką transpiracijai sunaudojamam energijos srautui. Priklausomai nuo efektyviojo šiluminio spinduliavimo srauto krypties iš esmės kinta augalo energinės apykaitos procesas.

Pirmąjį augalo minimalios energinės apykaitos atvejį (2.67) apibūdina šie aplinkos parametrai $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$. Priklausomai nuo transpiracijos procesui naudojamų energijos šaltinių (konvekciniai šilumos mainai, šiluminis spinduliavimas) galimi dar du skirtingi augalo energinės apykaitos atvejai. Tuo atveju, kai aplinką apibūdina temperatūros $t_1 < t_0$ ir drėgnio $x_1 > x_0$ parametrai (2.67), o augalas energiją transpiracijai gauna tik iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka, taikytina (2.9) energijų balanso lygtis $Q_3 = Q_2$. Tokiu efektyviojo šiluminio spinduliavimo atveju srautas keičia savo kryptį, jis lygus nuliui, t. y. $Q_1 = 0$. Transpiracijai sunaudojama visa energija, kurią augalas gauna iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka, t. y. $Q_2 = Q_2^{aus} = Q_3$. Transpiracijos procesas, kurio metu drėgmės garinimas vyksta tiktai aplinkos šilumos sąskaita, vadinamas adiabatiniu garinimo procesu. Vykstant tokiam energijų mainų procesui, dėl augalo išgarintos drėgmės aplink augalą nuosekliai didėja oro drėgnis. Nors augalo išgarinta drėgmė nuolat didina oro drėgnį aplink augalą, oro temperatūra mažėja, tačiau oro entalpija h išlieka pastovi. Todėl šis energijų mainų procesas 0–1 vadinamas izoentalpiniu ir h - x diagramoje vyksta tiesėje $h_0 = h_1 = const$ (2.25 pav.). Nagrinėjamoju atveju transpiruojančio augalo lapo temperatūra nusistovės ir bus lygi adiabatinio garavimo temperatūrai – šlapio termometro temperatūrai $t_1 = t_2 = t_3 = t_{sl}$. Nagrinėjamoju atveju, kai $Q_1 = 0$, o $Q_2 = Q_3$, žinodami aplinkos oro temperatūrą t_0 ir jo santykinį drėgnį φ , visada galime nustatyti augalo lapo temperatūrą naudodamiesi h - x diagrama. Ji lygi šlapio termometro temperatūrai $t_1 = t_{sl}$ (2.25 pav.).

Esant tokioms sąlygoms, kai $Q_1 = 0$, o $Q_2 = Q_3$, rasos iškritimas iš oro augalo paviršiuje negalimas, vyksta transpiracija, aplinkos oro temperatūra aukštesnė už transpiruojančio paviršiaus temperatūrą $t_0 > t_1$, o oro drėgnis lapo paviršiuje x_1 didesnis už aplinkos drėgnį x_0 .



2.25 pav. Augalo ir aplinkos energijų mainų schema $h-x$ diagramoje. Energija transpiracijai gaunama tikrai iš augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka $Q_1 = 0$, o $Q_2 = Q_3$ Augalo temperatūra žemesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$, o drėgnis $x_1 > x_0$

Transpiracijos skaičių S_k randame taip:

$$S_k = \frac{Q_3}{Q_2} = \frac{\Delta h_{tr}}{\Delta h_{aus}} = 1, \text{ nes } \Delta h_{aus} = \Delta h_{tr}. \quad (2.70)$$

Antrąjį augalo minimalios energinės apykaitos atvejį (2.68) apibūdina aplinkos parametrai $t_1 < t_0$, $x_1 > x_0$. Augalas energiją transpiracijai ir neigiamam efektyviajam augalo spinduliavimui į aplinką gauna iš konvekcinių šilumos mainų su aplinka. Šiuo atveju taikytina (2.8) energijų balanso lygtis $Q_3 = Q_2 - Q_1$.

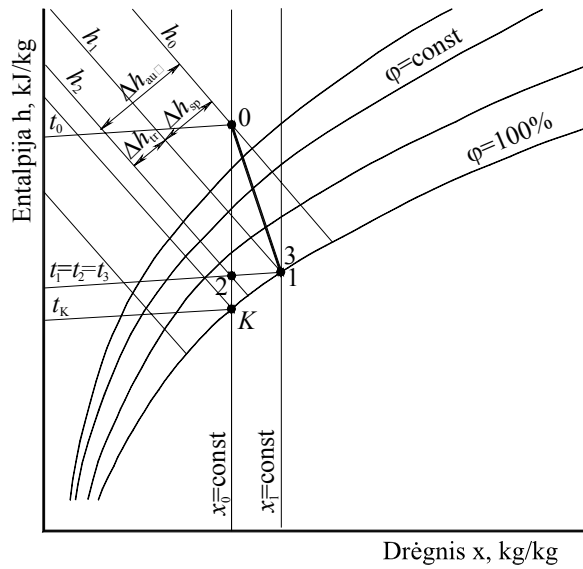
Šiuo augalo energijų apykaitos atveju augalo lapo temperatūra mažesnė už šlapio termometro oro temperatūrą t_{sl} . Augalo energijų mainų procesas 0–1 $h-x$ diagramoje bus žemiau linijos $h_0 = const$ (2.26 pav.). Augalo transpiracija labai maža, nes dalį šilumos, gautos iš aplinkos konvekcinių šilumos mainų būdu augalas išspinduliuoja į aplinką.

Didėjant augalo į aplinką išspinduliuojamai energijai, jo lapų temperatūra mažėja. Visiškai sumažėja transpiracijos intensyvumas. Transpiracijos skaičius S_k artėja prie 0. Didėjant išspinduliuojamai į aplinką energijai, $h-x$ diagramoje 1 taškas, judėdamas kreive $\varphi = 100\%$, artėja prie taško K , kuris atitinka oro drėgmės kondensacijos temperatūrą t_K . Taškas K atitinka pradinį rasos iškritimo augalo paviršiuje momentą. Augalo energijų balansas šiuo atveju bus išreikštas lygtimi:

$$Q_2^{aus} = Q_1 + Q_3. \quad (2.71)$$

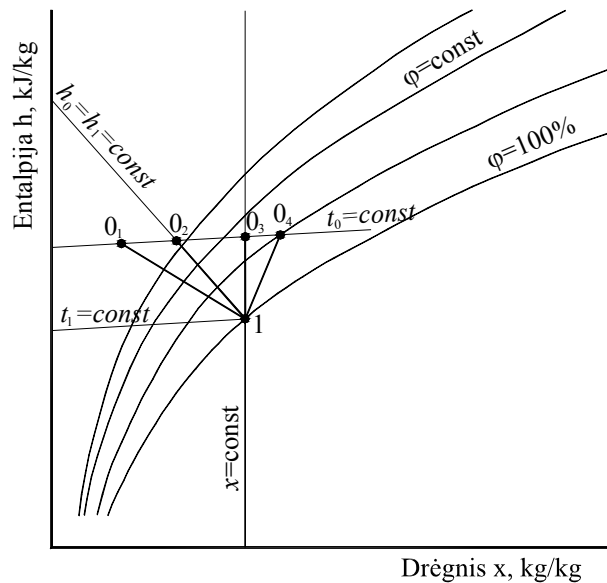
Transpiracijos skaičius S_k procese 0–1 (2.26 pav.), kol 1 taškas pasieks rasos tašką K , bus didesnis už 0 ir mažesnis už 1 ($0 < S_k < 1$).

Trečiąjį augalo minimalios energinės apykaitos atvejį (2.69) apibūdina jo aplinkos parametrai $t_1 < t_0$, $x_0 > x_1$. Šis energinės apykaitos atvejis išnagrinėtas 2.2.6 skyriuje. Tai procesai, vykstantys rasos iškritimo laikotarpiu.



2.26 pav. Augalo energijų mainų schema $h-x$ diagramoje, kai energiją transpiracijai ir neigiamam šiluminiam spinduliavimui augalas gauna iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka $t_1 < t_0$; $x_1 > x_0$

Visais atvejais, kai aplinkos oro temperatūra t_0 didesnė už augalo temperatūrą t_1 ($t_0 > t_1$), augalo energinės apykaitos procesai $h-x$ diagramoje yra aukščiau izotermos $t_1 = \text{const}$. Panagrinėkime augalo energinės apykaitos atvejus (kai $t_0 > t_1$), kai augalo ir aplinkos temperatūrų skirtumas yra pastovus $t_0 - t_1 = \text{const}$ (2.27 pav.). Aplinkos oro parametrai kinta tiesėje $t_0 = \text{const}$ kartu kintant santykiniam oro drėgniui. Aplinkos oro parametrai tiesėje $t_0 = \text{const}$ įgyja reikšmes $0_1, 0_2, 0_3, 0_4$, ir t. t. (2.27 pav.). Oro parametrams taškus 0_2 , ir 0_3 parenkame taip, kad jie atitiktų aukščiau aptartus būdingus pereinamuosius energinės apykaitos procesus. Trumpalaikiai pereinamieji energinės apykaitos procesai vyksta tuo momentu, kai vienas energijos šaltinis nedalyvauja. Tokie procesai 2.27 paveiksle yra 0_2-1 , kai $h = \text{const}$ ($Q_1 = 0$) ir 0_3-1 , kai $x = \text{const}$ ($Q_3 = 0$).



2.27 pav. Augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesų schema $h-x$ diagramoje, kintant santykiniam aplinkos oro drėgniui φ , kai $t_0 - t_1 = \text{const}$, $t_0 > t_1$

Nagrinėjant energinės apykaitos procesus $h-x$ diagramoje (2.27 pav.), kuomet didėja santykinis oro drėgnis φ , esant tai pačiai aplinkos temperatūrai $t_0 = \text{const}$ ir tam pačiam temperatūrų skirtumui ($t_1 - t_0$), au-

galo energijų mainų procesai su aplinka yra nevienodi. Juose iš esmės kinta transpiracijos skaičius S_x , rodantis energijų srauto pasiskirstymą tarp transpiracijos ir šilumos mainų su aplinka. Tai akivaizdžiai rodo augalo energinės apykaitos procesų 1-0₁, 1-0₂, 1-0₃, 1-0₄ tiesės $h-x$ diagramoje.

$h-x$ diagramos schemoje (2.27 pav.) pateiktas šiame skyriuje išnagrinėtų augalo aplinkoje vykstančių energinių procesų apibendrinimas. Schema apima visus nagrinėtus augalo energinės apykaitos atvejus, kai aplinkos temperatūra aukštesnė už augalo audinių temperatūrą $t_0 > t_1$, esant vienodam temperatūrų skirtumui $t_0 - t_1 = const$.

Augalo energijų apykaitos su aplinka procesai yra žemiau tiesės 1-0₂ ($t_0 > t_1, x_1 > x_0$), kai augalas energiją transpiracijai gauna iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka ir teigiamo aplinkos šiluminio spinduliavimo. Šie augalo energijų apykaitos procesai išnagrinėti $h-x$ diagramoje ir pateikti 2.15 ir 2.16 pav.

Augalo ir aplinkos energijų apykaitos procesai, kai $t_1 < t_0, x_1 > x_0$, esantys tarp tiesių 0₂-1 ($h = const, Q_1 = 0$) ir 0₃-1 ($x = const, Q_3 = 0$), vyksta, kai energiją transpiracijai ir neigiamam augalo šiluminiam spinduliavimui į aplinką augalas gauna iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka. Šie augalo energijų apykaitos procesai išnagrinėti $h-x$ diagramoje ir pateikti 2.26 pav.

Augalo energijų apykaitos su aplinka procesai, kai $t_1 < t_0, x_0 > x_1$, esantys tarp tiesių 0₃-1 ($x = const, Q_3 = 0$) ir 0₄-1, vyksta, kai augalo gaunama energija iš konvekcinų šilumos mainų su aplinka yra mažesnė už neigiamą augalo šiluminį spinduliavimą į aplinką. Ši energijos trūkumą papildo rasos iškritimas augalo paviršiuje. Šie augalo energijų apykaitos procesai išnagrinėti $h-x$ diagramoje ir pateikti 2.22 ir 2.23 pav.

Trumpalaikiai pereinamieji energinės apykaitos procesai 0₂-1, kai $h = const$ ($Q_1 = 0$) ir 0₃-1, kai $x = const$ ($Q_3 = 0$), kai vienas energijos šaltinis nedalyvauja, išnagrinėti $h-x$ diagramoje ir pateikti atitinkamai 2.25 ir 2.21 pav.

2.9. Augalų energinės apykaitos srautų analizė

Išnagrinėjome visus galimus augalų ir aplinkos energinės apykaitos atvejus priklausomai nuo šiame procese dalyvaujančių energijų srautų dydžio ir krypties. Buvo nustatyti termoenerginiai augalo aplinkos veiksniai, lemiantys augalo produktyvumo, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas. Nagrinėjimo pagrindas buvo augalo energijų balanso lygtis:

$$\sum Q = \pm Q_1 \pm Q_2 - Q_3 = 0. \quad (2.72)$$

Irodėme, kad augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesą galima grafiškai pateikti ir nagrinėti $h-x$ diagramoje. Vykstantiems energinės apykaitos procesams aprašyti galima naudoti fizikos dėsnius.

Išaiškinus bedimensinio santykio – transpiracijos skaičiaus S_k – fizinę prasmę ir jį panaudojus aprašyti ir įvertinti visais galimais augalo gyvenimo atvejais augalo aplinkoje vykstantys energinės apykaitos procesai. Nustatyta, kad augalo aplinka sudaro nedalomą sistemą *transpiruojantis augalo lapas* \Leftrightarrow *aplinkos oras*.

Panagrinėkime gautus duomenis ir juos apibendrinkime.

Augalų energinės apykaitos procesų (saulėtu paros metu), vykstančių tarp augalo ir aplinkos, kai augalo lapo temperatūra didesnė už aplinkos temperatūrą ($t_1 > t_0$), analizė (2.3 skyrius) rodo, kad galimas tik vienas energijų mainų augalo aplinkoje atvejis, kai $x_1 > x_0$. Saulėtu paros metu transpiruojančio augalo lapo ir aplinkos energinės apykaitos schema $h-x$ diagramoje pateikta 2.10 ir 2.13 pav. Transpiracijos skaičius S_k kinta $0 < S_k < +\infty$ ribose. Šiam atvejui transpiracijos skaičiaus S_k analizė pateikta 11 pav. Kiti du teoriškai galimi atvejai, kai $t_1 > t_0$, $x_1 = x_0$ ir $t_1 > t_0$, $x_1 < x_0$, gamtoje negali egzistuoti, nes prieštarauja drėgno oro termodinaminių procesų dėsniams.

Nagrinėjant augalų energinės apykaitos procesus, kai dalyvauja tikrai vienas temperatūros gradientas (2.6 skyrius) $t_0 > t_1$ arba $t_0 < t_1$, drėgmės gradiento ($x_1 = x_0 = \text{const}$) nėra, transpiracija nevyksta $Q_3 = 0$. Transpiracijos skaičius $S_k = 0$. Augalo energinės apykaitos su aplinka schema $h-x$ diagramoje, kai nėra drėgmės gradiento $x_1 = x_0 = \text{const}$, pateikta 2.21 ir 2.22 pav.

Nagrinėjant energinės apykaitos procesus augalo aplinkoje, kai dalyvauja tikrai vienas drėgno gradientas (2.5 skyrius) $x_1 > x_0$, o augalo ap-

linkos temperatūra $t_0 = t_1 = \text{const}$ lygi transpiruojančio augalo paviršiaus temperatūrai, transpiracijos skaičius $S_k = \pm \infty$. Augalo energinės apykaitos procesų su aplinka, kai nėra temperatūros gradiento $t_1 = t_0 = \text{const}$, schema $h-x$ diagramoje pateikta 2.18 pav. (kai $x_1 > x_0$), 2.19 pav. (kai $x_1 = x_0$) ir 2.20 pav. (kai $x_1 < x_0$).

Nagrinėdami energinės apykaitos procesus augalo aplinkoje minimalios energinės apykaitos sąlygomis (2.8 skyrius), kai augalo temperatūra yra žemesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$, nustatėme, kad priklausomai nuo transpiracijai naudojamos energijos rūšies galimi trys atvejai. Kai transpiracijai naudojama energija gaunama tik iš konvencinių šilumos mainų su augalo aplinka ($Q_2 = Q_2^{\text{aus}} = Q_3$), procesas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.25 pav., transpiracijos skaičius $S_k = 1$.

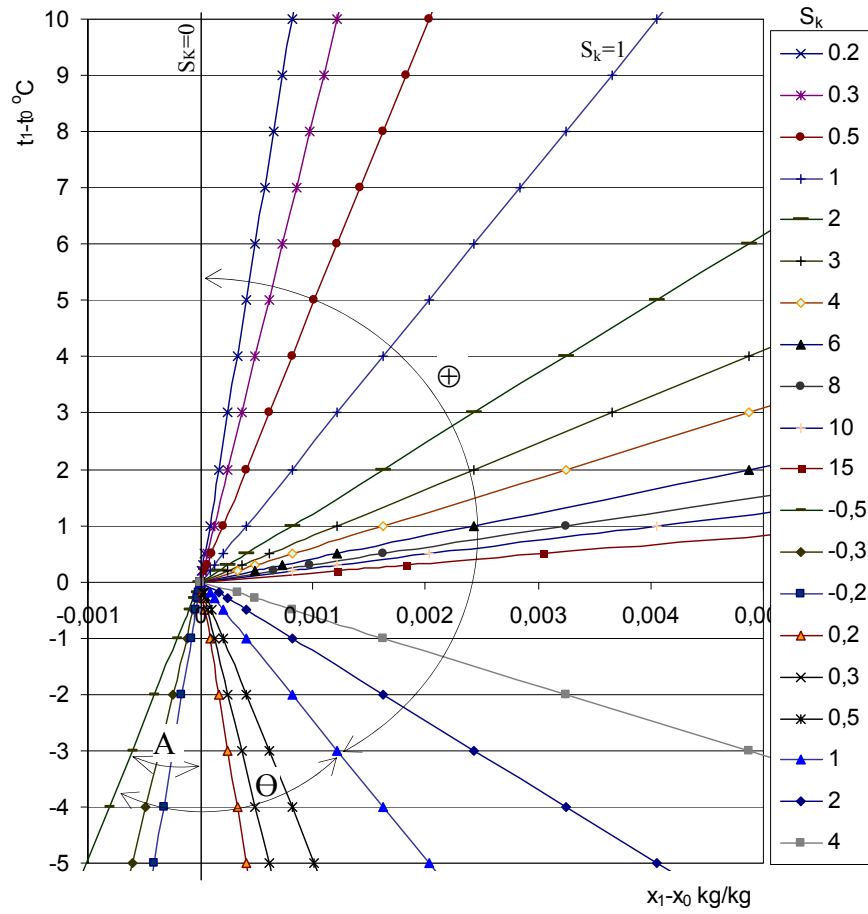
Jei energiją transpiracijos procesui ir neigiamam efektyviajam šiluminiam spinduliavimui augalas gauna iš konvencinių šilumos mainų su aplinka, transpiracijos skaičius visais atvejais bus mažesnis už 1 ir didesnis už 0 ($0 < S_k < 1$). Augalo energinės apykaitos procesas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.26 pav.

Jei energiją transpiracijos procesui augalo lapas gauna iš konvencinių šilumos mainų ir teigiamo efektyviojo šiluminio spinduliavimo (augalo temperatūra yra žemesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 < t_0$), transpiracijos skaičius S_k bus $1 < S_k < +\infty$ ribose. Augalo energinės apykaitos procesas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.16 pav.

Nagrinėdami energijos procesus augalo minimalios egzistencijos ir žūties sąlygomis (2.7 skyrius) matome, kad toks atvejis būna, kai augalo aplinkos sąlygos yra $t_1 < t_0$, $x_1 < x_0$. Šis atvejis pastebimas tada, kai augalo lapo gauta šiluma konvencinių šilumos mainų būdu iš aplinkos nepadengia augalo šiluminio spinduliavimo į aplinką. Tuomet šilumos trūkumą augalui dengia rasos iškritimas arba, radiacinės šalnos metu, ledo susidarymo šiluma. Šiuo atveju transpiracijos skaičius S_k didesnis kaip $-\infty$ ir mažesnis kaip 0 ($-\infty < S_k < 0$). Augalo energinės apykaitos procesas $h-x$ diagramoje pateiktas 2.23 pav.

Apibendrinami visus galimus ir aptartus augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesus, pasinaudodami 2.11, 2.17 ir 2.24 pav. pateiktais S_k skaičiaus kitimo duomenimis, 2.28 pav. pateikiame visiems galimiems augalo energinės apykaitos procesams jų transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybę nuo drėgnių ($x_1 - x_0$) ir temperatūrų ($t_1 - t_0$) skirtumų. Matome, kad augalo energetiką lydi adekvatus augalo fiziologinių proce-

sų atsakas. Augalų energinės apykaitos procesų rodiklius, lemiančius augalo produktyvumo, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas, apibendrintai pateikiame 2.3 lentelėje.



2.28 pav. Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro (t_0 , x_0) ir transpiruojančio lapo paviršiaus oro (t_1 , x_1) parametrų natūraliomis aplinkos sąlygomis. A – rasos iškritimo sritis. Θ ; \oplus – atitinkamai neigiamo ir teigiamo efektyviojo šiluminio spinduliavimo sritys

2.3 lentelė. Augalo aplinkoje vykstančių energinių procesų apibendrinamieji rodikliai

Augalo aplinkos parametrai	Augalų energinės apykaitos balanso nariai					augalo aplinkos procesų apibūdinimas
	spinduliuotė Q_1	šilumos mainai Q_2	transpiracija Q_3	transpiracijos skaičius S_k	procesas $h-x$ diagramoje	
$t_1 > t_0; x_1 > x_0$	$+ Q_1$	$- Q_2$	$+ Q_3$	$0 < S_k < \pm \infty$	9; 12	Procesai saulėtu paros metu
$t_1 > t_0; x_1 = x_0$	Tokios sąlygos natūralioje gamtoje negalimos					
$t_1 > t_0; x_1 < x_0$	Tokios sąlygos natūralioje gamtoje negalimos					
$t_1 = t_0; x_1 > x_0$	$+ Q_1$	$Q_2 = 0$	$+ Q_3$	$S_k = \pm \infty$	19	Tai momentinės sąlygos. Nėra temperatūros gradiento
$t_1 = t_0; x_1 = x_0$	$Q_1 = 0$	$Q_2 = 0$	$Q_3 = 0$	$S_k = 0$	20	Tai momentinės sąlygos. Nėra drėgnio ir temperatūros gradiento
$t_1 = t_0; x_1 < x_0$	$Q_1 = 0$	$Q_2 = 0$	$Q_3 = 0$	$S_k = 0$	21	Tokioms sąlygoms egzistuoti galimybė maža. Teoriškai šios sąlygos galimos rūke

2.3 lentelės tęsinys

Augalo aplinkos parametrai	Augalų energinės apykaitos balanso nariai					augalo aplinkos procesų apibūdinimas
	spinduliuotė Q_1	šilumos mainai Q_2	transpiracija Q_3	transpiracijos skaičius S_k	procesas $h-x$ diagramoje	
$t_1 < t_0; x_1 > x_0$	$+ Q_1$	$+ Q_2$	$+ Q_3$	$1 < S_k < \pm \infty$	15	Nekarštu, saulėtu dienos metu
$t_1 < t_0; x_1 > x_0$	$Q_1 = 0$	$+ Q_2$	$+ Q_3$	$S_k = 1$	24	Transpiracijai naudojama šiluma gauta iš šiltesnio aplinkos oro
$t_1 < t_0; x_1 > x_0$	$- Q_1$	$+ Q_2$	$+ Q_3$	$0 < S_k < 1$	25	Procesai vakaro, nakties laikotarpiu be rasos
$t_1 < t_0; x_1 = x_0$	$- Q_1$	$+ Q_2$	$Q_3 = 0$	$S_k = 0$	17,18	Momentas, kai transpiraciją keičia rasos iškritimo (išnykimo) procesas. Jei aplinkos temperatūra artima 0°C – perėjimo momentas į radiacinę šalną
$t_1 < t_0; x_1 < x_0$	$- Q_1$	$+ Q_2$	$Q_3 = 0$	$-\infty < S_k < 0$	22	Rasos iškritimo periodas. Temperatūra apie 0°C – radiacinė šalna

2.10. Augalų energinės apykaitos procesų analizė

Augalo energinės apykaitos procesai priklauso nuo augalo audinių temperatūros t_1 ir aplinkos parametrų: aplinkos temperatūros t_0 ir jos santykinio drėgnio φ_0 . Šių trijų parametrų, kurie keičia augalo energinę apykaitą su aplinka, kitimą galima pavaizduoti termodinaminiu paviršiumi. Gauname be galo daug augalo energinės apykaitos atvejų, kuriuos nagrinėti erdvinėje sistemoje sudėtinga.

Augalo energinę apykaitą vyksta tarp augalo paviršių ir jų aplinkos, todėl yra galimas augalo energinės apykaitos nagrinėjimas dviem atvejais:

1 *atvejis*. Kinta augalo lapo temperatūra t_1 . Augalo aplinkos oro temperatūra t_0 ir jo santykinis drėgnis φ_0 energinės apykaitos procesų metu išlieka pastovūs.

2 *atvejis*. Kinta oro temperatūra t_0 ir jo drėgnis φ_0 , įgydami įvairias parametrų reikšmes. Augalo lapo temperatūra t_1 energinės apykaitos procesų metu išlieka pastovi.

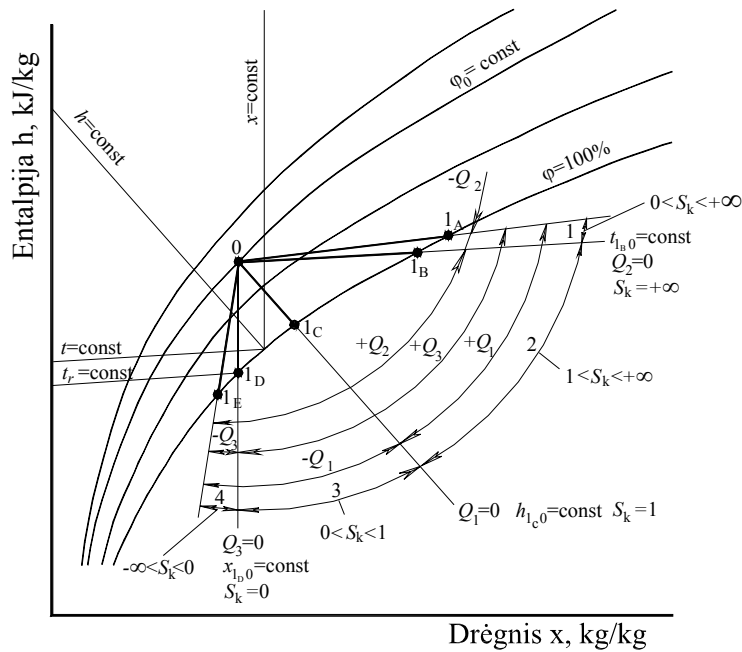
Visus galimus augalo energinės apykaitos termodinaminius procesus, vykstančius tarp augalo ir aplinkos, galime grafiškai pavaizduoti $h-x$ diagramoje. Siekdami apibendrinti augalo lapo ir aplinkos energinės apykaitos procesų visumą, panagrinėkime abu atvejus.

Abu nagrinėjamieji atvejai yra lygiaverčiai, skiriasi tik grafiniu vaizdu $h-x$ diagramoje. Augalo fiziologinis atsakas į bet kokius augalo ir aplinkos termodinaminių parametrų pokyčius pasireiškia augalo energinėje apykaitoje dalyvaujančių atskirų energijų rūšių srautų paskirstymu.

Pirmuoju atveju žinome oro temperatūros t_0 ir jo santykinio drėgnio φ_0 reikšmes, taip pat transpiruojančio augalo dalies paviršiaus temperatūros t_1 kitimo ribas. Pavaizduokime visus galimus augalo energinės apykaitos su aplinka procesus, kintant augalo temperatūrai, $h-x$ diagramoje (2.29 pav.).

Nagrinėjant augalo energinės apykaitos procesus, vykstančius natūraliomis lauko sąlygomis $h-x$ diagramoje, oro temperatūros $t_0 = \text{const}$ ir jo santykinio drėgnio $\varphi_0 = \text{const}$ linijų sankirtoje randame 0 tašką. Jis apibūdina *atsitiktinės*, laisvai pasirinktos nagrinėjamos aplinkos pastovius oro parametrus. Augalo lapo temperatūra t_1 kinta, todėl ji taip pat yra atsitiktinė. Todėl natūraliomis lauko sąlygomis turime daugybę augalo lapo ir aplinkos energinės apykaitos atvejų. Augalo lapo temperatūros

t_1 ir $\varphi = 100\%$ linijų sankirtoje esantis 1 taškas apibūdina augalo lapo paviršiaus oro parametrus (2.29 pav.). Priklausomai nuo transpiruojančio augalo lapo paviršiaus temperatūros t_1 , kurią lemia augalo ir aplinkos energinė apykaita, 1 taškas kreivėje $\varphi = 100\%$ gali įgyti įvairias padėtis – 1_A, 1_B, 1_C, 1_D, 1_E. Sujungę šiuos taškus su 0 tašku gauname tieses, jungiančias taškus 0–1_A, 0–1_B, 0–1_C, 0–1_D ir 0–1_E, vaizduojančias augalo energinės apykaitos procesus augalo aplinkoje nagrinėjamosiomis sąlygomis (2.29 pav.).



2.29 pav. Augalo lapo su aplinka energinės apykaitos procesai $h-x$ diagramoje: Q_1 , Q_2 , Q_3 – atitinkamai saulės energijos, konvekcinių šilumos mainų su aplinka ir transpiracijos energiniai srautai; S_k – transpiracijos skaičius ir jo kitimo ribos; 1, 2, 3, 4 – būdingų augalo energinės apykaitos procesų grupės

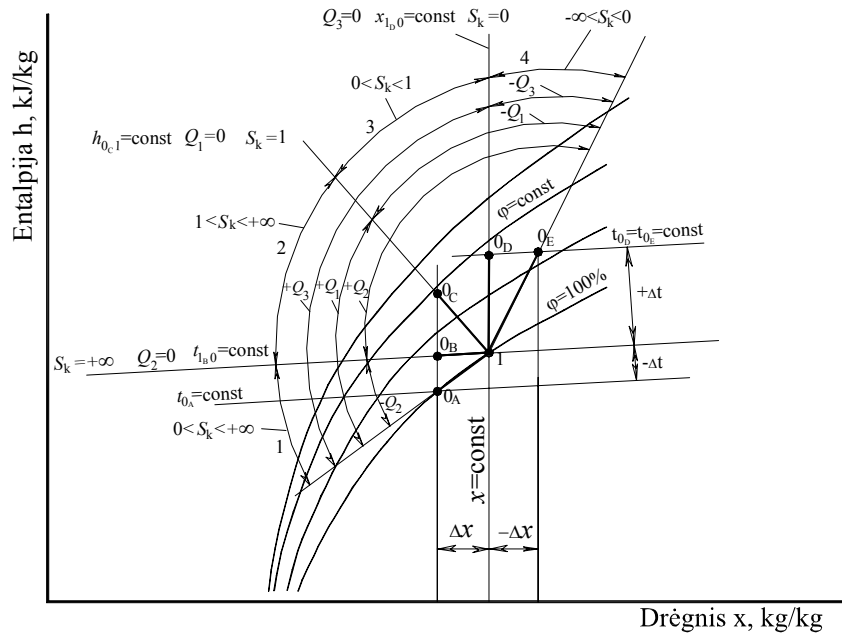
Antruoju atveju nagrinėjame galimus augalo energinės apykaitos procesus, esant laisvai pasirinktai augalo lapo temperatūrai t_1 , kuri nagrinėjamų procesų metu išlieka pastovi ($t_1 = \text{const}$). Augalo lapo temperatū-

ros t_1 ir $\varphi = 100\%$ linijų sankirtoje $h-x$ diagramoje gauname 1 tašką (2.30 pav.). Iš laisvai pasirinkto $h-x$ diagramoje 1 taško brėžiame bet kurią nagrinėjamą augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesą. Procesų nagrinėjimo metu augalo lapo temperatūra t_1 išlieka pastovi ($t_1 = const$). 1 taškas apibūdina augalo lapo paviršiaus parametrus. Aplinkos oro temperatūra t_0 ir jo santykinis drėgnis φ_0 kinta įgydami įvairias reikšmes.

Dėl kintančių aplinkos oro termodinaminių parametrų t_0 ir φ_0 susidaro be galo daug augalo ir aplinkos energinės apykaitos atvejų. Termodinamiškai nagrinėdami $h-x$ diagramoje šiuos procesus, vykstančius natūraliomis lauko sąlygomis, oro temperatūros $t_0 = const$ ir jo santykinio drėgnio $\varphi_0 = const$ linijų sankirtose randame taškus $0_A, 0_B, 0_C, 0_D, 0_E$. Jie apibūdina atsitiktinės, laisvai pasirinktos nagrinėjamos aplinkos oro parametrus.

Siekdami sugrupuoti augalo ir aplinkos energinės apykaitos procesus pagal energijų balanso rodiklius ir supaprastinti daugybės atvejų vaizdavimą $h-x$ diagramoje, per 1 tašką išvedame pagalbines tieses $t = const$, $h = const$, $x = const$. Laikome, kad laisvai pasirinkti termodinaminiai aplinkos oro parametrai, išsidėstę šiose atsitiktinėse tiesėse, įgyja įvairias padėtis $0_A, 0_B, 0_C, 0_D, 0_E$. Sujungę taškus $0_A, 0_B, 0_C, 0_D, 0_E$ su 1 tašku, gauname tieses, jungiančias taškus $1-0_A, 1-0_B, 1-0_C, 1-0_D$ ir $1-0_E$, vaizduojančias augalo aplinkoje vykstančius energinės apykaitos procesus nagrinėjamomis sąlygomis (2.30 pav.).

Grafiškai pavaizdavus $h-x$ diagramoje pirmąjį (2.29 pav.) ir antrąjį (2.30 pav.) nagrinėjamus atvejus, tolesnis augalo energinės apykaitos su aplinka procesų nagrinėjimas yra tapatus, žymima vienodai. Šių procesų grafinis vaizdas skiriasi tik dėl skirtingų pradinių duomenų, kurie aptarti apibūdinant nagrinėjamuosius atvejus.



2.30 pav. Augalo lapo ir aplinkos energinės apykaitos procesai $h-x$ diagramoje: Q_1 , Q_2 , Q_3 – atitinkamai saulės energijos, konvekcinų šilumos mainų su aplinka ir transpiracijos energiniai srautai; S_k – transpiracijos kriterijus ir jo kitimo ribos; 1, 2, 3, 4 – skirtingos augalo energinės apykaitos procesų grupės

Nagrinęjant $h-x$ diagramoje atskiras energijų rūšis, dalyvaujančias augalo energinės apykaitos procese, matome, kad saulės energija Q_1 augalo atžvilgiu gali būti neigiama arba teigiama, t. y. šią energiją augalas gauna iš aplinkos arba ją išspinduliuoja aplinkai ($-Q_1 \leq Q_{sp} \leq +Q_1$). Augalo konvekciniai šilumos mainai su aplinka Q_2 taip pat gali būti neigiami arba teigiami ($-Q_2 \leq Q_2 \leq +Q_2$), priklausomai nuo augalo ir aplinkos temperatūrų gradiento. Augalo šilumos srautas vandens garo pavidalu Q_3 visais atvejais nukreiptas į aplinką. Augalo transpiracija visuomet eikvoja šilumos pavidalo energiją, todėl šilumos srautas transpiracijai visuomet yra neigiamas. Rasos išskritimo metu augalas gauna oro drėgmės išskiriamą kondensacijos šilumą. Tai įvertinę (2.2) energijų balanso lygtį galime sudaryti taip:

$$\Sigma Q = \pm Q_1 \pm Q_2 - Q_3 = 0 \quad (2.73)$$

arba

$$Q_3 = \pm Q_1 \pm Q_2. \quad (2.74)$$

Iš daugybės galimų augalo energinės apykaitos procesų procesai $0-1_A$ ($1-0_A$), $0-1_B$ ($1-0_B$), $0-1_C$ ($1-0_C$), $0-1_D$ ($1-0_D$) ir $0-1_E$ ($1-0_E$) būdingi tuo, kad jie rodo trumpalaikius pereinamuosius augalo energinės apykaitos procesus (2.29 ir 2.30 pav.). Trumpalaikiai pereinamieji augalo energinės apykaitos procesai būdingi tuo, kad vienas iš augalo energijos šaltinių keičia srauto kryptį. Juos $h-x$ diagramoje rodo viena iš augalo energinės apykaitos procesų apibūdinančių tiesių: $t = const$ (tiesė $0-1_B$ arba $1-0_B$), $x = const$ (tiesė $0-1_C$ arba $1-0_C$), $x = const$ (tiesė $0-1_D$ arba $1-0_D$) (2.29 ir 2.30 pav.).

Augalo energinės apykaitos procese $0-1_B$ ($1-0_B$) ($t = const$) nedalyvauja konvekciniai šilumos mainai. $Q_2 = 0$. Augalo temperatūra t_1 lygi augalo aplinkos t_0 temperatūrai, $t_1 = t_0$. Tai momentas, kai augalo energinės apykaitos procese pakinta augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka srauto kryptis. Augalo energijų balanso narys Q_2 iš teigiamo virsta neigiamu arba atvirkščiai.

Energinės apykaitos procese $0-1_C$ ($1-0_C$) ($h = const$) nedalyvauja augalo energinė apykaita spinduliavimo būdu. $Q_1 = 0$. Šiuo momentu augalo energinės apykaitos spinduliavimu srautas keičia savo kryptį. Augalo energijų balanso narys Q_1 iš teigiamo virsta neigiamu arba atvirkščiai.

Energinės apykaitos procese $0-1_D$ ($1-0_D$) ($x = const$) nedalyvauja transpiracija. $Q_3 = 0$. Tai momentas, kai transpiracijos procesą keičia rasos iškritimo arba jos išnykimo procesas.

Priklausomai nuo augalo energijų srautų Q_1 , Q_2 ir Q_3 dydžio ir krypties turime 7 augalo ir aplinkos energinės apykaitos atvejus. Augalo energinės apykaitos atvejai $Q_1 = 0$, $Q_2 = 0$, $Q_3 = 0$ (atitinkamai $h = const$, $t = const$, $x = const$), kai vienas augalo energinės apykaitos šaltinis apykaitoje nedalyvauja, visus galimus procesus padalijo į keturias procesų grupes, apibūdinančias būdingus augalo energinės apykaitos su aplinka periodus -1, 2, 3, 4 (2.29 ir 2.30 pav.). Kiekvieną augalo gyvenimo periodą energinės apykaitos požiūriu apibūdina skirtinga energijų balanso lygtis.

Trys atvejai $1-0_B$ ($0-1_B$), $1-0_C$ ($0-1_C$) $1-0_D$ ($0-1_D$) yra ribiniai ir apibūdina trumpalaikius pereinamuosius energinės apykaitos procesus, kai vienas energijos šaltinis augalo lapo energinės apykaitos procese nedalyvauja $Q_1 = 0$, $Q_2 = 0$ arba $Q_3 = 0$. Šie procesai pasižymi atitinkamo energijos šaltinio teikiamos energijos srauto krypties keitimu, t. y. parodo momentą, kai nagrinėjamas energijos šaltinis iš teigiamo tampa neigiamu arba atvirkščiai (2.29 ir 2.30 pav.).

Augalo lapo 1 energinės apykaitos procesų periodui (2.29 ir 2.30 pav.) priklauso procesai, kai augalo lapo temperatūra yra didesnė už aplinkos temperatūrą $t_1 > t_0$. Šis augalo lapo energinės apykaitos procesų periodas apibūdinamas tokia energijų balanso lygtimi:

$$Q_3 = Q_1 - Q_2. \quad (2.75)$$

Pirmame augalo energinės apykaitos procesų periode, kuris yra tarp procesų $0-1_A$ ir $0-1_B$ (2.29 pav.), $1-0_A$ ir $1-0_B$ (2.30 pav.), saulės energijos kiekis yra pakankamas. Augalo lapas dalį gautos šilumos pavidalo saulės energijos atiduoda aplinkai konvekcinį šilumos mainų būdu. Tai saulėto, karšto paros meto augalo lapo energinės apykaitos procesų periodas, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra didesnė už aplinkos temperatūrą t_0 . Didesnė augalo lapo temperatūra už aplinkos temperatūrą pastebima ir tais atvejais, kai augalo lapas, gaudamas šilumos perteklių, didina audinių temperatūrą (artėdamas prie asimiliacijai optimalios) arba, stokodamas drėgmės, mažina transpiraciją didindamas šilumos pertekliaus atidavimą aplinkai konvekcinį šilumos mainų būdu. Tai periodas, kai saulės energijos perteklius sukelia augalo audinių temperatūros didėjimą. Transpiracijos skaičius S_k šiame periode kinta $0 < S_k < +\infty$ ribose, esant neigiamam temperatūros gradientui.

Antrajam energinės apykaitos procesų periodui priklauso procesai, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 . Šis periodas yra tarp entalpijos $h_{1C0} = const$ (tiesė $0-1_C$ arba $1-0_C$) ir izo-termos $t_{1B0} = const$ (tiesė $0-1_B$ arba $1-0_B$) (2.29 ir 2.30 pav.). Ši augalo lapo energinės apykaitos periodą apibūdina tokia energijų balanso lygtis:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2. \quad (2.76)$$

Antrojo augalo energinės apykaitos periodo procesų metu transpiracijai sunaudojama visa augalo lapo gaunama saulės energija Q_1 , taip pat šiluma, gaunama iš aplinkos konvekcinį šilumos mainų būdu Q_2 . Tai ryto, pavakario arba nesaulėto paros meto augalo lapo energinės apykaitos procesai, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 . Tai augalo energinės apykaitos procesų periodas, kai augalo lapas transpiracijos procesui maksimaliai panaudoja visus galimus energinius išteklius. Transpiracijos skaičius S_k kinta $1 < S_k < +\infty$ ribose, esant teigiamam temperatūros gradientui.

Trečiajam augalo lapo energinės apykaitos procesų periodui priklauso procesai, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už augalo aplinkos temperatūrą t_0 . Šis augalo energinės apykaitos procesų periodas yra tarp entalpijos $h_{1C0} = const$ ir drėgnio $x_0 = const$. Tai augalo energinės apykaitos procesai, esantys tarp ribinių procesų $0-C$ ($1-0_C$) ir $0-1_D$ ($1-0_D$) (2.29 ir 2.30 pav.). Šis augalo lapo energinės apykaitos periodas apibūdinamas tokia energijų balanso lygtimi:

$$Q_3 = Q_2 - Q_1. \quad (2.77)$$

Trečiojo augalo energinės apykaitos procesų periodo metu transpiracijai ir augalo lapo spinduliavimui į aplinką sunaudojama visa šiluma, augalo lapo gaunama iš konvekcinį šilumos mainų su aplinka. Tai giedro ankstyvo ryto, vakaro arba nakties meto augalo lapo energinės apykaitos procesai. Augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 . Tai minimalios augalo energinės apykaitos procesų periodas, kai augalo lape vyksta minimali transpiracija. Transpiracijos skaičius S_k kinta $0 < S_k < 1$ ribose, esant teigiamam temperatūros gradientui.

Trečiojo augalo energinės apykaitos procesų periodo metu augalo lapo konveciniai šilumos mainai su šiltesniu aplinkos oru turi tenkinti augalo lapo energinės apykaitos poreikius. Didėjant augalo lapo šiluminiam spinduliavimui į aplinką, jo temperatūra mažėja ir taške 1_D pasiekia rasos taško temperatūrą t_{1D} . Vakare augalui pasiekus rasos taško temperatūrą t_{1D} , transpiracijos procesas nutrūksta, augalo lapo paviršiuje pradeda susidaryti rasa (2.29 pav.). Šiuo augalo energinės apykaitos procesų metu augalo energijų balansą galima išreikšti tokia lygtimi:

$$Q_3 = 0, \quad Q_2 < Q_1. \quad (2.78)$$

Augalo temperatūra mažėja. Augalui pasiekus rasos taško temperatūrą, rasos susidarymas augalo lapo paviršiuje papildo energijų balansą vandens garo kondensacijos šiluma, augalas patenka į ketvirtąjį energinės apykaitos procesų periodą.

Ketvirtajam augalo lapo energinės apykaitos procesų periodui priklauso procesai, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ir už rasos taško temperatūrą. Tai augalo energinės apykaitos procesai, esantys tarp tiesių $0-1_D$ ($1-0_D$) ir $0-1_E$ ($1-0_E$) (2.29 ir 2.30 pav.).

Ketvirtajam augalo lapo energinės apykaitos procesų periodui priklauso rasos susidarymo augalo lapo paviršiuje arba radiacinės šalnos procesai. Transpiracijos skaičius S_k kinta $-\infty < S_k < 0$ ribose, esant neigiamam temperatūros gradientui.

Ketvirtojo augalo energinės apykaitos periodo procesų metu augalo lapo temperatūra yra mažesnė už augalo aplinkos t_r rasos taško 1_D temperatūrą (2.29 pav.). Radiacinė šalna gali pasireikšti esant teigiamai aplinkos temperatūrai, kai rasos taško temperatūra taške 1_D yra artima $2-3$ °C. Rasos iškritimo (2489 kJ/kg, esant 5 °C) ir ledo susidarymo (330 kJ/kg) procesas radiacinės šalnos periodu augalui teikia labai daug šilumos, kurią jis sunaudoja šiluminio spinduliavimo nuostoliams į aplinką padengti.

Šio augalo energinės apykaitos periodo procesų metu augalo energijų balansą galime išreikšti tokia lygtimi:

$$Q_3 = 0, \quad \pm Q_1 = \pm Q_2 \pm Q_{2k}, \quad (2.79)$$

čia Q_1 – atitinkamai augalo absorbuojamas arba išspinduliuojamas energijos srautas, J/s;

Q_{2k} – šilumos srautas (augalo gautas arba atiduotas aplinkai), kurį sukelia rasos iškritimo arba garavimo procesas, o radiacinės šalnos metu – ledo susidarymo arba tirpimo procesas, J/s;

Q_2 – atitinkamai šilumos srautas, atiduodamas arba gaunamas iš aplinkos konvekciniiais šilumos mainais, J/s.

Pateikta analizė atskleidžia aplinkoje vykstančių augalo energinės apykaitos procesų dėsningumus, kuriais remiantis galima šiuos procesus suskirstyti pagal būdingus augalui energinės apykaitos periodus, pavaizduoti grafiškai $h-x$ diagramoje ir juos termodinamiškai išnagrinėti.

Vertinant augalo energinės apykaitos nagrinėjimą abiem lygiavertiais atvejais, kurie pateikti 2.29 ir 2.30 pav., tenka pastebėti, kad 1 atvejis (kai kinta augalo lapo temperatūra t_1 , o aplinkos oro temperatūra t_0 ir jo santykinis drėgnis φ_0 energinės apykaitos procesų metu išlieka pastovūs) yra patogesnis ir vaizdingesnis. Šis atvejis visiškai atitinka anksčiau nagrinėtus realius procesus $h-x$ diagramoje ir jų analizės principus. Tačiau antrojo atvejo sujungimas su pirmuoju leido pateikti apibendrintą augalų energinės apykaitos procesų diagramą.

2.11. Augalų energinės apykaitos procesų diagrama

Nustatę transpiracijos skaičiaus S_k fizinę išraišką ir panaudoję augalo energinės apykaitos analizei, galėjome įvertinti augalo aplinkoje vykstančius energinius procesus visais augalo gyvenimo atvejais. 2.29 ir 2.30 paveikslai, taip pat 2.3 lentelės duomenys rodo, kad S_k per parą kitimo ribos gali būti labai plačios $-\infty < S_k < +\infty$. Tai rodo didžiulį augalo energinės apykaitos procesų labilumą prisitaikant prie aplinkos sąlygų.

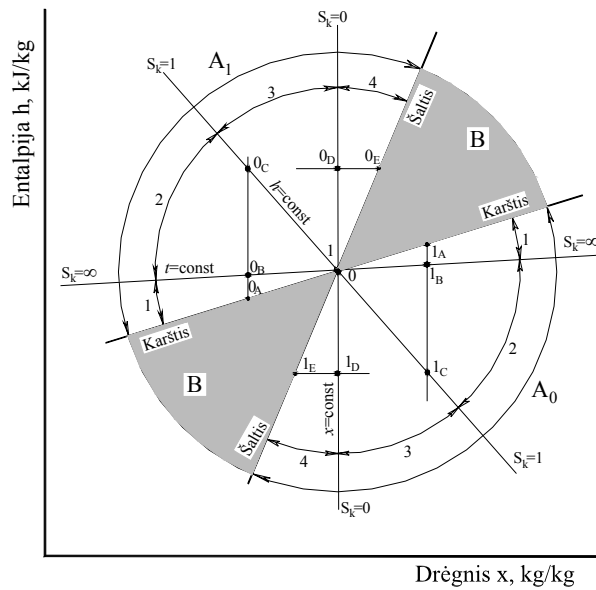
Visų augalo aplinkoje vykstančių galimų augalo energijų apykaitos procesų termodinaminė analizė $h-x$ diagramoje (2.10 skyrius) rodo, kad šie procesai išsidėstę dėsningai, nuosekliai kintant transpiracijos skaičiui S_k nuo $-\infty$ iki $+\infty$. Visus augalo energinės apykaitos procesus apibūdina augalo energijų balanso lygtys, išnagrinėtos 2.2 ir 2.10 skyriuose. Šiuose skyriuose pateikti visų galimų 7 augalo energinės apykaitos procesų atvejų energijų balansai. Analizuojant augalo energinės apykaitos procesus $h-x$ diagramoje (2.29 ir 2.30 pav.), aptarti visi galimi 4 augalų energinės apykaitos su aplinka periodai ir jų kitimo ribos.

Vienu metu nagrinėjant augalo energijų apykaitos procesus esant kintamai augalo lapo temperatūrai t_1 , ir kintamiems aplinkos oro parametrams t_0 ir φ_0 , neįmanoma modeliuoti augalo energijų apykaitos procesų ir aiškintis jų kitimo dėsningumus. Augalo energinės apykaitos procesų analizės duomenis iš 2.29 ir 2.30 pav., be jokių pakeitimų sukeliame į vieną 2.31 pav., palikdami tuos pačius 2.29 ir 2.30 pav. žymėjimus. Nekintamų parametrų 0 ir 1 taškus sutapatiname, per juos išvedame trumpalaikių pereinamųjų augalo energinės apykaitos procesų tieses, kai $t = const$ (tiesės 1-0_B ir 0-1_B), $h = const$ (tiesės 1-0_C ir 0-1_C), $x = const$ (tiesės 1-0_D ir 0-1_D).

Trumpalaikiai pereinamieji procesai vyksta tuo momentu, kai skirtingų energijos rūšių (saulės energijos, transpiracijos, konvekcinių šilumos mainų) augalų energinės apykaitos procesai augalo aplinkoje keičia srauto kryptį. Ši momentą parodo transpiracijos kriterijus S_k , kuris įgyja ribines reikšmes.

Kai transpiracijos skaičius $S_k = 0$ ($x = const$), transpiracija nevyksta. Energijos sąnaudos transpiracijai $Q_3 = 0$. Tai momentas, kai transpiracijos procesą keičia rasos iškritimo arba jos išnykimo procesas.

Kai transpiracijos skaičius $S_k = \pm \infty$ ($t = const$), konveciniai šilumos mainai tarp augalo ir aplinkos nevyksta, t. y. $Q_2 = 0$. Šiuo momentu augalo temperatūra t_1 lygi aplinkos temperatūrai t_0 . Tarp augalo ir jo aplinkos nėra temperatūrų skirtumo $\Delta t = 0$. Tai momentas, kai temperatūros gradientas gali keisti savo kryptį.



2.31 pav. Augalo lapo ir aplinkos energinės apykaitos procesų diagrama. Koordinatinių sistema (energinės apykaitos procesų kryptys) atitinka drėgno oro $h-x$ diagramą

Kai transpiracijos skaičius $S_k = 1$ ($h = const$), augalo energinė apykaita spinduliavimo būdu nevyksta, t. y. $Q_1 = 0$. Kiek augalas gauna

saulės energijos iš aplinkos, tiek jos atiduoda aplinkai. Tai momentas, kai augalo energinė apykaita spinduliavimu gali keisti savo kryptį.

Augalo lapo ir jo aplinkos energinės apykaitos procesų suvestinėje schemoje (2.31 pav.) pažymime procesus tiesėmis $0-1_A$ ir $1-0_A$. Gauname pirmąjį augalo energinės apykaitos procesų periodą iki $0-1_B$ ir $(1-0_B)$. Tai periodas, kai augalas pakankamai gauna saulės energijos, o kai kuriais atvejais kovoja su jos pertekliumi. Transpiracijos skaičiaus S_k kinta $0 < S_k < +\infty$ ribose, esant neigiamam temperatūros gradientui.

Augalo lapo su aplinka energinės apykaitos procesų suvestinėje schemoje (2.31 pav.) pažymime procesus $0-1_E$ ir $1-0_E$. Gauname ketvirtąjį augalo energinės apykaitos procesų periodą iki $0-1_D$ ($1-0_D$). Jam priklauso rasos augalo lapo paviršiuje susidarymo arba radiacinės šalnos procesai. Jie vyksta, kai augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 ir už rasos taško temperatūrą. Rasos susidarymas augalo lapo paviršiuje yra natūralus augalo energinės apykaitos procesas. Jei jis vyksta esant žemoms arba neigiamoms temperatūroms, augalui gali būti letalus. Transpiracijos skaičius S_k kinta $-\infty < S_k < 0$ ribose, esant teigiamam temperatūros gradientui.

Remiantis 2.31 pav. duomenimis galima teigti, kad nepriklausomai nuo parametrų kitimo, augalo energijų apykaitos procesas $h-x$ koordinatų sistemoje išlaiko būdingą kryptį ir jį galima priskirti atitinkamam augalo energinės apykaitos periodui. Visi procesai priskiriami A arba B periodams. Augalo energinės apykaitos procesų A periodui priklauso procesai, prie kurių augalai, praėję ilgą evoliucijos kelią, maksimaliai prisitaikė. Augalo energinės apykaitos procesai, vykstantys B periode, augalui gali sukelti letalų procesą. B periode augalas negali ilgai vykdyti gyvybinių funkcijų. Tai nepalankių augalui energijų apykaitos procesų periodas. Prie šios energinės apykaitos periodo parametrų augalas ilgame vystymosi periode neprisitaikė. Šie procesai gali būti panaudoti augalų energiniam sunaikinimui. Teoriniai ir taikomieji piktžolių terminio naikinimo pasėliuose klausimai nagrinėjami mūsų darbuose, skirtuose augalo energinei apykaitai aukštatemperatūroje aplinkoje.

Kompleksiškai nagrinėjant visus galimus termodinaminius energinės apykaitos procesus, vykstančius tarp augalo ir jo aplinkos, reikia juos grafiškai pavaizduoti $h-x$ diagramoje. Energiniai procesai natūraliomis aplinkos sąlygomis augale vyksta nenutrūkstamai. Šių procesų įvairovė yra augalo energinės apykaitos fiziologinis atsakas į bet kokius aplinkos termodinaminių parametrų pokyčius.

Nagrinėjant augalo energinės apykaitos procesus paaiškėjo, kad augalo fiziologinis reguliacinis mechanizmas (augale vykstantys fiziologiniai procesai) reaguoja į augalo aplinkos termodinaminių parametru kitimą ir pasireiškia energijų srautų paskirstymu tarp skirtingų energijos rūšių (saulės energijos, transpiracijos, konvekcinių šilumos mainų ir kai kuriais atvejais – bioenergetinių procesų). Visa tai parodo transpiracijos skaičius S_k , kuris yra apibūdinamas augalo aplinkos termodinaminiais parametrais $S_k = f(t_0, t_1, \varphi_0)$, ir aprašomas (2.25) ir (2.56) lygtimis. Transpiracijos skaičius S_k yra pagrindinis rodiklis, leidžiantis nustatyti ryšį tarp augalo transpiracijos ir jo aplinkos parametru. $S_k = f(t_0, t_1, \varphi_0)$.

3 Transpiracijos proceso energetika

Bet kuris gyvas organizmas, taip pat ir augalas, paklūsta gamtos dėsniams. Augalas dalį absorbuotos saulės energijos transformuoja į chemines jungtis, tiesiogiai panaudoja organinei medžiagai kurti ir kaupia augalo audiniuose. Natūraliomis sąlygomis organinei medžiagai kurti augalas panaudoja tik 2–4 % absorbuotos saulės energijos. Visa kita saulės energijos dalis (98–96 %) augalo lape virsta šiluma. Augalo lapo masė maža, todėl maži jo sukauptos šilumos kiekiai sukelia ryškius augalo audinių temperatūros pokyčius. Augalas, kovodamas su didėjančia audinių temperatūra, sukauptą saulės energiją, virtusią šiluma, tuoj pat atiduoda augalo aplinkai transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų būdu. Augalo lapas yra dinaminės energinės apykaitos būsenos ir išlaiko energinį balansą tarp gaunamos, kaupiamos ir atiduodamos aplinkai energijos. Saulėtu paros metu augalo lapo temperatūra yra nuolat kintamos energijų balanso būsenos. Kuo lapas plonesnis, kuo mažesnės jo termoakumuliacinės galimybės, tuo lapo temperatūros kaita didesnė.

Augalo transpiracija plačiai nagrinėjama aptariant transpiracijos procesui įtaką darančius veiksnius: procesus, vykstančius augalo lapo žiotelėse, fotosintezę, vandens patekimą į augalą, vandens režimo fiziologiją, dirvą ir mineralinę mitybą, metabolitų šalinimo procesus ir kt. Tai labai svarbūs veiksniai, darantys įtaką augalo gyvybinėms funkcijoms ir jo produktyvumui. Jie svarbūs ir augalo transpiracijos procesui, tačiau nėra lemiantys. *Transpiracijos procesas nevyks, jei nebus tam energijos.*

Augalo transpiracija – sudėtingas fiziologinis termofizikinis procesas. Jis susideda iš dviejų atskirų procesų. Pirmojo proceso metu augalo sultys kapiliarais juda iki garinančio paviršiaus (fiziologinis procesas), o antrojo metu vanduo išgarinamas į aplinką (termofizikinis procesas). Todėl transpiracijos procesas kartu yra ir augalo ir aplinkos energinės apykaitos (energijos ir drėgmės mainų su aplinka termodinaminis) procesas, kuriam galioja termofizikos dėsniai.

Augalas per ilgą vystymosi periodą prisitaikė prie augavietės fizinės aplinkos (taip pat ir energinės) veiksnių, tam panaudodamas tam tikrus fiziologinius procesus. Todėl transpiracijos proceso energetikos pokyčiai neatskiriami nuo adekvataus augalo fiziologinių procesų atsako. Augalo fiziologinė būseną adekvačiai įvertina esamą energinės apykaitos atvejį su aplinka ir optimaliai paskirsto energijų srautus tarp skirtingų energijos rūšių (saulės energijos, vandens garavimo, konvekcinių šilumos mainų ir kai kuriais atvejais – biologinės).

Laikoma, kad pagrindinis drėgmės pašalinimo iš lapo būdas yra žiotelinė transpiracija. Lapą dengia vaško sluoksnis ir kiti epidermio dariniai. Užsivėrus žiotelėms lapas gali garinti vandenį pro kutikuloje esančius kanalėlius. Žiotelių varstymasis priklauso nuo saulės spinduliuotės intensyvumo, aplinkos temperatūros ir drėgnio, augalo aprūpinimo drėgme ir kitų energinių fiziologinių veiksnių.

Nagrinėdami augalo energinę apykaitą remiamės augalo energijų balansu, kuris teigia, kad absorbuotą saulės energiją (96–98 %) augalas atiduoda aplinkai šilumos ir vandens garo pavidalu.

Natūraliomis aplinkos sąlygomis apatinėje lapo pusėje vyksta transpiracija ir šilumos mainai su aplinka, o viršutinėje pusėje – konvekciniai šilumos mainai. Kutikulinė transpiracija būna labai maža arba visiškai nevyksta. Esant tokioms sąlygoms augalo lapo energijos balanso lygtis (2.2) ir (2.3) galima sudaryti taip:

$$abQ_{sp} = aQ_1 = Q_2^{virš} + Q_2^{ap} + Q_3 \quad (3.1)$$

arba

$$abq_{sp} = aq_1 = q_2^{virš} + q_2^{ap} + q_3, \quad (3.2)$$

čia $Q_2^{virš}$, Q_2^{ap} – šilumos kiekis, atiduodamas aplinkai konvekcinių mainų būdu, atitinkamai viršutinės arba apatinės lapo pusės, J/s, arba šilumos srauto tankis, $q_2^{virš}$, q_2^{ap} J/(s·m²).

Nagrinėjamoju atveju abi lapo pusės (apatinė ir viršutinė) praktiškai turi vienodas aplinkos sąlygas vykdyti konvekcinius šilumos mainus (saulės spindulius lapas sugeria per visą storį). Tokiu atveju lapo viršutinės ir apatinės pusių didesnio temperatūrų skirtumo nebūna. Rem-

damiesi šiuo teiginiu ir naudodamiesi (2.20) arba (2.42) lygtimis galime sudaryti tokias lygtis:

$$Q_2^{virš} = Q_2^{ap}; \quad (3.3)$$

$$Q_2^{virš} + Q_2^{ap} = 2Q_{2min}. \quad (3.4)$$

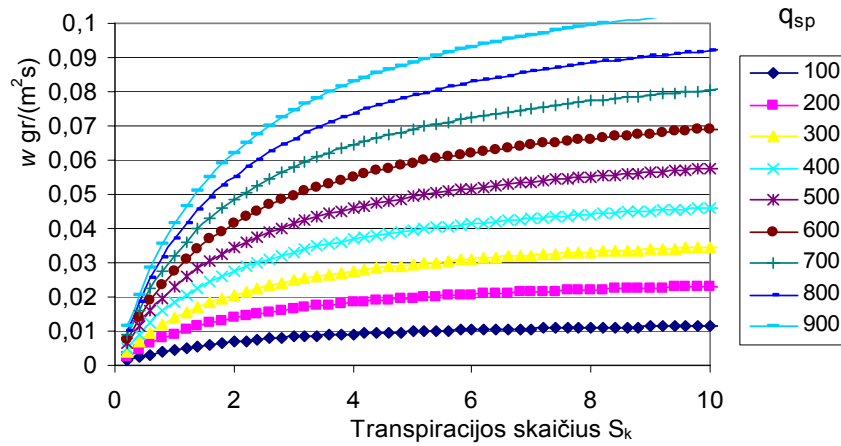
Naudodamiesi (2.25) arba (2.56) lygtimis transpiracijos skaičiui S_k apskaičiuoti, (3.1) lygtį galime perrašyti taip:

$$aQ_1 = \left(\frac{2}{S_k} + 1 \right) Q_3. \quad (3.5)$$

Irašę $Q_3 = wr$ išraišką iš (2.22) lygties, gauname lygtį transpiracijos intensyvumui apskaičiuoti:

$$w = \frac{aq_1}{\left(\frac{2}{S_k} + 1 \right) r} = \frac{abq_{sp}}{\left(\frac{2}{S_k} + 1 \right) r}. \quad (3.6)$$

Transpiracijos intensyvumui nustatyti (3.6) lygtį naudojame tais atvejais, kai vandenį garina viena lapo pusė, kartu dalyvaudama konvekciniuose šilumos mainuose, kita lapo pusė dalyvauja tik konvekciniuose šilumos mainuose su aplinka. Šiam atvejui 3.1 pav. pateikiame transpiracijos w intensyvumo priklausomybę nuo transpiracijos skaičiaus S_k , esant tam tikrai saulės integralinei spinduliutei q_{sp} .

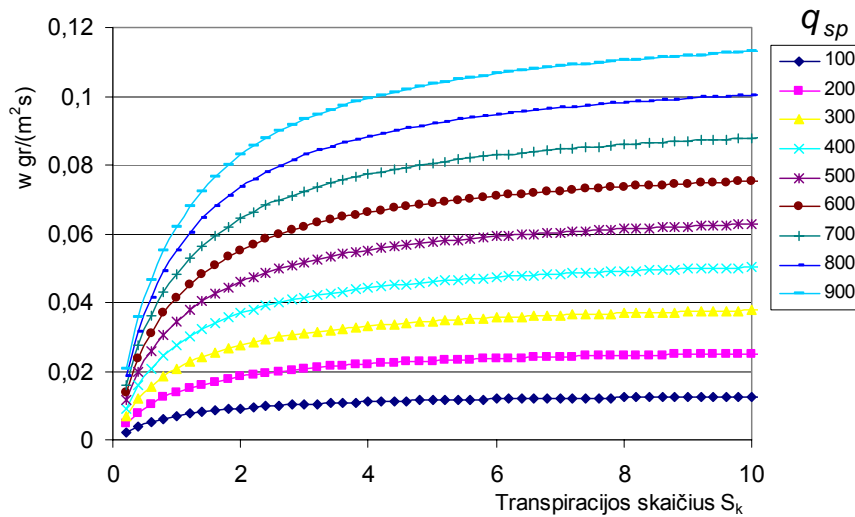


3.1 pav. Transpiracijos intensyvumo w priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus S_k , esant atitinkamam saulės integralinės spinduliuotės srautui q_{sp} . Vandenį garina viena lapo pusė

Transpiracijos intensyvumas ir konvekciniai šilumos mainai su aplinka abiejose lapo pusėse būna vienodi piktžolių terminio naikinimo metu. Termiškai naikinant piktžolės aplinkos temperatūra būna 100–1000 °C. Apie transpiracijos intensyvumą šiuo atveju sprendžiame iš 3.1 pav. pateiktų duomenų arba tokios lygties:

$$w = \frac{aq_1}{\left(\frac{1}{S_k} + 1\right)r} = \frac{abq_{sp}}{\left(\frac{1}{S_k} + 1\right)r}. \quad (3.7)$$

Lygčių (3.6) ir (3.7), taip pat 3.1 ir 3.2 pav. analizė rodo, kad transpiracijos intensyvumas priklauso nuo dviejų kintamųjų, t. y. lapo absorbuotos integralinės saulės spinduliuotės Q_{sp} (q_{sp}) ir transpiracijos skaičiaus, kuriuo išreiškiamas energijos srautų pasiskirstymo santykis $S_k = \frac{Q_3}{Q_{2min}}$. Esant mažoms transpiracijos skaičiaus S_k reikšmėms (nuo 0 iki 3), nedidelis šio kriterijaus kitimas sukelia nemažus transpiracijos intensyvumo pokyčius.



3.2 pav. Transpiracijos intensyvumo w priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus S_k , esant tam tikram saulės integralinės spinduliuotės srautui q_{sp} . Vandenį garina abi lapo pusės

Kintant skaičiaus S_k reikšmėms nuo 3 iki 10 ir esant mažiems saulės spinduliuotės srauto pokyčiams, mažai keičiasi transpiracijos intensyvumas. Remdamiesi I. A. Šulgino duomenimis, apskaičiavę transpiracijos skaičiaus skaitinę vertę matome, kad jis realiai kinta nuo 0,1 iki 10 (Шулгин, 1970).

Kaip matome iš balanso lygčių (3.1) ir (3.2), augalo energijų mainai su aplinka (transpiracija ir konveciniai šilumos mainai) yra glaudžiai susiję. Naudodamiesi (2.25), (2.56) ir (3.1) lygčių išraiškomis, gauname (3.8) lygtį augalo konveciniams šilumos mainams su aplinka apskaičiuoti:

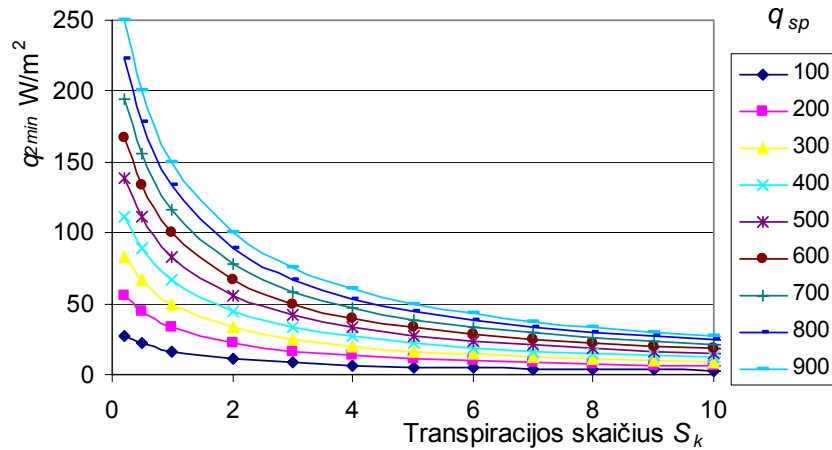
$$Q_2 = \frac{Q_1}{S_k + 1} = \frac{abQ_{sp}}{S_k + 1}. \quad (3.8)$$

Lygtį (3.8) arba 2.34 pav. naudojame tais atvejais, kai abi lapo pusės vienodai garina vandenį ir yra vienodi konveciniai šilumos mainai su aplinka. Jei transpiracija vyksta tik vienoje augalo lapo pusėje, o kon-

vekciniai šilumos mainai – abiejose, tai šilumą, atiduotą aplinkai konvekcijos būdu, apskaičiuojame pagal lygtį:

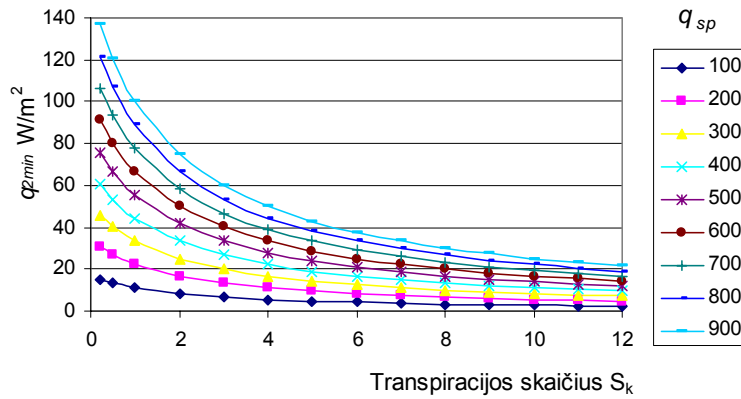
$$Q_2 = \frac{Q_1}{S_k + 2} = \frac{abQ_{sp}}{S_k + 2}. \quad (3.9)$$

3.3 ir 3.4 pav. pateikiame augalo lapo konvekcinių šilumos mainų su aplinka priklausomybę nuo transpiracijos skaičiaus S_k ir saulės integralinės spinduliuotės srauto q_{sp} .



3.3 pav. Konvekcinių šilumos mainų su aplinka q_{2min} priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus S_k , esant tam tikram saulės integralinės spinduliuotės srautui q_{sp} . Vandenį garina abi lapo pusės

Pagal 3.1, 3.2, 3.3 ir 3.4 paveiksluose pateiktus duomenis galima teigti, kad staigiausi transpiracijos ir šilumos mainų su aplinka pokyčiai pastebimi esant mažoms transpiracijos skaičiaus S_k reikšmėms. Aptariant šilumos mainų su aplinka duomenis (3.3 ir 3.4 pav.) matyti, kad mažėjant transpiracijos skaičiui S_k , konvekciniai šilumos mainai su aplinka kinta staigiau. Lygindami transpiracijos intensyvumo (3.1 ir 3.2 pav.) ir konvekcinių šilumos mainų (3.3 ir 3.4 pav.) duomenis akivaizdžiai matome tiesioginį šių procesų ryšį: vienam didėjant kitas atitinkamai mažėja.



3.4 pav. Konvekcinų šilumos mainų su aplinka q_{2min} priklausomybė nuo transpiracijos skaičiaus S_k , esant tam tikram saulės integralinės spinduliuotės srautui q_{sp} . Vandenį garina viena lapo pusė

Transpiracijos procesas minimalios energinės apykaitos sąlygomis, esant neigiamam efektyviam šiluminiam spinduliavimui vyksta, kai transpiracijos skaičius S_k kinta $0 < S_k < 1$ ribose. Kai $S_k = 0$, prasideda rasos susidarymas augalo paviršiuje. Šis procesas vyksta antroje dienos pusėje, mažėjant augalo ir oro temperatūrai. Tai laikotarpis, kai transpiruojančio augalo temperatūra t_1 yra ($t_{sl} < t_1 < t_0$) aukštesnė už šlapio termometro temperatūrą ir žemesnė už aplinkos temperatūrą. Tai augalo energinės apykaitos procesai, priskiriami trečiajam augalo energinės apykaitos periodui (2.29 ir 2.31 pav.). Visa tai vyksta esant neigiamam augalo efektyviam šiluminiam spinduliavimui. Kai augalo energinė apykaita minimali, esant neigiamai ($-Q_1$) spinduliuotei energinio balanso lygtis būtų tokia:

$$Q_3 = Q_2^{virš} + Q_2^{ap} - Q_1. \tag{3.10}$$

Nagrinėjamuoju atveju, kaip ir esant teigiamai efektyviajai spinduliuotei, abi augalo pusės turi vienodas konvekcinų šilumos mainų sąlygas. Tarp lapo viršutinės ir apatinės pusių didesnio temperatūrų skirtumo nėra, todėl konvekciniam šilumos mainams skaičiuoti taikytinos (3.3) ir (3.4) lygtys. Augalo lapas gaunamą šilumą iš aplinkos sunaudoja transpiracijai ir neigiamam efektyviajam spinduliavimui į aplinką. Tokiu atveju balanso lygtį (3.10) galima sudaryti taip:

$$2Q_2 = Q_1 + Q_3 \quad (3.11)$$

arba

$$Q_3 = wr = 2Q_2 - Q_1. \quad (3.12)$$

Remdamiesi transpiracijos skaičiaus $S_k = \frac{Q_3}{Q_2}$ išraiška (3.12), lygtį galime perrašyti taip:

$$w = \frac{Q_1}{\left(\frac{2}{S_k} - 1\right)r}. \quad (3.13)$$

Transpiracijai nustatyti (3.13) lygtį naudojame tais atvejais, kai vandenį garina viena lapo pusė.

Tais atvejais, kai transpiracijos procese ir konvekciniuose šilumos mainuose vienodai dalyvauja abi lapo pusės, transpiracijos intensyvumas skaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$w = \frac{Q_1}{\left(\frac{1}{S_k} - 1\right)r}. \quad (3.14)$$

Saulėtu paros metu augale intensyviausiai vyksta ne tik energinė apykaita, bet ir cikliški biologiniai procesai. Todėl šiuo paros metu vykstančių energijos procesų termodinaminė analizė yra ypač aktuali, nes nagrinėjami veiksniai daro įtaką svarbiausiam žemėje procesui – asimiliacijai.

Pateikti duomenys leidžia teigti, kad pagrindinis augalo energinės apykaitos rodiklis yra transpiracijos skaičius S_k , kuriuo nusakomas energijos, sunaudotos transpiracijai ir konvekciniams šilumos mainams su aplinka, santykį ir išreiškiamas (2.25) ir (2.56) lygtimis. Kaip matome iš (2.25) ir (2.56) lygčių, transpiracijos skaičius S_k priklauso nuo augalo aplinkos oro ir lapo paviršiaus oro fizinių parametru. Transpiracijos skaičius S_k priklauso nuo keturių kintamųjų dydžių, t. y. nuo aplinkos oro temperatūros t_0 , jos drėgnio x_0 ir vandenį garinančio lapo paviršiaus oro parametru, temperatūros t_1 , drėgnio x_1 . Transpiracijos skaičiaus S_k priklausomybė nuo aplinkos oro (t_0, x_0) ir transpiruojančio lapo paviršiaus oro (t_1, x_1) parametru natūraliomis aplinkos sąlygomis pateikta 2.28 pav.

4 Augalų ir jų aplinkos energinės apykaitos procesų dėsningumai

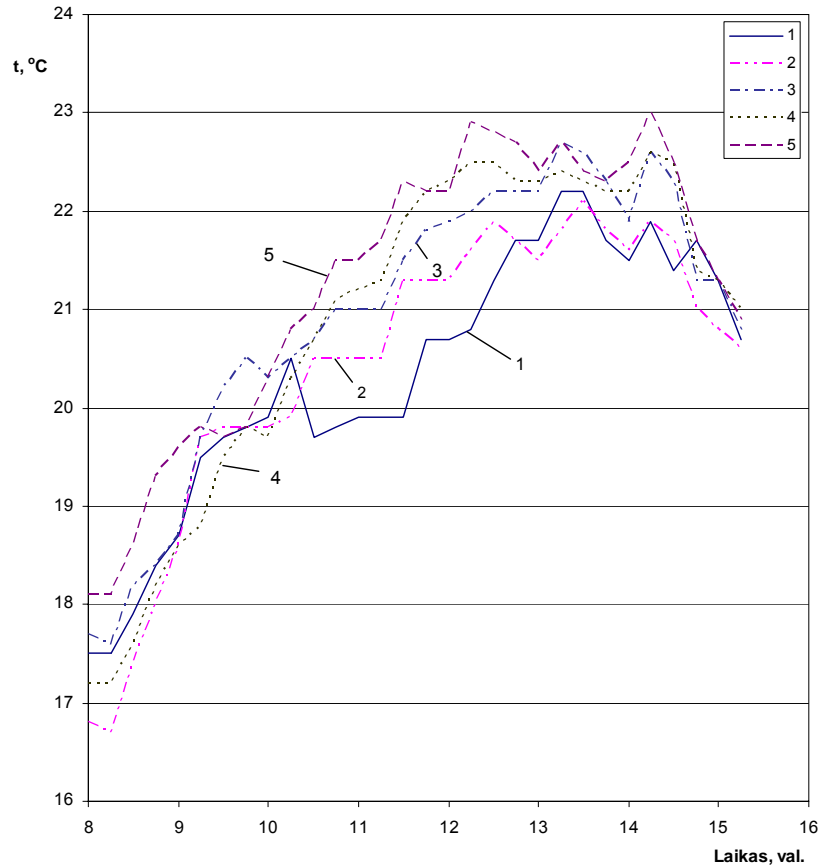
4.1. Augalų aplinkos oro temperatūra

Oro, esančio aplink augalus, temperatūra tiek natūraliomis, tiek dirbtinio klimato sąlygomis yra kintanti. Jos kaitą lemia klimato ir mikroklimato veiksniai. Pats svarbiausias iš jų yra saulės spinduliuotės srauto kitimas ir jos ciklinis pobūdis. Rytais ir vakarais, taip pat naktį oro temperatūra kinta nuosekliai, pulsacijos būna nedidelės, atitinkančios bendrą augalo aplinkos paros temperatūros kitimo dinamiką.

Saulėtu paros metu oro srautai gali sukelti temperatūros pulsacijas augalo aplinkoje. Tyrimai parodė, kad per parą pastebimi 5 augalo aplinkai būdingi vertikalieji oro temperatūros kitimo atvejai:

- 1) oro temperatūra nuo dirvos paviršiaus kylant aukštyn nuosekliai didėja;
- 2) oro temperatūra nuo dirvos paviršiaus kylant aukštyn iš pradžių nuosekliai didėja, po to nuosekliai mažėja;
- 3) oro temperatūra nuo dirvos paviršiaus kylant aukštyn nuosekliai mažėja;
- 4) oro temperatūra nuo dirvos paviršiaus kylant aukštyn iš pradžių nuosekliai mažėja, po to nuosekliai didėja;
- 5) oro temperatūra nuo dirvos paviršiaus kylant aukštyn mažai kinta, todėl galima laikyti vienoda – nekintančia.

Vertikalųjį oro temperatūros kitimą pomidorų lauke šviesiu paros metu pateikiame 4.1 pav. Oro temperatūrą ir jos vertikalųjį pasiskirstymą šiltnamiuose keičia mikroklimato reguliavimo ir ventiliacijos sistema (4.2 pav.).



4.1 pav. Vertikalusis oro temperatūros kitimas pomidorų lauke šviesiu paros metu: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – atitinkamai oro temperatūros kitimas 20, 160, 300, 500 ir 600 mm aukštyje virš dirvos paviršiaus

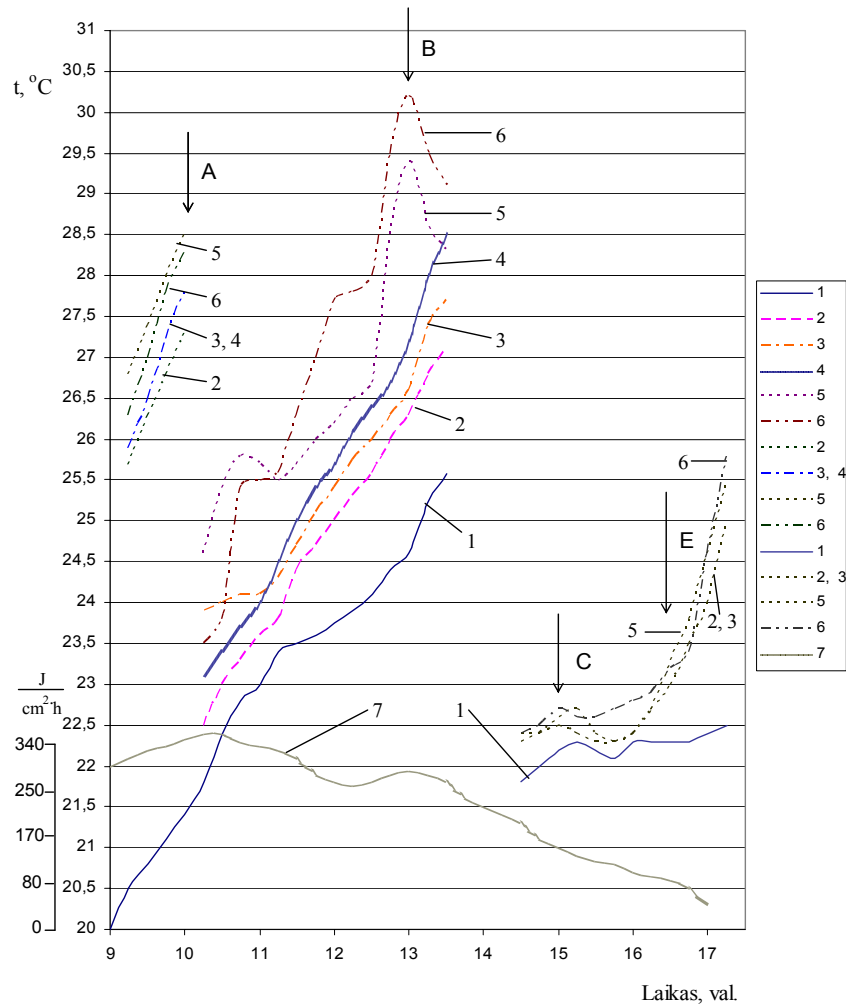
Dirvos paviršiuje augalą supančiame ore vertikalia kryptimi susiformavę skirtingų temperatūrų sluoksniai sukuria vertikalias jėgas, kurios aplink augalą esančio oro sraute sukelia vertikalius poslinkius. Vertikalią jėgą, kuri susidaro tarp oro sluoksnių, turinčių skirtingas temperatūras, randame naudodamiesi lygtimi:

$$p = 9,81h(\rho_1 - \rho_2) , \quad (4.1)$$

čia p – vertikali oro srautą veikianti jėga, N/m^2 ;
 h – atstumas tarp aplink augalą esančio oro srauto skirtingų temperatūrų, m ;
 ρ_1, ρ_2 – oro srauto tankiai atstumu h , kg/m^3 .

Kaip matome iš (4.1) lygties, oro srautą veikianti vertikali jėga p didėja didėjant temperatūrų skirtumui tarp atskirų oro sluoksnių. Per parą kinta vertikali jėgos p absoliutus dydis ir kryptis. Augalą supančio oro temperatūrų skirtumai vertikalia kryptimi sukuria nedideles gravitacines jėgas, tačiau to visiškai užtenka, kad pasireikštų natūrali vertikali oro cirkuliacija aplink augalą. Ši cirkuliacija šviesiu paros metu daro įtaką augale vykstantiems biologiniams procesams, aprūpinant jį CO_2 dujomis, šalinant augalo išskiriamus metabolitus.

Eksperimentiniai oro temperatūros kitimo vertikalia kryptimi duomenys (4.1 ir 4.2 pav.) rodo, kad atskiros to paties augalo dalys ar dalelės yra veikiamos nevienodos oro temperatūros ir skirtingo santykinio oro drėgumo. Skirtingos oro temperatūros augale sukelia nevienodo intensyvumo konvekcinius šilumos mainus su aplinka. Vadinasi, kiekviena augalo dalis ar dalelė su aplinka vykdo skirtingą energinę apykaitą, kurią apibūdina skirtingas energijų balansas. Akivaizdu, kad matuojant bendrą augalą supančio oro temperatūrą, ji bus atsitiktinė ir dažniausiai neatitiks lokalios faktinės temperatūros, nuo kurios priklauso augalo dalies konveciniai šilumos mainai, lokali augalo dalies temperatūra. Taigi aplink augalą esančio oro temperatūrą ir augalo (jo dalies ar atskiros dalelės) ir jo aplinkos temperatūrų skirtumą galima nustatyti tik lokaliais augalo dalies ir jo aplinkos temperatūros matavimais, laikantis temperatūros matavimo metodinių reikalavimų. Nesilaikydami šio reikalavimo dėl neleistinai grubių atsitiktinių temperatūros matavimo klaidų neišvengsime klaidinančių išvadų.



4.2 pav. Vertikalusis oro temperatūros kitimas pavasariniame polietileni-
niame šiltnamyje: 1 – aplinkos oro temperatūra 100 cm atstumu nuo šiltnamio
30 cm aukštyje; 2, 3, 4, 5, 6 – oro temperatūra šiltnamyje atitinkamai 60, 80, 90,
100 ir 110 cm aukštyje virš žemės paviršiaus; 7 – saulės radiacijos intensyvu-
mas atviraime lauke; A – dalinis šoninis šiltnamio atidengimas, ventiliacija; B –
visiškas šiltnamio atidengimas, lauko sąlygos; C – dalinis šiltnamio uždengimas,
šoninė ventiliacija; E – visiškas šiltnamio uždengimas

4.2. Augalo dalių paviršiuje vykstančių energinės apykaitos procesų dėsningumai

Augalo lapo (ir kitų dalių) paviršiuje tarp lapo ir aplinkos vyksta sudėtingi termohidromechaniniai procesai. Lapą supančio oro sluoksnyje iš aplinkos augalo lapo paviršiaus kryptimi juda CO_2 dujų masė. Tame pačiame augalo lapo paviršiniame oro sluoksnyje, vyksta H_2O garų, O_2 ir šilumos Q judėjimas. Taigi tuo pačiu metu augalo lapo paviršiuje susidaro du labai sudėtingi vienas kitam priešingi srautai. Matėme, kad kur pasireiškia judėjimas, ten būtinai vyksta energijų ar masių apykaita.

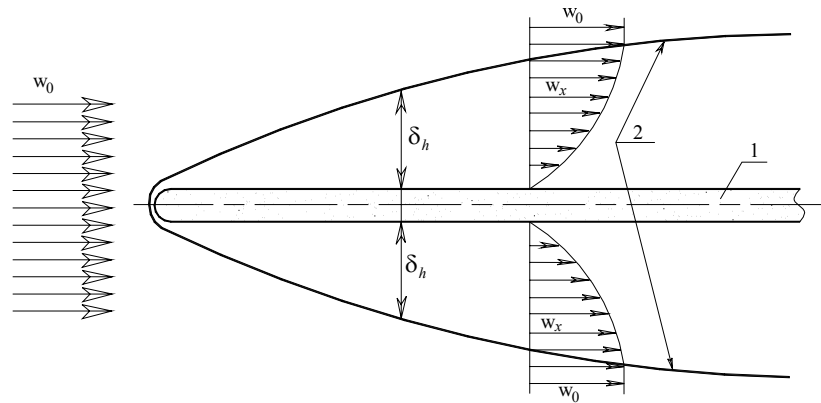
Augale vykstantys biologiniai procesai priklauso nuo audinių temperatūros, todėl augalo ir jo aplinkos temperatūra svarbi teoriniams ir taikomiesiems augalijos mokslams. Augalo dalies temperatūra yra joje vykstančių biologinių procesų ir jos energinės apykaitos su aplinka rezultatas. Augalo dalies temperatūra t_1 , išskyrus perėjimo momentus iš teigiamo į neigiamą (arba atvirkščiai) temperatūros gradientą, visuomet skiriasi nuo aplinkos oro temperatūros t_0 . Todėl augalo dalies paviršiuje visuomet egzistuoja tam tikram augalo energinės apykaitos atvejui būdingas kintamos temperatūros laukas. Jis apibūdinamas temperatūros gradientu ir tam tikru augalo dalies ir jo aplinkos temperatūrų skirtumu. Temperatūros skirtumai augalo lapo sąlyčio su aplinka sluoksnyje ypač svarbūs augalo gyvenime. Jie augalo lapo paviršiuje sukuria jėgas natūraliai oro cirkuliacijai, kuri būtina augalo gyvybiniam procesams palaikyti. Esant laisvai oro konvekcijai, pagrindinė varomoji jėga augalo lapo apykaitos procesams, vykstantiems jo paviršiuje, yra temperatūrų skirtumas tarp paviršiaus ir jo aplinkos. Augalo lapo paviršiuje oro temperatūra kinta dėsningai, nuosekliai, be jokių šuolių: nuo augalo lapo paviršiaus iki aplinkos augalą esančio oro srauto temperatūros. Šis augalo *lapo paviršiuje esantis oro sluoksnis, kurio temperatūra dėsningai kinta nuo augalo lapo paviršiaus iki augalą supančio oro srauto temperatūros, augalo dalies temperatūriniu sąlyčiu su aplinka sluoksniu*. Toks sluoksnis egzistuoja paviršiuje bet kokio fizikinio kūno, kurio temperatūra skiriasi nuo jį supančio fluideo (talaus kūno) temperatūros (Schlichting, Gersten, 2000, Baranova et al. 2010, Incropera, DeWitt, 1981, Čėsna, 2005, Liutikas, Gudzinskas 2001, Vaitiekūnas, 1998, Žukauskas, 1989, Жукаускас, Мартиненко, 1988). Nagrinėjant augalo dalių sąlyčio su aplinka sluoksniuose vykstančius procesus, biologams tenka remtis termofizikinių procesų dėsningumais. Augalo dalių

sąlyčio su aplinka sluoksniuose vyksta sudėtingas augalo oro mitybos ir metabolitų judėjimas esant dujinei būsenai. *Procesai, vykstantys augalo apykaitos su aplinka sluoksnyje, gali skatinti arba slopinti augale vykstančius biologinius procesus, todėl jie yra biologinių ir energinių procesų, vykstančių augale, pasekmės tąsa.* Remdamiesi apykaitos su aplinka sluoksniu termofizikiniais dėsningumais galime teigti, kad augalo lapo paviršiniame oro sluoksnyje egzistuoja hidrodinaminis, terminis ir koncentracijų (parcialinio vandens garų slėgio, CO₂, O₂ ir augalo audinių lakiųjų išskyrų) apykaitos su aplinka sluoksniai. Pasinaudodami informacija apie šių sluoksnių susidarymą fizinių kūnų paviršiuje (Incropera, DeWitt, 1981, Schlichting, Gersten, 2000), įvertinę augalo dalių paviršiuje vykstančius procesus, aptarsime augalų apykaitos su aplinka sluoksnius.

Augalo ar kito kūno apykaitos su aplinka sluoksnių susidarymo mechanizmą patogiu aiškinti ir schematiškai pavaizduoti hidrodinaminio apykaitos su aplinka sluoksniu susiformavimo atveju.

Lygų augalo lapo paviršių supa beribis, stabilus oro (dujų) srautas (4.3 pav.). Jeigu prieš lapo paviršių oro srauto greitis vienodas ir lygus w_0 , tai ant lapo paviršiaus su juo besiliečiančios oro dalelės yra stabdomos ir jų greitis tampa lygus nuliui. Sustojus oro dalelėms, besiliečiančioms su augalo lapo paviršiumi, dėl trinties yra pristabdomos ir gretimos oro srauto dalelės. Prie augalo lapo paviršiaus susidaro pristabdyto greičio oro sluoksnis, kuriame, kaip parodyta 4.2 pav., greitis kinta nuo nulio iki judančio oro srauto greičio w_0 . Šis pristabdyto oro greičio sluoksnis augalo lapo paviršiuje vadinamas *hidrodinaminio augalo apykaitos su aplinka sluoksniu*. Šio sluoksniu sąvokos pradininkas vokiečių mokslininkas L. Prandtlis 1904 m. Kaip matome iš 4.3 pav. pateiktų duomenų, didėjant atstumui nuo augalo lapo paviršiaus pradžios srauto kryptimi, apykaitos su aplinka sluoksniu storis δ_n didėja.

Augalo lapo paviršiaus struktūra (nelygumai, plaukuotumas, lapo plokštelės deformacijos) iškreipia 4.3 pav. pavaizduotą teorinį hidrodinaminį lapo paviršiaus apykaitos su aplinka sluoksniu. Tačiau tai iš esmės nekeičia hidrodinaminio apykaitos su aplinka sluoksniu augalo paviršiuose egzistavimo esmės.



4.3 pav. Hidrodinaminio apykaitos su aplinka sluoksnio susidarymo augalo lapo paviršiuje schema: w_0 – oro srauto greitis; w_x – pristabdyto srauto oro greitis; δ_h – hidrodinaminio (pristabdyto oro greičio) apykaitos su aplinka sluoksnio storis. 1 – augalo lapo plokštelės schema; 2 – hidrodinaminio apykaitos su aplinka sluoksnio riba (paaiškinimas tekste)

Oro judėjimas augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje gali būti laminarinis ir turbulencinis. Augalo lapo paviršiuje iš pradžių visuomet susidaro laminarinis sluoksnis (4.3 pav.), kuris išsilaiko vadinauoju kritiniu atstumu x_{kr} . Toliau judant orui augalo lapo paviršiumi, esant vėjui, priklausomai nuo lapo dydžio, apykaitos su aplinka sluoksnis turi galimybę sukuriuoti ir judėjimas virsti turbulenciniu. Augalo lapo (plokštelės) atveju judėjimas išlieka laminarinis iki Re skaičiaus reikšmės:

$$Re_{x,kr} = \frac{w_o x_{kr}}{\nu} = 5,10^5, \quad (4.2)$$

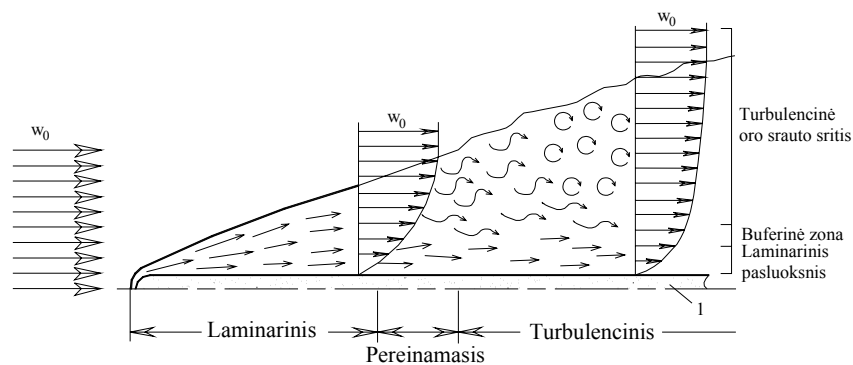
čia Re – Reinoldso kriterijus;

w_o – nesutrikdyto oro srauto greitis prieš lapą arba už apykaitos su aplinka sluoksnio ribos, m/s;

x – atstumas nuo augalo lapo krašto oro srauto kryptimi, m;

ν – oro kinematinis klampumas, m^2/s ($\nu_{20^\circ C} = 15,06 \cdot 10^{-6} m^2/s$).

Lygtyje (4.2) nurodyta $Re_{x,kr}$ reikšmė nėra griežta, nes priklauso-
mai nuo augalo lapo geometrinės formos, paviršiaus nelygumų, plaukuo-
tumo ir turbulencijos laipsnio ji gali kisti nuo 10^5 iki $3 \cdot 10^6$. Keičiantis oro
judėjimo režimui hidrodinaminiam apykaitos su aplinka sluoksnyje,
keičiasi šilumos atidavimo koeficiento α ($W/m^2 \cdot K$) reikšmė augalo lapo
paviršiuje. Didėjant vėjo greičiui augalo lapo hidrodinaminio apykaitos
su aplinka sluoksnio storis δ_h mažėja. Pasiekus tam tikrą oro (vėjo) greitį,
augalo lapo laminarinis apykaitos su aplinka sluoksnis pereina į turbu-
lencinį (chaotišką) su labai plonu laminarinio pasluoksniu. Tai labai
svarbus veiksnys, iš esmės keičiantis konvekcinių šilumos mainų inten-
syvumą, kurio rezultatas – augalo ir aplinkos energinė apykaita. Tai ypač
svarbus veiksnys taikomajai augalų energetikai, kai reikia intensyvinti
arba mažinti augalo konvekcinius šilumos mainus su aplinka (dirbtinio
klimato ir piktžolių terminio naikinimo atvejais). Perėjimą iš laminarinio
į turbulencinį judėjimą nusako Reinoldso kriterijus, kuris randamas iš
(4.2) lygties.



4.4 pav. Hidrodinaminio apykaitos su aplinka sluoksnio susidarymo au-
galo lapo paviršiuje schema: w_0 – oro srauto greitis; 1 – augalo lapo plokštelės
schema (Incropera, DeWitt, 1981; Liutikas, Gudzinskas, 2001 Schlichting, Ger-
sten, 2000)

Kritinė Reinoldso skaičiaus reikšmė, priklausomai nuo oro srauto
aplink augalo lapą turbulencijos laipsnio, kinta, tačiau laminarinis oro
srauto judėjimas bus, jei $Re < 2000$. Naudodamiesi (4.3) lygtimi apskai-
čiuojame idealiam atvejui (kai lapo plokštelė lygiagreti oro srauto kryp-
čiai) laminarinio srauto lapo paviršiuje priklausomybę nuo vėjo greičio ir

lapo dydžio (4.1 lentelė). Iš 4.1 lentelėje pateiktų duomenų matome, kad tik esant stipriam vėjui lapą veiks turbulencinis srautas. Pavyzdžiui, kai lapo dydis 10 cm, turbulencinis srautas bus esant vėjo greičiui didesniai kaip 15 m/s.

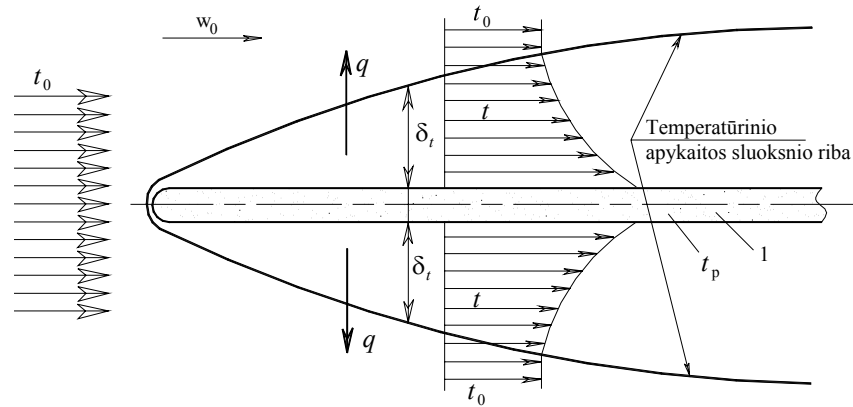
Remiantis 4.1 lentelėje pateiktais duomenimis galima teigti, kad natūraliomis aplinkos sąlygomis vyraus laminarinis oro srautas, sukuriantis laminarinius apykaitos su aplinka sluoksnius augalo dalių paviršiuje. Todėl, skaičiuojant augalo konvekcinius šilumos mainus su aplinka, daugiausia tenka naudoti laminarinio judėjimo lygtis šilumos atidavimo koeficientui α skaičiuoti.

4.1 lentelė. Laminarinio srauto lapo paviršiuje priklausomybė nuo vėjo greičio ir lapo dydžio esant 20 °C

Vėjo greitis, m/s	3	5	10	11	12	13	14	15	20
Laminarinio judėjimo at- stumas nuo lapo krašto, cm	50,0	30,0	15,0	13,7	12,5	11,5	10,7	10,0	7,5

Analogiškas reiškinys hidrodinaminiam augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksniui vyksta temperatūriniame apykaitos su aplinka sluoksnyje – augalo lapo paviršiaus temperatūra t_p kinta iki nesutrikdyto oro srauto temperatūros t_0 (4.5 pav.).

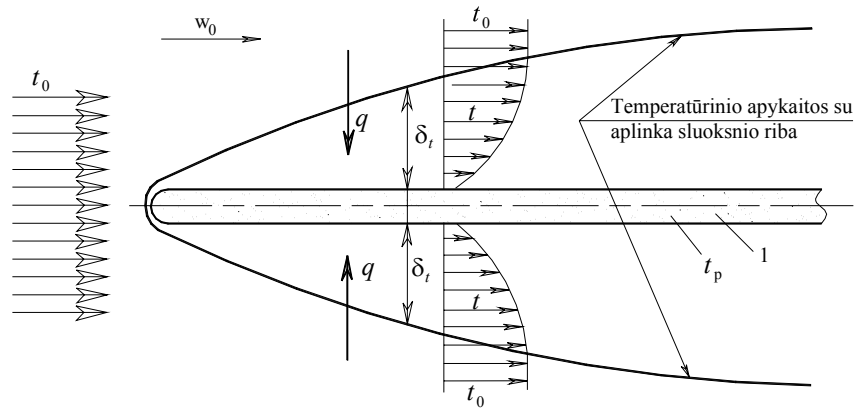
Oro dalelės, kurios turi sąlytį su augalo lapo paviršiumi, pasiekia terminę pusiausvyrą, susilygina su lapo paviršiaus temperatūra. Gretimų oro sluoksnių dalelių temperatūra skiriasi. Todėl nuo augalo lapo paviršiaus mažėjanti temperatūra išsidėsto aplink augalo lapą. Aplink augalo lapo paviršių esančio oro dalis, kurioje egzistuoja ši temperatūros kaita, ir yra augalo lapo temperatūrinis apykaitos su aplinka sluoksnis. Jo storis δ_t apibūrinamas kaip y koordinatės vertė, kurios santykis $[(t_p - t)/(t_p - t_0)] = 0,99$ (Incropera, DeWitt, 1981; Pedišius, Šlančiauskas, 1995).



4.5 pav. Temperatūrinio apykaitos su aplinka sluoksnio susidarymo augalo lapo paviršiuje schema, kai augalo lapo paviršiaus temperatūra t_p didesnė už aplinkos temperatūrą t_0 : t_0 – oro srauto temperatūra; t – pristabdyto oro srauto temperatūra; δ_t – temperatūrinio apykaitos su aplinka sluoksnio storis; q – šilumos srauto kryptis; 1 – augalo lapo plokštelės schema (paaiškinimas tekste)

Augalo lapo ir aplink jį esančio oro temperatūrų skirtumas visuomet sukuria temperatūrinį apykaitos su aplinka sluoksnį. Šis sluoksnis tiesiogiai susijęs su konvekciniiais šilumos mainų procesais, vykstančiais tarp augalo dalių paviršiaus ir aplinkos. Taigi sistemoje „Augalo dalis ↔ augalo aplinka“ galimi trys atvejai: pirmasis, kai aplinkos temperatūra t_0 didesnė už augalo lapo temperatūrą t_1 , $t_0 > t_1$; antrasis, kai aplinkos temperatūra t_0 mažesnė už augalo lapo temperatūrą t_1 , $t_0 < t_1$; trečiasis, kai temperatūros vienodos $t_1 = t_0$.

Pirmuoju atveju oro temperatūra augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje artėjant prie lapo paviršiaus didės (4.5 pav.), antruoju atveju – mažės (4.6 pav.). Trečiuoju atveju, kai nėra temperatūrų skirtumo $\Delta t = 0$, nėra ir temperatūros gradiento. Tai atvejis, kai konvekciniai šilumos mainai tarp augalo lapo, kurio temperatūra t_1 ir augalo aplinkos, kurios temperatūra t_0 , nevyksta, nes temperatūros vienodos $t_1 = t_0$. Tai momentinis augalo energinės apykaitos atvejis. Tai momentas ($\Delta t = 0$), kai konvekcinių šilumos mainų srautas keičia kryptį, t. y. temperatūrų skirtumas Δt tarp augalo audinių ir aplinkos iš neigiamo $t_1 > t_0$ pereina į teigiamą $t_0 > t_1$ arba atvirkščiai.



4.6 pav. Temperatūrinio apykaitos su aplinka sluoksnio susidarymo augalo lapo paviršiuje schema, kai augalo lapo paviršiaus temperatūra t_p mažesnė už aplinkos temperatūrą t_0 : t_0 – judančio oro srauto temperatūra; t – pristabdyto oro srauto temperatūra; δ_t – temperatūrinio apykaitos su aplinka sluoksnio storis; q – šilumos srauto kryptis; 1 – augalo lapo plokštelės schema (paaiškinimas tekste)

Augalo lapo konvekciniai šilumos mainai su aplinka Q_2 (W) arba q (W/m^2) randami naudojantis Niutono dėsniu, kuris nusakomas lygtimi:

$$Q_2 = aF \Delta t \quad (4.3)$$

arba

$$q = a \Delta t. \quad (4.4)$$

Augalo dalies konvekcinius šilumos mainus Q_2 su aplinka nustatyti yra problemiška. Ypač sunku nustatyti šilumos atidavimo koeficientą α ($W/m^2 \cdot K$) augalo dalims, kurios keičia padėtį erdvėje (lankstūs augalo lapai), turi įvairią paviršiaus geometrinę formą ir struktūrą (paviršiaus nelygumai, plaukuotumas), kurių praktiškai įvertinti neįmanoma.

Konvekcinių šilumos atidavimo koeficientą α $W/(m^2 \cdot K)$ apibūdina daug kintamųjų, kuriuos sukelia hidrodinaminiai ir šiluminiai, taip pat ir fiziologiniai procesai, vykstantys augalo dalies paviršiuje. Dar sudėtingiau įvertinti augalo metabolitų judėjimo lapo paviršiuje procesus. *Nagrinėjant augalo konvekcinius šilumos mainus su aplinka tenka naudotis*

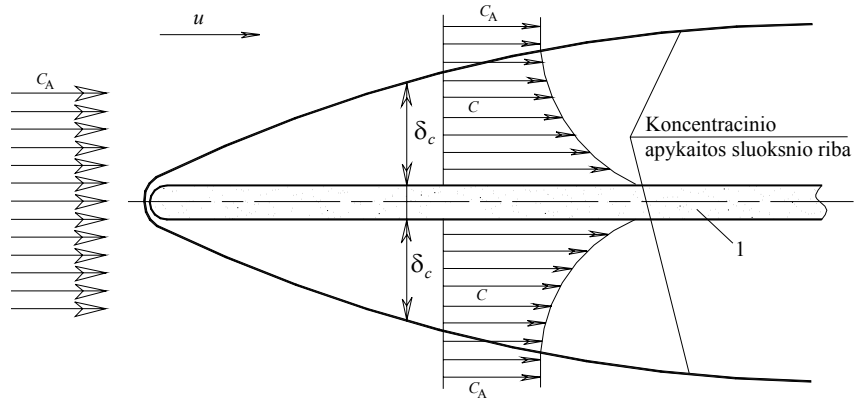
šiluminės fizikos (arba džiovinimo teorijos) lygtimis šilumos atidavimo koeficientui α skaičiuoti, darant atitinkamas pataisas, įvertinančias augalo biologinius aspektus.

Remiantis augalo energinę apykaitą įvertinančia energijų balanso lygtimi galima teigti, kad augalo šilumos mainai su aplinka daug sudėtingesni negu juos nusako šiluminės fizikos lygtys, taikomos kietiems fizikiniams kūnams. Augaluose kartu su augalo dalies šilumos mainais vyksta masės mainai (transpiracija), kurie tarpusavyje tiesiogiai susiję kaip šilumos ir masės pernešimo procesai, vykstantys augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje. Šilumos ir masės pernešimo procesų nagrinėjimas augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje mus priartina prie procesų, kurie vyksta naudojant džiovinimo technologijas (vaisių, žolinių augalų, medienos) ir kuriuos aprašo džiovinimo teorijos (Лыков, 1968; Jncropera, 2001). Drėgmės garavimas iš poringų kūnų skiriasi nuo skysčio garavimo iš atvirų paviršių tuo, kad garavimas vyksta paviršiuose, kurie yra kūno viduje, atitinkamame gylyje (augalo lapo žiotelės) nuo paviršiaus. Kai poringas paviršius garuoja iš 0,5 mm gylio, šilumos atidavimo koeficientas α būna 25 % didesnis palyginti su garavimu nuo lygaus paviršiaus (Лыков, 1968).

Nagrinėjant augalo konvekcinius šilumos mainus su jo aplinka svarbu teisingai parinkti šiluminės fizikos lygtis šilumos atidavimo koeficientui α W/(m²·K) skaičiuoti, taikytinas nagrinėjamajam augalo energinės apykaitos atvejui. Atskirų augalo dalių šilumos atidavimo koeficientą α apskaičiuoti labai sudėtinga, reikia aptardami konkrečias kiekvieno atvejo sąlygas.

Priklausomai nuo jėgos kilmės, sukuriančios oro judėjimą augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje, skiriami laisvo ir priverstinio judėjimo atvejai, kuriems taikomos skirtingos skaičiavimo lygtys. Laisvas oro judėjimas vyksta dėl skirtingų oro tankių ρ (kg/m³) aplink augalo lapą. Skirtingus oro tankius sukelia skirtingos oro temperatūros ir drėgniai transpiruojančio augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje, taip pat atskirų jo aplinkos sluoksnių oro temperatūrų ir drėgnių skirtumai. Priverstinį oro judėjimą aplinkoje sukelia vėjas, šiltnamiuose – ventiliacijos sistemos. Natūralios aplinkos sąlygomis saulėtu paros metu aplinkos oras dažniausiai nuolat priverstinai juda nuo vėjo. Todėl galime teigti, kad gana dažnai augalo lapų konvekciniai šilumos mainai su aplinka ir transpiracija vyksta priverstinio oro judėjimo sąlygomis.

Augalo lapo paviršiuje, analogiškai hidrodinaminiam ir temperatūriniam apykaitos su aplinka sluoksniui, egzistuoja koncentracijų sluoksniai. Juos sukuria esant dujinei būsenai vykstančių augalo gyvybinių procesų apykaitos produktai, sukeldami koncentracijų gradientus augalo aplinkoje (parcialinio vandens garų slėgio, CO_2 , O_2). Atskiruose oro sluoksniuose, turinčiuose sąlytį su augalo paviršimi, susidarę koncentracijų gradientai (parcialinio vandens garų slėgio, CO_2 , O_2) sukelia atitinkamų sudedamųjų dalių molekulinį pernešimą koncentracijų gradientų mažėjimo kryptimi. Vyksta masės difuzija. Konvekcinius masės mainus apibūdina koncentracinis sluoksnis. Jei sudedamosios dalies A koncentracija augalo dalies paviršiuje $C_{A,p}$ skiriasi nuo laisvo srauto koncentracijos $C_{A,\infty}$, atsiranda koncentracinis sluoksnis (4.7 pav.).



4.7 pav. Koncentracinis apykaitos sluoksnis augalo lapo paviršiuje: $C_{A,\infty}$ – sudedamosios dalies A koncentracija laisvame oro sraute; $C_{A,p}$ – sudedamosios dalies A koncentracija augalo dalies paviršiuje; δ_c – sudedamosios dalies A koncentracinio apykaitos sluoksnio storis; u – oro judėjimo kryptis; 1 – augalo lapo plokštelės schema (paaiškinimas tekste)

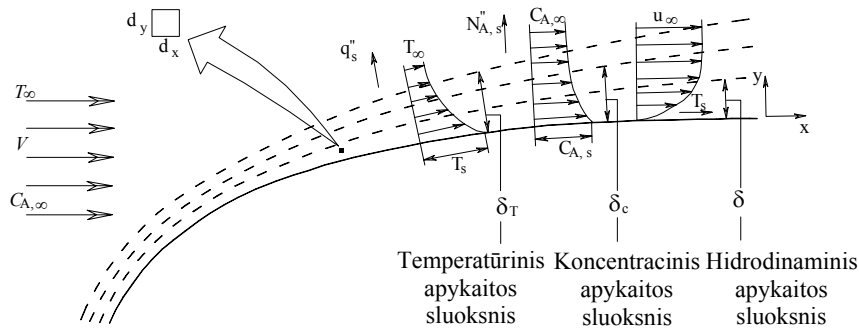
Koncentracinis apykaitos sluoksnis – tai augalo lapo paviršių liečiančio oro sritis, kurioje egzistuoja koncentracijos gradientas. Šios srities storis δ_c nustatomas kaip koordinatės y vertė, kurios $[(C_p - C) / (C_p - C_0)] = 0,99$ (Incropera, DeWitt, 1981). Dalelių pernešimas konvekcija tarp augalo lapo paviršiaus ir aplink jį esančio oro priklauso nuo koncentracijos sluoksnio savybių. Prie pat augalo lapo paviršiaus, kai ($y = 0$), nėra oro judėjimo, todėl dalelių pernešimas vyksta tik difuzijos

būdu. Bet kuriame taške virš augalo lapo paviršiaus pasireiškia ir difuzija, ir dalelių konvekcinis pernešimas. Ryšys tarp dalelių pernešimo ir koncentracinio apykaitos sluoksnio gali būti įvardytas kaip molinis masės pernešimas, kuris asocijuojasi su dalelių pernešimu difuzijos būdu ir yra analogiškas Furje dėsniumi. Išraiška, pavadinta Fiko dėsniumi, gali būti užrašoma taip:

$$n_A = -D_A \frac{\partial \rho_A}{\partial y}, \quad (4.5)$$

čia n_A – oro sudedamosios dalies A srauto masė, $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$;
 D_A – binarinis difuzijos koeficientas, kg/m^3 ;
 ρ_A – oro mišinio sudedamosios dalies A koncentracija, kg/m^3 .

Apibendrinant augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnius galima teigti, kad orui liečiant augalo dalių paviršių visada egzistuoja hidrodinaminis apykaitos su aplinka sluoksnis. Temperatūrinis apykaitos sluoksnis egzistuoja tik tada, kai yra temperatūrų skirtumas tarp augalo ir jo aplinkos. Koncentracinis apykaitos sluoksnis ir konvekciniai masės mainai – kai augalo lapo paviršiuje augalo dalies koncentracija skiriasi nuo jos koncentracijos ore. Sistemos „Augalo dalis ↔ augalo aplinka“ atveju susiformuoja visų trijų rūšių apykaitos su aplinka sluoksniai (4.8 pav.).



4.8 pav. Augalo dalies paviršiuje esantys temperatūrinis, koncentracinis ir hidrodinaminis apykaitos su aplinka sluoksniai (Incropera, DeWitt, 1981).

Didėjant atstumui nuo srauto susilietimo ant augalo lapo paviršiaus, apykaitos su aplinka sluoksniai sparčiai didėja. Apykaitos su aplinka sluoksnių storių δ_h (hidrodinaminio), δ_t (temperatūrinio), ir δ_c (atskirų sudedamųjų dalių koncentracijų) vertės tam tikroje padėtyje nėra vienodos.

Aptarę augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnių formavimosi savybes ir dėsningumus matome, kad energijos ir masės pernešimo procesai augalo aplinkoje vyksta ne visoje aplink augalo lapą esančioje erdvėje, o tik dėsningai riboto storio oro sraute. Taigi turint duomenis, pateikiamus šiluminės fizikos literatūroje (Incropera, 1981; Жукаускас и др. 1968, 1979, 1982; Pedišius, Šlančiauskas, 1995), apie hidrodinaminis, temperatūros, drėgmės, dujų koncentracijos laukus galima teigti, kad *augalo energinė apykaita, maitinimo (CO_2) ir metabolitų (H_2O garų, O_2) judėjimo procesai vyksta ribotame, virš lapo kintamo storio oro srauto sluoksnyje – augalo lapo apykaitos su aplinka luoksnyje.*

Iškyla augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnio įtakos augalo fiziologiniams procesams problema. Augalo vystymuisi darančių įtaką veiksnių (lygiareikšmiškumo) nepakeičiamumo dėsnis teigia, kad svarbu atsižvelgti į visus augalo vystymuisi būtinus aplinkos veiksnis (orą, drėgmę, šviesą, temperatūrą (šilumą), negalima jų pakeisti kitais. Šie veiksniai būtini augalo gyvenimui. Visi jie dalyvauja augalo energijų apykaitoje ir energiniu požiūriu yra glaudžiai tarpusavyje susiję. Minimumo dėsnis teigia, kad nesikeičiant kitoms sąlygoms derlius priklauso nuo veiksnio, kuris tam tikromis sąlygomis yra minimalus. Problema – ar augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnis (maitinimo CO_2 dujomis ir dujinių metabolinių produktų (H_2O garų, O_2) judėjimas) netrukdo didinti augalo produktyvumą? Mūsų tyrimai siekiant suardyti, suploninti laminarinę augalo apykaitos su aplinka pasluoksnį leido gerokai padidinti produktyvumą lyginant su kontroliniu variantu, esant toms pačioms sąlygoms.

Sistema „Augalo dalis ↔ augalo aplinka“ mažai tirta. Biologams ją tirti sunku, nes čia vyksta labai sudėtingi problemiški fiziniai procesai. Siekdami pateikti informaciją, kuria galėtų naudotis biologai, šio darbo autoriai termofizikinius klausimus pateikia supaprastintai, daugiau konstatuojamąja, biologams prieinama forma.

Taigi dirvos paviršius, augalai ir jų dalys sukuria jiems būdingus, nuo oro judėjimo greičio ir temperatūros priklausančius paviršiaus apykaitos su aplinka sluoksnis. Šie sluoksniai sukuria lokalizuotą mikrok-

limatą dirvos paviršiuje, kuriame dygstantis daigas pradeda savo pirmuosius energijų mainus su aplinka. Šiuo daigelio gyvavimo laikotarpiu energijų mainai lokalizuotoje aplinkoje turi didelę įtaką jo tolesniam vystymuisi, augalų tarpusavio kovai už gyvybę, erdvę, energijų mainus, maisto medžiagas ir, be abejo, sėkmingą brandos laikotarpį. Šioje biocenozėje sukurti oro judėjimo greičio, temperatūros, drėgmės, CO₂, O₂ laukai tiesiogiai susiję su augalo maitinimu iš oro (CO₂), metabolitų judėjimu ir augalo energijų mainais su aplinka.

Čia nenumatėme visapusiai išspręsti augalo aplinkoje sukuriama apykaitos su aplinka sluoksnių problemas. Tik konstatuojame faktą, kad tokie sluoksniai augalijoje egzistuoja ir yra labai svarbūs augalo gyvenime jo energinei ir medžiagų apykaitai, produktyvumui.

4.3. Augalo dalių geometrinės formos įtaka jų energinei apykaitai

Augalo formoje atsispindi palankios ir nepalankios augalui augimo ir vystymosi sąlygos, kurios yra augalo kaip organizmo gyvybinės veiklos ontogenezinio ir sezoninio vystymosi rezultatas. Atskirų augalo dalių, atliekančių įvairias funkcijas organizme, geometrinės formos skiriasi. Siekiant suprasti augalo dalių morfogenezinius ir morfologinius dėsningumus, reikia žinoti veiksnius, lėmusius augalo dalių formų susidarymą ir prisitaikymą prie abiotinių ir biotinių veiksnių. Žemiau pateikiame augalo dalių geometrinių formų, kaip abiotinio veiksnio, darančio įtaką augalo energinei apykaitai, augalo dalies temperatūrai, analizę.

Vienodos išorinės geometrinės formos, bet skirtingų geometrinių gabaritų augalo dalyse vienodomis aplinkos sąlygomis kai kada pastebime skirtingas temperatūras. Pateikiame augalo dalies energinio balanso analizę, siekdami išsiaiškinti, kaip augalo dalies geometriniai gabaritai daro įtaką jo temperatūrai.

Imame vienodos geometrinės formos augalo stiebus. Augalo stiebą laikome cilindrinium. Energijų balanso lygtį (1.9) taikome pastovaus režimo sąlygoms, t. y. $Q_1 = const$. Tokiomis sąlygomis augalo stiebo temperatūra tiriamuoju periodu išlieka pastovi, nepasireiškia termoakumulacija $Q_6 = 0$. Tiriamąjį periodą parenkame be rasos susidarymo reiškinių $Q_8 = 0$, atmesdami iš šaknų kylančių augalo sulčių pašildymą $Q_7 = 0$. Tuomet augalo energijų balanso lygtis atrodo taip:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (4.6)$$

Kai skirtingų skersmenų augalo stiebai 1 ir 2 yra vienodi saulės atžvilgiu ($q_1 = \text{const}$), kitos sąlygos nagrinėjamoju periodu taip pat vienodos. Tuomet galime rašyti:

$$\begin{aligned} q_2^{s1} = q_2^{s2} = \text{const}; & \quad q_3^{s1} = q_3^{s2} = \text{const}; \\ q_4^{s1} = q_4^{s2} = \text{const}; & \quad q_5^{s1} = q_5^{s2} = \text{const}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Energijų balanso lygtį (4.6) taikome vienodo ilgio l cm stiebams, kurių skersmuo d skiriasi dydžiu Δd . Pagal Lamberto dėsnį mažesnio skersmens stiebas gaus mažesnę saulės spindulių pavidalo energijos kiekį, kurio dydis $l \Delta d q_1$.

Laikykime, kad augalų kamienų skersmenų skirtumas, kurio dydis Δd , sukelia augalų stiebuose dydžio Δt temperatūrų skirtumą. Taikydami energijų balanso lygtį augalų stiebams, kurių skersmenys d ir $d - \Delta d$, o temperatūros yra atitinkamai t ir $t - \Delta t$, gauname:

$$dlq_1 = \pi dl \alpha^{s1}(t - t_0) + \pi dl q_3^{s1} + \pi dl q_4^{s1} + \pi dl q_5^{s1}; \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} (d - \Delta d)lq_1 = \pi(d - \Delta d)l \alpha^{s2}(t - \Delta t - t_0) + \pi(d - \Delta d)l q_3^{s2} + \\ + \pi(d - \Delta d)l q_4^{s2} + \pi(d - \Delta d)l q_5^{s2}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Lygtį (4.8) padaliję iš dl , o lygtį (4.9) iš $(d - \Delta d)l$, gauname:

$$q_1 = \pi \alpha^{s1}(t - t_0) + \pi q_3^{s1} + \pi q_4^{s1} + \pi q_5^{s1}; \quad (4.10)$$

$$q_1 = \pi \alpha^{s2}(t - \Delta t - t_0) + \pi q_3^{s2} + \pi q_4^{s2} + \pi q_5^{s2}. \quad (4.11)$$

Sulyginę (4.10) ir (4.11) lygties dešiniąsias puses ir suprastinę gauname:

$$\alpha^{s1}(t - t_0) = \alpha^{s2}(t - \Delta t - t_0). \quad (4.12)$$

Kadangi nagrinėjamo augalo stiebų skersmenys d mažai skiriasi (Δd), o aplinkos sąlygos vienodos, šilumos atidavimo koeficientai α bus vienodi, t. y. $\alpha^{s1} = \alpha^{s2} = \alpha = const$. Tai įvertinę ir suprastinę lygtį (4.11) gauname:

$$\alpha \Delta t = 0. \quad (4.13)$$

Kadangi šilumos atidavimo koeficientas $\alpha \neq 0$, tuomet:

$$\Delta t = 0. \quad (4.14)$$

Atlikus augalo stiebų energijų balanso analizę, siekiant išsiaiškinti, kaip augalo dalies geometriniai gabaritai lemia jo temperatūrą, galima teigti, kad tarp augalo stiebų esantis temperatūrų skirtumas nepriklauso nuo jų skersmenų skirtumo.

Atlikus analogišką analizę tarp kitokios geometrinės formos augalo dalių, kurių geometrinė forma vienoda, o dydis mažai skiriasi, kitos sąlygos vienodos, galima konstatuoti, kad temperatūrų skirtumo tarp augalo dalių mažas dydžio skirtumas nesukelia. Jei pastebimas temperatūrų skirtumas tarp vienodos paskirties, vienodos geometrinės formos augalo dalių, priežastis yra kiti veiksniai, bet ne augalo dalies geometrinė forma.

Skirtingose augalo dalyse vyksta skirtingi biologiniai procesai. Sprendžiant iš augalo dalių temperatūros kitimo galima teigti, kad skirtingose augalo dalyse, priklausomai nuo biologinių ir išorinių veiksnių, susiklosto skirtingi energijų balansai. Bandykime išsiaiškinti, kaip augalo dalies geometrinė forma lemia jo energijų balansą, augalo dalies temperatūrą. Tuomet aiškės įvairių augalo dalių geometrinių formų įtaka vykdant biologines funkcijas.

Siekdami supaprastinti sprendimą, schematizuojame procesus, vykstančius įvairiose augalo dalyse. Nagrinėsime augalo dalies energinės apykaitos (temperatūros) priklausomybę nuo jo geometrinės formos.

Imame augalo stiebą (cilindrą), vaisių (rutulį), lapą (plokštelę). Visas kitas sąlygas laikome vienodomis. Esant pastoviam režimui $Q_1 = const$, augalo dalies temperatūra nagrinėjamoju periodu išlieka pastovi $Q_8 = 0$. Periodą parenkame taip, kad $Q_5 = 0$ $Q_6 = 0$ $Q_7 = 0$. Tokiu atveju augalo energijų balanso lygtis būtų tokia:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (4.15)$$

Laikome, kad biologiniai procesai nepriklauso nuo augalo dalies geometrinės formos. Siekdami atsisakyti biologinių procesų įtakos, galime sudaryti tokias lygybes:

$$Q_4^l = Q_4^s = Q_4^v = \text{const}$$

arba

$$q_4^l = q_4^s = q_4^v = \text{const}. \quad (4.16)$$

čia l, s, v – atitinkamai augalo lapas, stiebas, vaisius.

Augalo dalies geometrinė forma ir dydis turi įtakos augalo apykaitos su aplinka sluoksniui, kuris turi poveikį transpiracijai, susidarymui. Nagrinėdami nelokalius transpiracijos dydžius, naudodamiesi vidutinėmis reikšmėmis, galime žiūrėti į transpiraciją kaip dydį, nepriklausomą nuo augalo dalies geometrinės formos. Tokiu atveju, neatsižvelgdami į priklausomumą nuo transpiracijos, galime užrašyti tokią lygybę:

$$q_3^l = q_3^s = q_3^v = \text{const}. \quad (4.17)$$

Biologinių procesų intensyvumas skirtingose augalo dalyse (lape, stiebe, vaisiuje) niekada nebus vienodas. Taip pat bus nevienodas biologinių procesų rezultatas, darantis įtaką augalo dalies temperatūrai. Daromos prielaidos, kurios aprašomos (4.16), (4.17) lygtimis, yra galimos tik nagrinėjant augalo geometrinės formos įtaką augalo energinei apykaitai. Augalo energijų balansą, aprašomą (4.15) lygtimi, galime išskleisti ir pateikti šiomis lygtimis:

$$\text{lapo} \quad Fq_1 = 2F\alpha^l(t^l - t_0) + 2Fq_3^l + 2Fq_4^l; \quad (4.18)$$

$$\text{stiebo} \quad dlq_1 = \pi d l \alpha^s (t^s - t_0) + \pi d l q_3^s + \pi d l q_4^s; \quad (4.19)$$

$$\text{vaisiaus} \quad 0,25\pi d_1^2 q_1 = \pi d_1^2 \alpha^v (t^v - t_0) + \pi d_1^2 q_3^s + \pi d_1^2 q_4^v. \quad (4.20)$$

čia: $\alpha^l, \alpha^s, \alpha^v$ – šilumos atidavimo koeficientai atitinkamai lapo, stiebo, vaisiaus, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$;

t^l, t^s, t^v – temperatūra atitinkamai lapo, stiebo, vaisiaus, $^\circ\text{C}$;

d, d_1 – skersmuo atitinkamai stiebo, vaisiaus, m ;

l – tiriamas stiebo ilgis, m .

Suprastinę ir sutvarkę (4.18), (4.19), (4.20) lygtis gauname šias energijų balanso lygtis:

$$\text{lapas} \quad \alpha^l(t^l - t_0) = 0,5q_1 + q_3^l + q_4^l; \quad (4.21)$$

$$\text{stiebas} \quad \alpha^s(t^s - t_0) = \frac{l}{\pi} q_1 + q_3^s + q_4^s; \quad (4.22)$$

$$\text{vaisius} \quad \alpha^v(t^v - t_0) = 0,25q_1 + q_3^s + 2q_4^v. \quad (4.23)$$

Nagrinėjamo augalo lapo, stiebo, vaisiaus aplinkos sąlygos yra vienodos. Šilumos atidavimo koeficientai α^l , α^s , α^v priklauso nuo augalo dalies dydžio. Skaičiavimai rodo, kad oro temperatūrai esant 15 °C, vėjo greičiui 1,5 m/s, kai lapo plokštelės ilgis 60 mm, stiebo skersmuo 25 mm, vaisiaus skersmuo 66 mm, šilumos atidavimo koeficientai yra vienodi $\alpha^l = \alpha^s = \alpha^v = 0,00176 \text{ J/ (m}^2\text{sK)}$. Laikydami šios sąlygos, remdamiesi (4.21), (4.22), (4.23) lygtimis, galime sudaryti tokias lygtis:

$$t^l - t^s = 0,1817 \frac{q_1}{\alpha}; \quad (4.24)$$

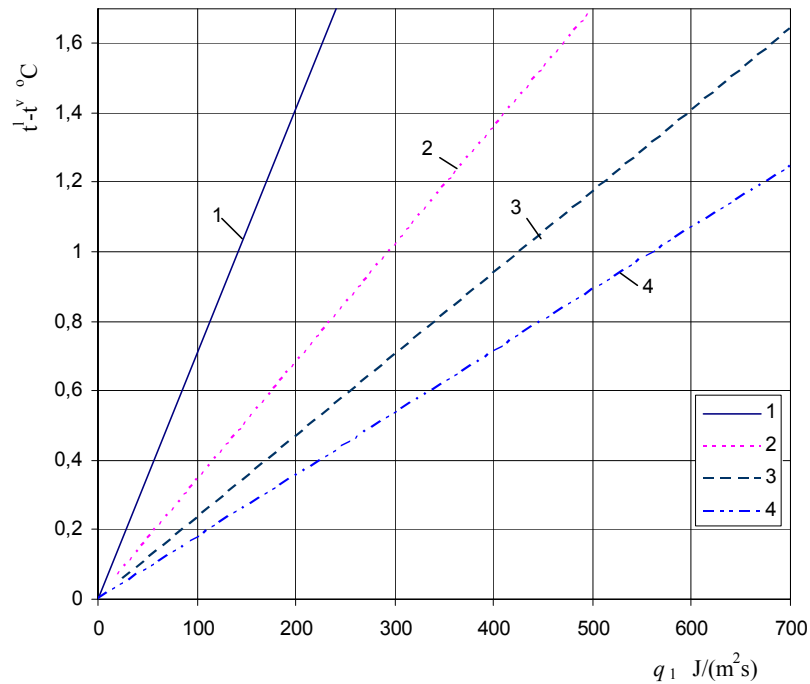
$$t^l - t^v = 0,25 \frac{q_1}{\alpha}; \quad (4.25)$$

$$t^s - t^v = 0,0683 \frac{q_1}{\alpha}. \quad (4.26)$$

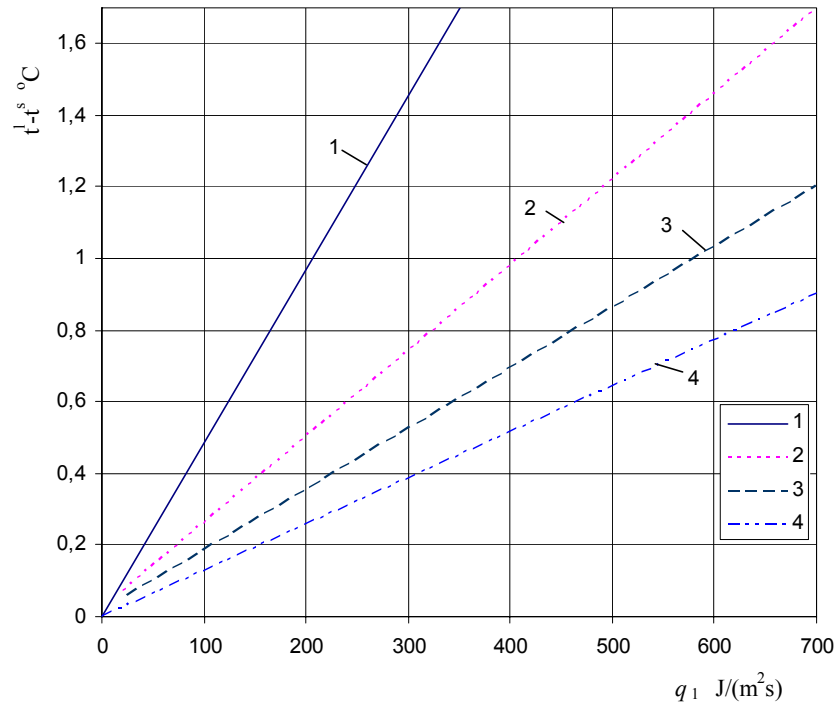
Pagal (4.24), (4.25) ir (4.26) lygtis galima daryti išvadą, kad augalo dalies geometrinė forma daro įtaką augalo energijų balansui, kuris sukelia skirtingus augalo dalies temperatūros pokyčius. Vien tik dėl geometrinės formos atskiros augalo dalys gauna nevienodą saulės energijos kiekį augalo dalies paviršiaus ploto vienetui. Iš lygčių (4.24), (4.25) ir (4.26) matome, kad skirtingų geometrinių formų dviejų augalo dalių temperatūrų skirtumas bus tuo didesnis, kuo daugiau augalo dalis absorbuos saulės energijos q_1 ir turės mažesnę šilumos atidavimo koeficientą α (mažiau atiduos šilumos aplinkai konvekcinių šilumos mainų būdu).

Lygtys (4.24), (4.25) ir (4.26) rodo, kad priklausomai tik nuo augalo dalies geometrinės formos, lapo temperatūra bus didesnė už stiebo ir vaisiaus temperatūrą, stiebo temperatūra – didesnė už vaisiaus temperatūrą. Natūraliomis aplinkos sąlygomis, taip pat ir polietileniniuose šiltnamiuose, lapo temperatūra atitinkamai bus žemesnė už stiebo ir vaisiaus

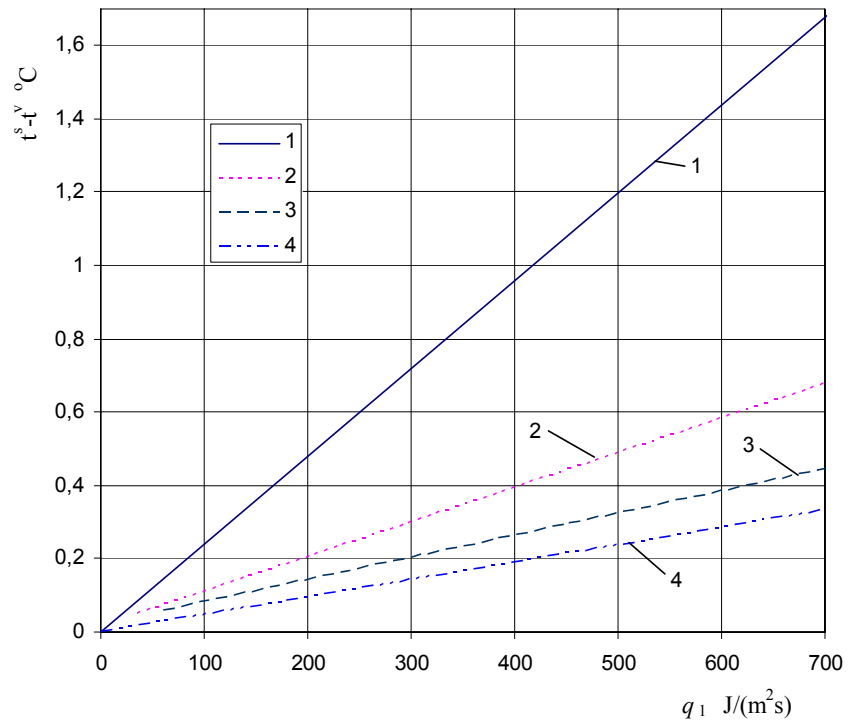
temperatūrą. Todėl radiacinė šalna pirmiausia palies lapus. Iš 4.9, 4.10, 4.11 pav. pateiktų duomenų matome, kad saulėtu paros metu, vien tik dėl geometrinių formų skirtumo augalo dalių temperatūrų skirtumas siekia iki 1–2 °C. Kai kurių sukulentų ir kserofitų dalių rutuliška ir cilindrinė forma yra vienas iš prisitaikymo prie nepalankių aplinkos sąlygų veiksnių. Kai kurie kserofitai turi lapus, tačiau jų geometrinė forma kinta (lapai gali susisukti įgydami vamzdžio formą) priklausomai nuo saulės spinduliavimo intensyvumo ir drėgmės režimo.



4.9 pav. Augalo lapo ir vaisiaus temperatūrų skirtumo $t^l - t^v$, kuri sukelia augalo dalių geometrinė forma, priklausomybė nuo absorbuojamo saulės energijos srauto tankio q_1 , ir šilumos atidavimo koeficiento α : 1 kreivė – kai $\alpha = 0,0005$ W/(cm²·K); 2 kreivė – kai $\alpha = 0,0010$ W/(cm²·K); 3 kreivė – kai $\alpha = 0,0015$ W/(cm²·K); 4 kreivė – kai $\alpha = 0,0020$ W/(cm²·K)



4.10 pav. Augalo lapo ir stiebo temperatūrų skirtumo $t^l - t^s$, kurį sukelia augalo dalių geometrinė forma, priklausomybė nuo absorbuojamo saulės energijos srauto tankio q_1 , ir šilumos atidavimo koeficiento α : 1 kreivė – kai $\alpha = 0,0005 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$; 2 kreivė – kai $\alpha = 0,0010 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$; 3 kreivė – kai $\alpha = 0,0015 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$; 4 kreivė – kai $\alpha = 0,0020 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$.



4.11 pav. Augalo stiebo ir vaisiaus temperatūrų skirtumo $t^s - t^v$, kurį sukelia augalo dalių geometrinė forma, priklausomybė nuo absorbuojamo saulės energijos srauto tankio q_1 ir šilumos atidavimo koeficiento α : 1 kreivė – kai $\alpha = 0,0005$ W/(cm²·K); 2 kreivė – kai $\alpha = 0,0010$ W/(cm²·K); 3 kreivė – kai $\alpha = 0,0015$ W/(cm²·K); 4 kreivė – kai $\alpha = 0,0020$ W/(cm²·K)

Augalo dalies geometrinė forma daro įtaką jo energinei apykaitai. Skirtinga augalo geometrinė forma yra viena iš priežasčių, sukeliančių nevienodas temperatūras skirtingos geometrinės formos augalo dalyse.

4.4. Augalo dalių temperatūros kitimo dėsningumai

Augalo dalies temperatūra yra augale vykstančių biologinių procesų ir jo energinės apykaitos su aplinka rezultatas. Saulėtu paros metu augalo dalies ir jo atskirų dalelių temperatūra yra kintanti. Jų temperatūros dinamiką nusako tam tikro momento augalo dalies ar dalelės energijų balansas. Augalo dalies temperatūros kitimas, kaip dinaminio energijų balanso išraiška, pasireiškia per termoakumuliacijos procesą, kuris sukelia augalo dalies temperatūros kitimą, kartu ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka Q_2 intensyvumo pokyčius.

Augalo dalies temperatūra, išskyrus perėjimo momentus iš teigiamo į neigiamą (arba atvirkščiai) temperatūros gradientą, visuomet skiriasi nuo aplinkos temperatūros. Nuo augalo audinių temperatūros priklauso visi augale vykstantys biologiniai procesai, todėl augalo ir jo aplinkos temperatūra turi ypatingą reikšmę teoriniams ir taikomiesiems augalijos mokslams.

Augalo temperatūrą galime rasti naudodami augalo energijų balanso lygtį (1.9). Augalo audinių temperatūra t_1 nustatoma iš augalo energijų balanso Q_2 ir Q_6 narių. Q_2 apibūdina augalo dalies konvekcinius šilumos mainus su aplinka, o Q_6 įvertina augalo dalies termoakumuliaciją. Naudojantis augalo energijų balanso lygtimi galima būtų apskaičiuoti lokalią augalo audinių temperatūrą. Tačiau tai atlikti neįmanoma, nes reikia daug augalo audinių fizikinių, fiziologinių ir augalo aplinkos fizikinių parametrų, kurie dažniausiai yra nežinomi ir sunkiai nustatomi. Antras būdas augalo temperatūrai nustatyti yra eksperimentinis – tiesioginis augalo audinių temperatūros matavimas.

Tiesioginiai augalo audinių temperatūros matavimai nuo seno domina mokslininkus (Lamark, 1777^{*}; Van Beek, Bergsam, 1838^{**}; E. Askenasy, 1875). Mokslininkai augalo audinių temperatūra domisi ne tik natūraliomis aplinkos sąlygomis bet ir kosminėje erdvėje pakitus gravitacinėms jėgoms (Kitaya, 2003). Tačiau augalo dalių, ypač plonų jo lapų temperatūros matavimas yra sudėtinga ne tik biologinė, bet ir termofizikinė problema. Problemiškas augalo temperatūros matavimo duomenų tikslumas ir jo metodinių matavimo paklaidų įvertinimas fiziologiniu ir

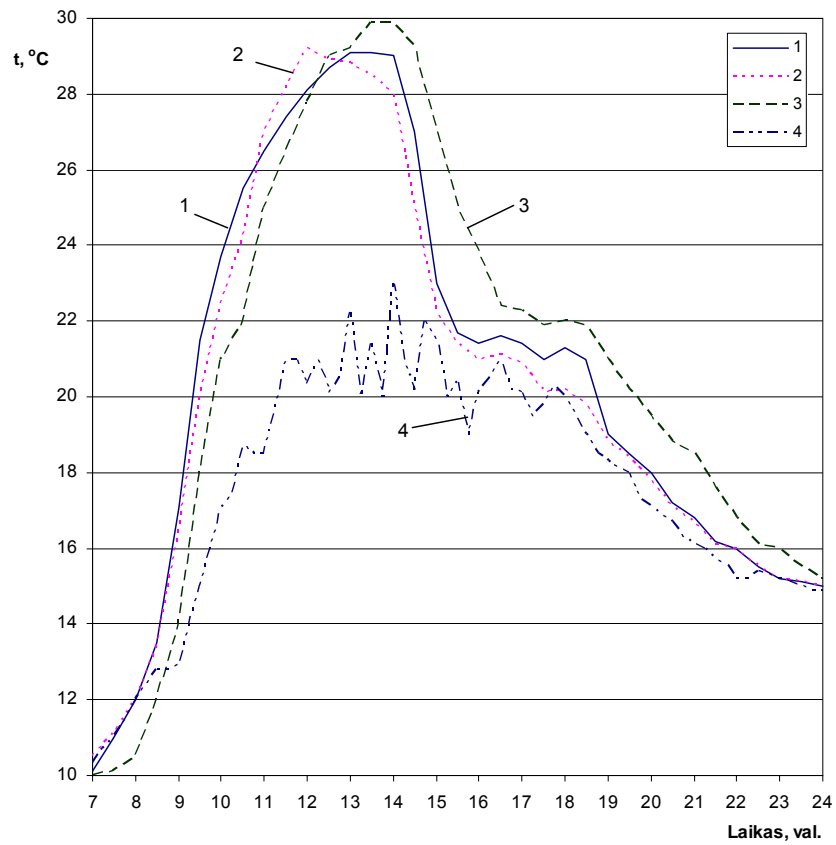
* Cituojama pagal Weevers, 1949

** Соколовская, 1933

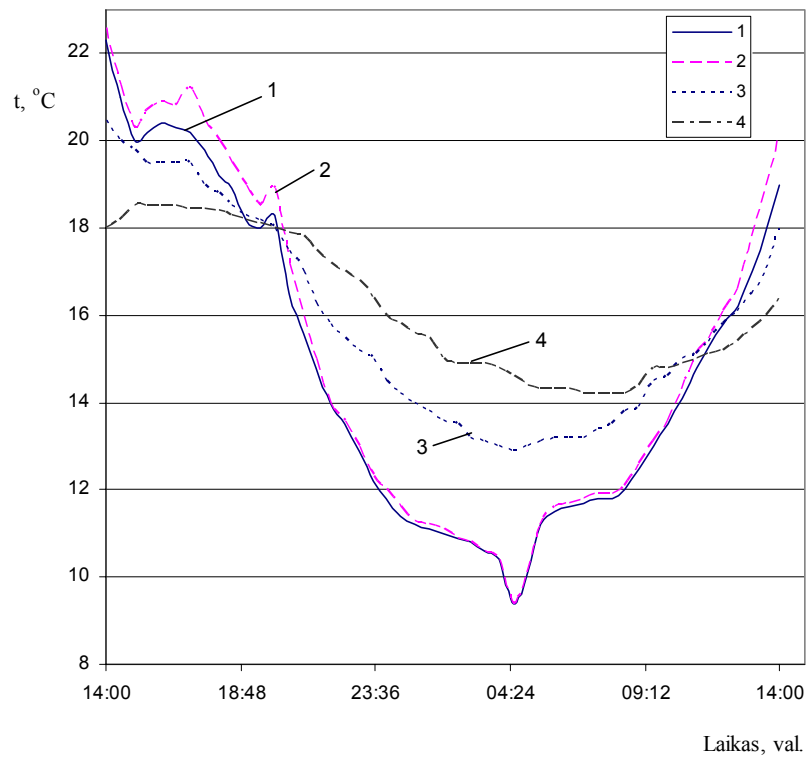
termofizikiniu požiūriu. Turėdami daugiau kaip 40 metų augalų ir jų aplinkos temperatūrų matavimo teorinę ir eksperimentinę patirtį, drįstame žemiau pateikti šių matavimų duomenis ir jų vertinimą.

Augalo dalies temperatūra yra jo energijų balanso, kuri nusako (1.9) lytis, rezultatas, tyrėjo išmatuojamas tiesioginiu būdu, naudojant fizikinius temperatūros matavimo metodus. Čia ypatingas vaidmuo tenka augalo aplinkos temperatūrai. Augalo dalies paviršiaus ir jį supančios natūralios aplinkos temperatūrų skirtumas retai kada būna didesnis kaip 10 °C. Kai kuriais atvejais augalo dalies audinių temperatūra, priklausomai nuo jo masės ir matmenų, gali siekti iki 30 °C (pvz., obels stiebo saulėtą ankstyvo pavasario dieną). Naudojant piktžolių terminio naikavimo technologijas, priklausomai nuo aplinkos, šie temperatūrų skirtumai siekia 80–500 °C. Taigi išskyla augalo audinių, taip pat augalo ir jo aplinkos temperatūrų skirtumo matavimo ir vertinimo būtinybę. Kintančių energinių procesų analizė augalo aplinkoje, neįvertinus augalo ir aplinkos temperatūrų skirtumo ir augalo dalių temperatūrų gradiento, dažnai neatskleidžia energinės apykaitos procesų esmės ir praranda prasmę. Augalo ir aplinkos temperatūros gradientus natūraliomis sąlygomis plačiai nagrinėjo S. Radčenko.

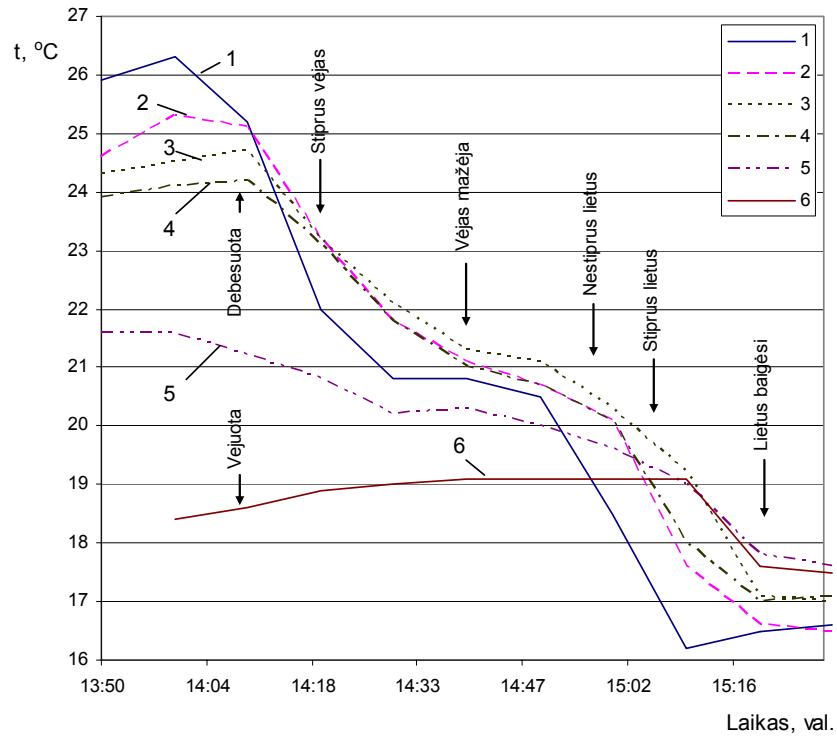
Egzoterminiai procesai, vykstantys augalo dalyse, mažai daro įtakos augalo dalies šiluminiam režimui, jo lokalinei temperatūrai. Todėl priimta laikyti, kad augalai yra poikiloterminiai organizmai, t. y. augalo dalių temperatūros kitimas vyksta pagal aplinkos temperatūrą. Natūraliomis sąlygomis aplinkos oro ir dirvos temperatūra kinta laike ir erdvėje. Tai rodo, kad kiekviena augalo dalis ar jo lokali vieta (stiebo), būdama skirtingose aplinkose ir skirtinguose erdvės taškuose patiria nevienodą aplinkos terminį poveikį. Apskritai augale vyksta nevienoda energinė apykaita, audiniai įgyja nevienodą lokalią temperatūrą. Stebint augalo temperatūros kitimo įvairovę galima pastebėti ir kai kuriuos temperatūrų kitimo dėsningumus. Augalo antžeminėje dalyje, t. y. pomidoro stiebo ir vaisiaus temperatūros kitimas pomidorų lauke pateiktas 4.12 pav. Šaknies ir stiebo, esančio dirvos paviršiuje, temperatūros kitimas pomidorų lauke pateiktas 4.13 pav. Eksperimentinių tyrimų rezultatuose visuomet aiškiai matyti termoakumuliacija, pasireiškianti temperatūros kitimo nuoseklumu, atsako į veiksnį vėlavimu.



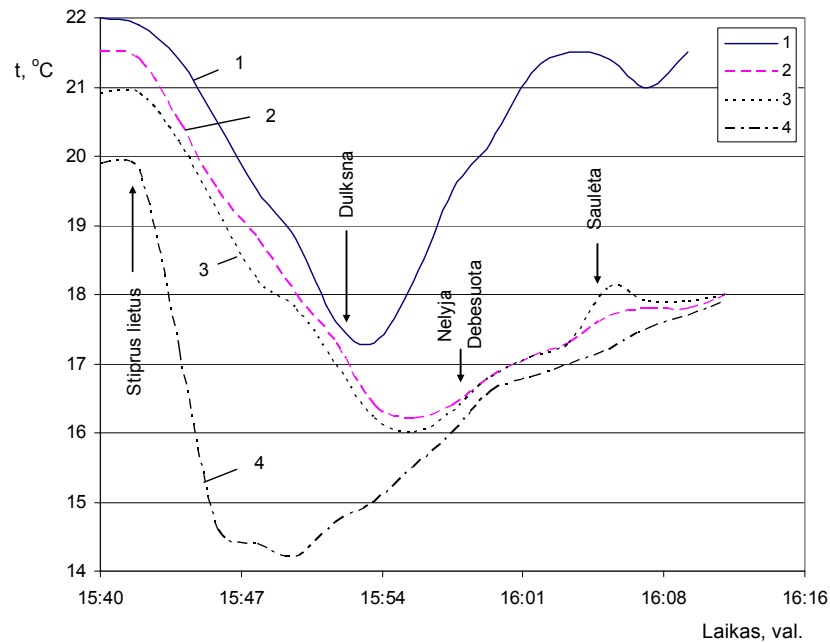
4.12 pav. Pomidoro stiebo ir vaisiaus temperatūros kitimas pomidorų lauke: 1, 2 – pomidoro stiebo centrinės dalies temperatūra atitinkamai 500 ir 300 mm aukštyje virš dirvos paviršiaus; 3 – pomidoro vaisiaus centrinės dalies temperatūra 300 mm virš žemės paviršiaus; 4 – oro temperatūra virš žemės paviršiaus 300 mm aukštyje



4.13 pav. Pomidoro šaknies ir stiebo, esančių dirvos paviršiuje, temperatūros kitimas: 1, 2, 3 – pomidoro stiebo centrinės dalies temperatūra atitinkamai 530, 320 ir 10 mm aukštyje virš dirvos paviršiaus; 4 – šaknies centrinės dalies temperatūra 50 mm gylyje nuo dirvos paviršiaus



4.14 pav. Trumpalaikio stipraus vėjo ir lietaus poveikis augalo stiebui ir šakniam: 1, 2, 3, 4, 5 – pomodoro stiebo centrinės dalies temperatūra atitinkamai 1190, 690, 530, 320 ir 10 mm aukštyje nuo dirvos paviršiaus; 6 – šaknies centrinės dalies temperatūra 50 mm gylyje nuo dirvos paviršiaus



4.15 pav. Trumpalaikio staigaus lietaus poveikis augalo stiebui: 1, 2 – pomidoro stiebo centrinės dalies temperatūra atitinkamai 1080 ir 1000 mm aukštyje nuo dirvos paviršiaus; 3 – plono šoninio pomidoro stiebelio temperatūra 900 mm aukštyje nuo dirvos paviršiaus; 4 – oro temperatūra 300 mm aukštyje nuo dirvos paviršiaus

Augalo audinių temperatūros pokyčius pastebime pasireiškus stipriam išoriniam veiksniui (staigiam vėjo sukuriui, staigiam lietaui, oro srautui šiltnamiuose, augalų laistymui), sukeliančiam esminius augalo dalies energijų balanso pokyčius. Nemaži augalo dalies temperatūros pokyčiai pastebimi saulėtu paros metu (4.14 ir 4.15 pav.).

5 Augalų energinė apykaita kintančio energijų balanso būsenoje

5.1. Augalo energinės apykaitos kitimas kintant augalo aplinkos temperatūrai

Pagal 4.4 skyriuje pateiktus temperatūros matavimų duomenis galima teigti, kad natūralioje aplinkoje augalo energijų apykaita yra nuolat kintanti. Energijų balanso dinamiškumas tarp augalo (atskirų jo dalių) ir jo aplinkos ypač ryškus saulėtu paros metu, taip pat staigiai kintant augalo aplinkos sąlygoms. Nuolatinis aplinkos oro parametrų kitimas sukelia lokalių augalo dalių energijų balanso pokyčius. Augalo energijų balanso dinaminį kitimą saulėtu paros metu sukelia ir lokali os oro temperatūros svyravimai jo aplinkoje. Augalo energinės apykaitos su aplinka procesas tampa dar sudėtingesnis, kai tenka įvertinti oro svyravimus hidrodinamiame augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksnyje. Visa tai atspindi lokali os augalo dalies temperatūra ir augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka nepastovumas, kuris sukelia augalo energijų apykaitos balanso kaitą.

Kintant augalo aplinkos temperatūrai galimi trys augalo energinės apykaitos atvejai. Oro temperatūros svyravimai (t_0) gali vykti esant neigiamam ($t_1 > t_0$), teigiamam ($t_0 > t_1$) ir kintamam ($t_1 > < t_0$) temperatūros gradientui. Temperatūros gradiento tarp augalo ir aplinkos ženklas (– arba +) parodo šilumos (energijos) srauto kryptį. Kai augalas šilumą (energiją) atiduoda aplinkai, temperatūros gradientas neigiamas, kai ją gauna – teigiamas.

1 atvejis. Aplink augalą esančio oro temperatūros svyravimai vyksta neigiamo temperatūros gradiento srityje, t. y. augalo dalies temperatūra t_1 nekinta ir yra aukštesnė už jį supančio oro t_0 temperatūrą

($t_1 > t_0$). Šiuo atveju augalas atiduoda aplinkai šilumą Q_2 . Šioje augalo energinės apykaitos srityje galioja tokia energijų balanso lygtis:

$$Q_3 = Q_1 - Q_2. \quad (5.1)$$

Nagrinėjamoju atveju (esant augalą supančio oro temperatūros svyravimams) augalo energijų apykaitos procesai vyksta pirmoje augalo energijų apykaitos srityje (2.29, 2.30 ir 2.31 pav.). Augalo absorbuojamos saulės energijos srautas Q_1 sunaudojamas transpiracijai Q_3 ir konveciniams šilumos mainams Q_2 su aplinka. Transpiracijos skaičius S_k kinta $0 < S_k < +\infty$ ribose, esant neigiamam temperatūros gradientui ($t_1 > t_0$).

2 atvejis. Augalą supančio oro temperatūra svyruoja teigiamo temperatūros gradientu ($t_0 > t_1$) srityje, t. y. kai augalo dalies temperatūra t_1 nekinta ir yra žemesnė už jį supančio oro temperatūrą t_0 . Šiuo atveju augalo aplinka tiekia šilumą augalui Q_2 . Šioje srityje galioja tokia augalo energijų balanso lygtis:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2. \quad (5.2)$$

Nagrinėjamoju oro temperatūros svyravimų atveju augalo energijų apykaitos procesai vyksta antroje augalo energijų apykaitos srityje (2.29, 2.30 ir 2.31 pav.). Augalas transpiracijai sunaudoja visą absorbuotą saulės energiją Q_1 ir energiją, kurią gauna iš aplinkos konvekcinių šilumos mainų būdu Q_2 . Transpiracijos skaičius S_k kinta $1 < S_k < +\infty$ ribose, esant teigiamam temperatūros gradientui ($t_0 > t_1$).

3 atvejis. Augalą supančio oro temperatūra svyruoja teigiamo ($t_0 > t_1$) ir neigiamo ($t_1 > t_0$) temperatūros gradientų srityse. Šiuo atveju augalo dalį supančio oro temperatūra t_0 kinta ribinio atvejo srityje, kai augalo dalies temperatūra lygi aplinkos temperatūrai $t_1 = t_0 = const$. Augalą supančio oro temperatūra kinta: būna ir žemesnė ($t_1 > t_0$), ir aukštesnė ($t_0 > t_1$) už augalo dalies temperatūrą t_1 (2.29, 2.30 ir 2.31 pav.). Nagrinėjamoju oro temperatūros svyravimų atveju augalo energijų balansas yra kintantis, išreiškiamas trimis augalo energijų balanso lygtimis:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2; \quad (5.3)$$

$$Q_3 = Q_1, \text{ nes } Q_2 = 0; \quad (5.4)$$

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 \quad (5.5)$$

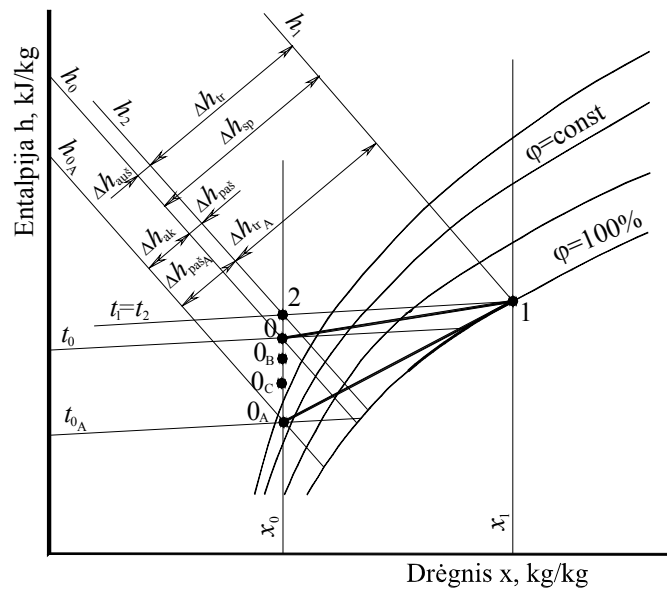
Lygtis (5.3) taikoma energinės apykaitos momentui, kai augalą supančio oro temperatūros svyravimų banga yra teigiamo temperatūros gradiento ($t_0 > t_1$) srityje. Lygtis (5.4) taikoma energinės apykaitos momentui, kai augalą supančio oro temperatūra t_0 lygi augalo dalies temperatūrai t_1 , nėra temperatūros gradiento ($t_1 = t_0$), todėl $Q_2 = 0$. Lygtis (5.5) taikoma energinės apykaitos momentui, kai augalą supančio oro temperatūros svyravimų banga yra neigiamo temperatūros gradiento ($t_1 > t_0$) srityje.

Nagrinėjamoju atveju transpiracijos skaičius S_k kinta $0 < S_k < +\infty$ ribose, esant neigiamam temperatūros gradientui ($t_1 > t_0$) ir $1 < S_k < +\infty$ ribose, esant teigiamam temperatūros gradientui ($t_0 > t_1$). Šie procesai vyksta antros ir trečios augalo energijų apykaitos periodų sandūroje, kai transpiracijos skaičius $S_k = +\infty$, $t_1 = t_0$, keičiasi konvekcinių šilumos mainų ($Q_2 = 0$) srauto kryptis (2.29, 2.30 ir 2.31 pav.).

Žemiau pateikiame aukščiau aptartų augalo energinės apykaitos procesų analizę $h-x$ diagramoje.

I atvejis. Augalą supančio oro temperatūros svyravimai vyksta neigiamo temperatūros gradiento ($t_1 > t_0$) srityje. Esant šioms augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka sąlygoms, augalo dalies temperatūra t_1 visais atvejais yra didesnė už jį supančio oro t_0 temperatūrą. Siekdami supaprastinti augalo energinės apykaitos nagrinėjimą laikome, kad augalo lapo temperatūra t_1 yra pastovi. Kinta aplinkos temperatūra t_0 . Augalo energinės apykaitos procesą 1–0, naudodamiesi anksčiau aptarta metodika ir analizės taisyklėmis (2.10 pav.), pateikiame $h-x$ diagramoje (5.1 pav.). Augalą supančios oro temperatūros kitimas temperatūros impulso metu gali būti prilygintas oro pašildymo ir atšaldymo procesui. Oro temperatūra šio proceso metu kinta, esant pastoviam oro drėgnumui $x_0 = const$. Nagrinėjamoju atveju staigus oro temperatūros mažėjimas aplinkoje vyksta iš laisvai pasirinkto pradinio 0 taško per tarpinius 0_B , 0_C taškus ir patenka į žemiausios temperatūros kraštinę 0_A padėtį. Sujungę 0

ir 0_A taškus su 1 tašku, gauname kraštines, t. y. augalo energinės apykaitos procesų padėtis 1–0 ir 1– 0_A (5.1 pav.) šio temperatūros impulso metu.



5.1 pav. Augalo energinės apykaitos procesų, kai augalą supančio oro temperatūra svyruoja neigiamo temperatūros gradiento srityje ($t_1 > t_0$), schema h – x diagramoje

Nustatome augalo energinės apykaitos procesų 1–0 ir 1– 0_A minimalų būtiną oro kiekį, dalyvaujantį transpiracijos procese $G_{1\text{min}}$. Kaip matome iš (2.14) lygties, $G_{1\text{min}}$ priklauso nuo oro drėgnių x_1 ir x_0 skirtumo. Iš 5.1 pav. pateiktos augalą supančio oro temperatūros svyravimų schemos neigiamo temperatūros gradiento srityje h – x diagramoje matome, kad oro drėgnių skirtumai yra lygūs, t. y. $x_1 - x_{0A} = x_1 - x_0$. Tai įvertinę gauname:

$$G_{1\text{min}} = \frac{1}{x_1 - x_0} = \frac{1}{x_1 - x_{0A}} = \text{const.} \quad (5.6)$$

Matome (2.129), kad augalo energinės apykaitos procesuose 1–0 ir 1–0_A dalyvauja vienodas minimalus aplinkos oro kiekis $G_{1\min} = G_{1\min A}$.

Augalo energinės apykaitos procesų 1–0 ir 1–0_A analizė $h-x$ diagramoje (2.51 pav.) rodo, kad $\Delta h_{tr} = \Delta h_{trA}$. Šis entalpijų skirtumas Δh parodo, kad procesuose 1–0 ir 1–0_A transpiracijai sunaudojamas šilumos (energijos) kiekis yra vienodas. Vadinasi, procesų 1–0 ir 1–0_A transpiracijos intensyvumas vienodas.

Žinodami (5.6), kad $G_{1\min} = G_{1\min A}$, iš lygties (2.21) nustatome minimalų šilumos kiekį Q_2 , kuris sunaudojamas transpiracijos proceso metu aplinkos orui šildyti $Q_{2\min}^{paš}$, augalui išgarinant 1 kg drėgmės procesų 1–0 ir 1–0_A metu:

$$Q_{2\min}^{paš} = \Delta h_{paš} G_{1\min}. \quad (5.7)$$

Iš augalo energinės apykaitos schemas $h-x$ diagramoje (2.51 pav.) matome, kad energija, sunaudojama šilumos mainams su aplinka $Q_{2\min}^{paš}$, procesuose 1–0 ir 1–0_A yra nevienoda, nes $\Delta h_{pašA} > \Delta h_{paš}$. Vadinasi, procesuose 1–0 ir 1–0_A šilumos kiekis, sunaudojamas orui šildyti, yra nevienodas $Q_{2\min A}^{paš} > Q_{2\min}^{paš}$. Tai yra todėl, kad oro masė $G_{1\min}$ procese 1–0 šildoma nuo t_0 iki t_1 ($t_0 - t_1$), o procese 1–0_A ta pati oro masė $G_{1\min}$ šildoma nuo žemesnės temperatūros t_{0A} iki tos pačios temperatūros t_1 ($t_{0A} - t_1$), ir tam sunaudojama daugiau šilumos. Augalo energijų apykaitos procesuose 1–0 ir 1–0_A saulės energijos srautas ($Q_1 = \text{const}$) yra pastovus. Todėl papildomą energijos kiekį, sunaudojamą orui šildyti arba aušinti, turi teikti augalo audinių sukauptą šilumą Q_{ak} . Išreiškę augalo lapo energijų balansą entalpijų skirtumu (5.1 pav.), gauname:

$$\Delta h_{pašA} = \Delta h_{paš} + \Delta h_a. \quad (5.8)$$

Proceso 1–0 augalo energijų balanso lygtį (5.1) sudarome per entalpijų pokyčius:

$$\Delta h_{sp} = \Delta h_{tr} + \Delta h_{paš}. \quad (5.9)$$

Proceso 1–0_A augalo energijų balanso lygtį (5.1) sudarome per entalpijų pokyčius:

$$\Delta h_{sp} = \Delta h_{spA} = \Delta h_{trA} + \Delta h_{pašA} = \Delta h_{tr} + \Delta h_{paš} + \Delta h_{ak}. \quad (5.10)$$

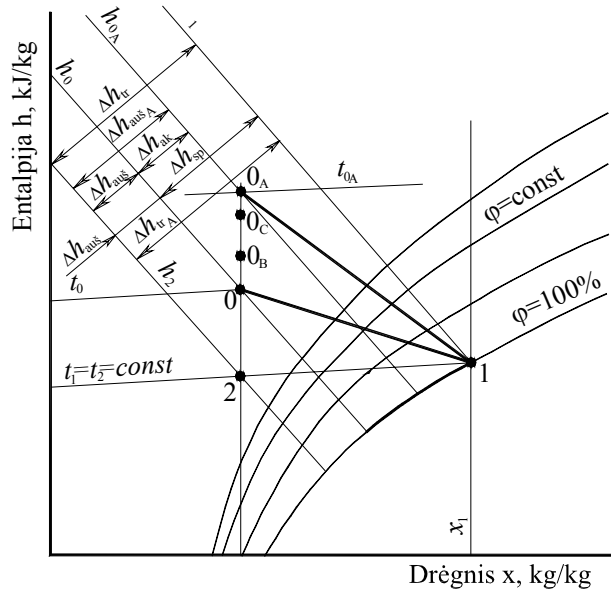
Iš lygčių (2.132) ir (2.133) matome, kad jos skiriasi nariu Δh_{ak} , kuris įvertina augalo audinių termoakumuliaciją entalpijų skirtumu Δh_{ak} (5.1 pav.).

Transpiracijos skaičių S_k randame iš (2.24) ir (2.25) lygčių. Matome, kad augalą supančio oro temperatūros svyravimai sukelia transpiracijos skaičiaus S_k kaitą, nes esant pastoviam transpiracijos intensyvumui $Q_3 = \Delta h_{tr} = const$, kinta konvekciniai šilumos mainai su aplinka $Q_{2minA}^{pas} > Q_{2min}^{pas}$.

Apibendrinant šį augalo energinės apykaitos atvejį, kai esant pastoviai augalo temperatūrai $t_1 = const$, jį supa svyruojančios temperatūros aplinkos oras neigiamo temperatūros gradiento srityje (kai augalo lapo temperatūra didesnė už aplinkos temperatūrą ($t_1 > t_0$)), transpiracijos proceso intensyvumas nekinta. Kinta tiksliai augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumas, pasireiškiant jo audinių termoakumuliacijai. Augalo audinių termoakumuliacija sukelia temperatūros pokyčius augalo audiniuose. Vadinasi, augalą supančio oro temperatūros svyravimai neigiamo temperatūros gradiento srityje sukelia temperatūros svyravimus augalo audiniuose. Kintant augalo audinių temperatūrai kinta konvekciniai šilumos mainai su aplinka, kinta transpiracijos skaičius S_k , esant vienodam transpiracijos intensyvumui.

2 atvejis. Augalą supančio oro temperatūros svyravimai vyksta teigiamo temperatūros gradiento srityje. Augalo energinės apykaitos procesai su aplinka vyksta, kai augalo lapo temperatūra t_1 būna mažesnė už jį supančio oro t_0 temperatūrą ($t_0 > t_1$). Aplinkos oras konvekcinių šilumos mainų būdu tiekia šilumą augalui. Nagrinėsime atvejį, kai augalo lapo temperatūra t_1 pastovi, o aplinkos temperatūra t_0 kinta. Augalo energinės apykaitos procesą 1–0, naudodamiesi anksčiau aptarta metodika ir analizės taisyklėmis (2.14, 2.15 ir 2.16 pav.), pateikiame $h-x$ diagramoje (5.2 pav.). Augalą supančio oro temperatūros kitimas (temperatūros impulso metu) yra oro pašildymo ir atšaldymo procesas. Šiame procese oro temperatūra kinta esant pastoviam drėgniui $x_0 = const$. Staigus aplinkos temperatūros kitimas (temperatūros impulso metu) vyksta per

tarptinius 0_B , 0_C taškus ir patenka į kraštinę kintančios temperatūros impulso 0_A padėtį. Gauname kraštinės augalo energinės apykaitos proceso padėtis 1–0 ir 1– 0_A h – x diagramoje temperatūros impulso metu (5.2 pav.).



5.2 pav. Augalo energinės apykaitos procesų, kai augalą supančio oro temperatūra svyruoja teigiamo temperatūros gradiento srityje ($t_1 < t_0$), schema h – x diagramoje

Pasinaudoję aukščiau nagrinėto atvejo duomenimis ir (5.6) lygtimi teigiame, kad nagrinėjamoju atveju augalo energinės apykaitos procesuose 1–0 ir 1– 0_A taip pat dalyvauja vienodas minimalus aplinkos oro kiekis $G_{1\min} = G_{1\min A}$, nes $x_1 - x_0 = x_1 - x_{0A}$.

Augalo energinės apykaitos procesų 1–0 ir 1– 0_A analizė h – x diagramoje (5.2 pav.) rodo, kad $\Delta h_{tr} = \Delta h_{tr A}$. Šis entalpijų skirtumas Δh parodo, kad procesuose 1–0 ir 1– 0_A transpiracijai sunaudojamas šilumos (energijos) kiekis taip pat yra vienodas kaip ir neigiamo temperatūros gradiento atveju. Vadinasi, procesų 1–0 ir 1– 0_A transpiracijos intensyvumas yra vienodas.

Žinodami (5.6), kad $G_{1\min} = G_{1\min A}$, iš lygčių (2.42) ir (2.43) nustatome minimalų šilumos kiekį $Q_{2\min}^{aus}$, kurį atiduoda aplinkos oras augalui išgarinant 1 kg drėgmės (transpiracijos proceso metu) procesų 1–0 ir 1–0_A metu:

$$Q_{2\min}^{aus} = (h_0 - h_2)G_{1\min} = \Delta h_{aus} G_{1\min}. \quad (5.11)$$

Iš augalo energinės apykaitos schemos $h-x$ diagramoje (5.2 pav.) matome, kad energija, kurią aplinkos oras atiduoda augalui konvekcinių šilumos mainų būdu $Q_{2\min}^{aus}$, procesuose 1–0 ir 1–0_A yra nevienoda, nes $\Delta h_{ausA} > \Delta h_{aus}$. Vadinasi, procesų 1–0 ir 1–0_A šilumos kiekis, kurį atiduoda oras augalui, yra nevienodas $Q_{2\min A}^{aus} > Q_{2\min}^{aus}$. Tai yra todėl, kad proceso 1–0 metu oro masė $G_{1\min}$, atiduodama šilumą augalui, atšąla nuo t_0 iki t_1 ($t_0 - t_1$), o proceso 1–0_A metu ta pati oro masė atšąla nuo aukštesnės temperatūros t_{0A} iki tos pačios t_1 ($t_{0A} - t_1$), atiduodama daugiau šilumos augalui. Laikome, kad augalo energijų apykaitos procesų 1–0 ir 1–0_A saulės energijos srautas ($Q_1 = \text{const}$) vienodas. Tuomet papildomą energijos kiekį, kurį gauna augalas iš aplinkos oro, turi sukaupti augalo audiniai Q_{ak} . Remdamiesi augalo energinės apykaitos procesų 1–0 ir 1–0_A schemomis $h-x$ diagramoje (5.2 pav.), augalo audinių kaupiamą šilumą išreiškę entalpijų skirtumu, gauname:

$$\Delta h_{ausA} = \Delta h_{aus} + \Delta h_{ak}. \quad (5.12)$$

Proceso 1–0 augalo energijų balanso lygtį (5.2) išreiškiame per entalpijų pokyčius:

$$\Delta h_{tr} = \Delta h_{sp} + \Delta h_{aus}. \quad (5.13)$$

Proceso 1–0_A augalo energijų balanso lygtį (5.2), įvertinę augalo audinių termoakumuliaciją, išreiškiame per entalpijų pokyčius:

$$\Delta h_{trA} = \Delta h_{tr} = \Delta h_{sp} + \Delta h_{aus} = \Delta h_{sp} + \Delta h_{ausA} - \Delta h_{ak}. \quad (5.14)$$

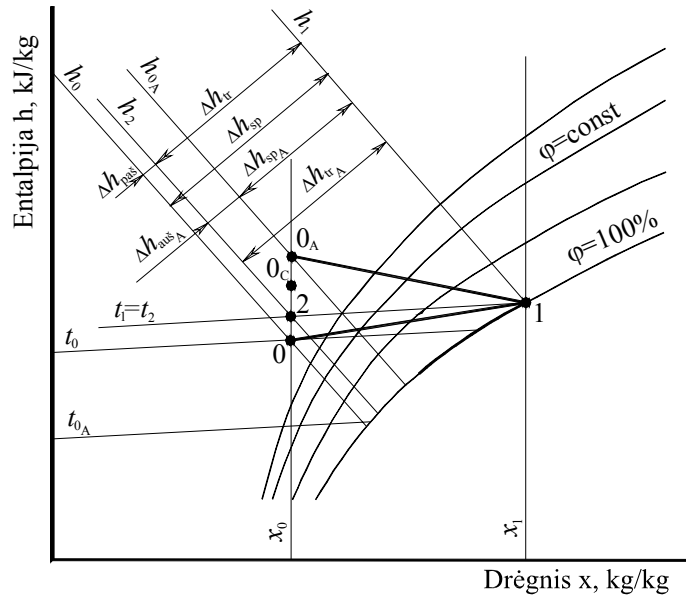
Transpiracijos kriterijų S_k randame iš (2.47) lygties. Kaip aukščiau nustatėme, $Q_{2\min A}^{aus} > Q_{2\min}^{aus}$. Naudodamiesi (2.47) lygties išraiška transpi-

racijos kriterijui S_k skaičiuoti matome, kad temperatūros svyravimai augalą supančiame ore sukelia transpiracijos kriterijaus S_k kaitą, nes esant nuolatinei transpiracijai $Q_3 = \Delta h_{tr} = const$, kinta konvekciniai šilumos mainai su aplinka $Q_{2minA}^{aus} > Q_{2min}^{aus}$.

Apibendrinami augalą supančio oro temperatūros svyravimų poveikį neigiamo temperatūros gradiento srityje, t. y. kai augalo lapo temperatūra mažesnė už aplinkos temperatūrą ($t_1 < t_0$), galime teigti, kad augalą supančio oro temperatūrų svyravimai nedaro įtakos transpiracijos procesui. Kinta tik augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumas pasireiškiant augalo audinių termoakumuliacijai, kuri sukelia temperatūros pokyčius augalo audiniuose. Vadinasi, augalą supančio oro temperatūros svyravimai teigiamo temperatūros gradiento srityje sukelia temperatūros svyravimus augalo audiniuose. Kintant augalo audinių temperatūrai, kinta konvekciniai šilumos mainai su aplinka, esant vienodam transpiracijos intensyvumui kinta transpiracijos skaičius S_k .

3 atvejis. Nagrinėjame atvejį, kai augalą supančio oro temperatūros t_0 svyravimai vyksta temperatūrų intervale, artimame augalo temperatūrai t_1 . Tokius oro temperatūrų svyravimus tarp augalo ir aplinkos sukelia teigiami ($t_0 > t_1$) ir neigiami ($t_1 > t_0$) temperatūrų gradientai. Laikome, kad augalo lapo temperatūra t_1 pastovi, kinta tik aplinkos temperatūra t_0 . Augalo energinės apykaitos procesą 1–0 ir 1–0_A, naudodamiesi anksčiau aptarta metodika ir analizės taisyklėmis (2.10, 2.14, 2.15 ir 2.16 pav.), pateikiame $h-x$ diagramoje (5.3 pav.). Augalą supančio oro temperatūra (temperatūros impulso metu) kinta esant pastoviam drėgniui $x_0 = const$. Staigus oro temperatūros kitimas aplinkoje vyksta tarp kraštinių temperatūros impulso taškų 0 ir 0_A per tarpinius taškus 0_B, 0_C, $t_1 = t_2 = const$. Gauname kraštines augalo energinės apykaitos proceso padėtis temperatūros kitimo metu 1–0 ir 1–0_A $h-x$ diagramoje (5.3 pav.). Matome, kad augalo lapo energinės apykaitos procesas 0–1 (neigiamo temperatūros gradiento atveju) yra žemiau izotermos $t_1 = t_2 = const$, o procesas 0_A–1 (teigiamo temperatūros gradiento atveju) – aukščiau izotermos $t_1 = t_2 = const$.

Pasinaudoję aukščiau aptartų atvejų duomenimis (5.5) teigiame, kad nagrinėjamoju atveju augalo energinės apykaitos procesuose 1–0 ir 1–0_A taip pat dalyvauja vienodas minimalus aplinkos oro kiekis $G_{1min} = G_{1minA}$, nes $x_1 - x_0 = x_1 - x_{0A}$.



5.3 pav. Augalo energinės apykaitos procesų, kai augalą supančio oro temperatūra svyruoja neigiamo ($t_1 > t_0$) ir teigiamo ($t_0 > t_1$) temperatūrų gradientų srityje, schema $h-x$ diagramoje

Iš pateiktos augalo energinės apykaitos procesų 1-0 ir 1-0_A schemas $h-x$ diagramoje (5.3 pav.) matome, kad $\Delta h_{tr} = \Delta h_{trA}$. Šis entalpijų skirtumas Δh parodo, kad procesų 1-0 ir 1-0_A metu transpiracijai sunaudojamas šilumos (energijos) kiekis yra vienodas. Vadinasi, procesų 1-0 ir 1-0_A transpiracijos intensyvumas vienodas, nors oro temperatūrų svyravimai tarp augalo ir aplinkos vyksta teigiamų ($t_0 > t_1$) ir neigiamų ($t_1 > t_0$) temperatūros gradientų srityje. Žinodami (5.6), kad $G_{1min} = G_{1minA}$, nustatome šilumos kiekius Q_{2min}^{pas} (2.21) ir Q_{2min}^{aus} (2.43), kuriuos aplinkos oras atiduoda augalui ($t_0 > t_1$) arba augalas atiduoda orui ($t_1 > t_0$) išgarindamas 1 kg drėgmės procesų 1-0_A ir 1-0 metu:

$$Q_{2min}^{aus} = (h_{0A} - h_2)G_{1min} = \Delta h_{aus}G_{1min}, \text{ kai } (t_0 > t_1); \quad (5.15)$$

$$Q_{2min}^{pas} = (h_2 - h_0)G_{1min} = \Delta h_{pas} G_{1min}, \text{ kai } (t_1 > t_0). \quad (5.16)$$

Iš pateiktos augalo energinės apykaitos procesų schemos $h-x$ diagramoje (5.3 pav.) matome, kad procesų 1–0 ir 1–0_A metu augalo lapas šildo orą dydžiu, kuris randamas iš entalpijų skirtumo $h_2 - h_0$ (kai $t_1 > t_0$) arba šaldo orą $h_{0A} - h_2$ (kai $t_0 > t_1$). Nagrinėjamoju atveju, kai augalą supančio oro temperatūrų svyravimai sukelia teigiamus ($t_0 > t_1$) ir neigiamus ($t_1 > t_0$) temperatūros gradientus, pastebime aukščiau nagrinėto pirmojo ir antrojo atvejų kaitą.

Apibendrinami augalo lapo temperatūros ir transpiracijos kitimą dėl temperatūros svyravimų jo aplinkoje matome, kad augalą supančio oro temperatūrų svyravimai teigiamų ($t_0 > t_1$) ir neigiamų ($t_1 > t_0$) temperatūros gradientų srityje nedaro įtakos transpiracijos procesui. *Kinta tik augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumas pasireiškiant augalo audinių termoakumuliacijai, kuri sukelia temperatūros kitimą augalo audiniuose. Temperatūros svyravimai augalą supančiame ore sukelia transpiracijos skaičiaus S_k kaitą, t. y. energijos srautų kitimą esant vienodam transpiracijos intensyvumui.*

5.2. Augalo lapo energinės apykaitos svyravimai kintant jo ekspozicijai saulės atžvilgiu

Augalo lapai yra lankstūs. Natūraliomis aplinkos sąlygomis, esant mažiausiam vėjui, augalo lapai keičia savo padėtį saulės atžvilgiu. Svyruojantis augalo lapas atitinkamai gauna kintantį saulės energijos kiekį, kuris sukelia augalo lapo energijų balanso pokyčius ir kintantį šilumos išsiskyrimą lape. Saulės apšvita suaktyvina augalo lape vykstančius procesus, taip pat sukelia lapo energijų balanso pokyčius.

Nagrinėdami augalo lapų energijų balanso svyravimų priklausomybę tikrai nuo vieno veiksnio – lapo svyravimų saulės atžvilgiu, energinės apykaitos procesus, vykstančius augalo lape, schematizavome. Tai darėme ir 4.3 skyriuje nagrinėdami augalo dalies temperatūros priklausomybę nuo jos geometrinės formos.

Augalo lapui taikome energijų balanso lygtį (1.9). Saulėtu paros metu ore esančios drėgmės kondensacija lapo paviršiuje negalima, todėl energijų balanso narys, įvertinantis drėgmės kondensaciją, lygus nuliui

($Q_8 = 0$) ir nevertinamas. Tyrimo periodas labai trumpas – vienas augalo lapo svyravimas. Todėl šilumos srautas lapo koto audiniais, esant mažam koto skerspjūviui, mažam temperatūros gradientui, šilumos laidumui Q_4 ir augalo sulčių tekėjimui Q_7 taip pat atmestinas: $Q_4 = 0$ ir $Q_7 = 0$. Esant tokioms sąlygoms augalo lapo energijų balanso lygtis (1.9) atrodys taip:

$$\pm Q_1 \pm Q_2 - Q_3 \pm Q_5 \pm Q_6 = 0, \quad (5.17)$$

- čia Q_1 – augalo absorbuojamas saulės energijos srautas, J/s;
 Q_2 – šilumos srautas, atiduodamas arba gaunamas iš aplinkos konvekciniiais šilumos mainais, J/s;
 Q_3 – šilumos srautas, sunaudotas transpiracijai ir atiduodamas aplinkai vandens garo pavidalo, J/s;
 Q_5 – šilumos srautas, skirtas energijos pavidalo fotocheminėms reakcijoms ir kitiems augale vykstantiems egzoterminiams ir endoterminiams procesams, J/s;
 Q_6 – šilumos srautas, dalyvaujantis augalo audinių termoakumuliacijos procese, J/s.

Tyrimo laikotarpį parenkame esant pastoviai saulės spinduliutei $Q_1 = \text{const}$. Pastovaus energijų balanso atveju pradiniu momentu augalo lapo temperatūra bus pastovi. Laikome, kad be galo trumpu laiko periodu $d\tau$ augalo lape vykstantys biologiniai procesai išlieka nekintantys ir naudoja pastovų saulės energijos kiekį. Tuomet lapo biologiniams procesams sunaudojamą energijos kiekį Q_5 galime išreikšti tokia lygtimi:

$$Q_5 = n Q_1 \quad (5.18)$$

čia n – koeficientas, kuriuo įvertinama absorbuotos saulės energijos dalis, augalo sunaudojama biologiniams procesams. $n = 0,04 - 0,05$ (Šlarpakauskas, 2006; Илькун, 1967).

Likusią absorbuotos saulės energijos dalį augalo lapas sunaudos transpiracijai ir konvekciniams šilumos mainams su aplinka. Tuomet, esant pastoviai augalo energinei apykaitai ($Q_6 = 0$), galime sudaryti tokią energijų balanso lygtį:

$$(1 - n) Q_1 = Q_2 + Q_3. \quad (5.19)$$

Laikome, kad šiuo labai trumpu laiko periodu transpiracijos ($Q_3 = const$) ir konvekcinų šilumos mainų ($Q_2 = const$) intensyvumas išlieka pastovus. Tai galime daryti naudodami tiriamuoju laikotarpiu vidutines lapo transpiracijos ir konvekcinų šilumos mainų intensyvumo reikšmes.

Pastovi energinė apykaita augalo lape pakinta pakitus lapo gaunamam saulės energijos kiekiui. Svyruojantis augalo lapas gauna atitinkamai kintantį saulės energijos kiekį dėl vėjo poveikio, staigiai kintant debesuotumui, ventiliuojant šiltnamius arba įrengus judamą augalų švitinimo įrangą. Natūralioje aplinkoje chaotiškai judantis oras judina augalo lapus. Judantys lapai saulės atžvilgiu keičia savo padėtį kintant lapo padėties kampui β (5.4 pav.).

Augalo lapui keičiant padėtį saulės atžvilgiu iš B į C (5.4 pav. a), sumažėja lapo absorbuojamas saulės energijos kiekis. Panagrinėsime šios energijos kiekio sumažėjimo priežastį.

Į lapo paviršių patenkančios saulės energijos kiekis, kai jos srauto tankis $q_1 = const$, tiesiogiai priklauso nuo augalo lapo paviršiaus ploto F projekcijos dydžio į spindulių kritimo kryptį statmeną plokštumą. Kai spindulių kritimo kryptis yra statmena augalo lapo plokštumai, lapo paviršiaus ploto projekcija B padėtyje būtų F_{xB} (5.4 pav. b).

Pakitus augalo lapo padėčiai iš B į C, atitinkamai augalo lapo paviršiaus ploto projekcija į spindulių kritimo kryptį statmeną plokštumą sumažėtų dydžiu ΔF_x ir būtų F_{xC} (5.4 pav. b). Dydis ΔF_x reiškia aktyvaus augalo lapo paviršiaus ploto sumažėjimą pakitus lapo padėčiai saulės atžvilgiu kampu β ir randamas pagal (5.20) lygtį.

$$\Delta F_x = F_{xB} - F_{xC} = F(1 - \cos \beta) \quad (5.20)$$

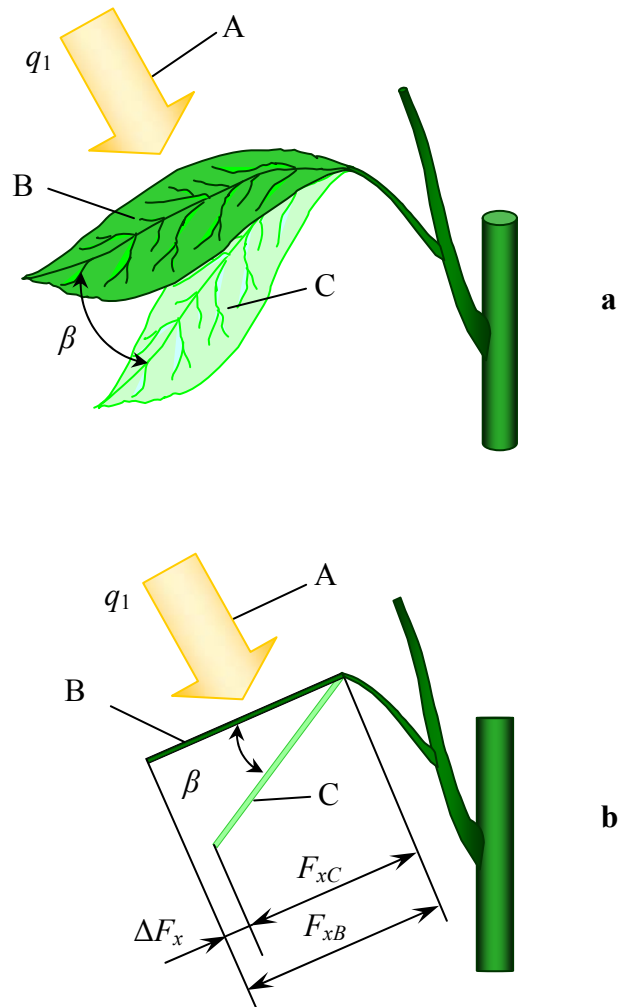
čia F – augalo lapo plotas, cm^2 ;

ΔF_x – aktyvaus augalo lapo paviršiaus ploto sumažėjimas pakitus lapo padėčiai saulės atžvilgiu, cm^2 ;

F_{xB}, F_{xC} – augalo lapo paviršiaus ploto projekcija atitinkamai padėtyje B ir C (5.4 pav. b), cm^2 ;

B – lapo padėties saulės atžvilgiu kampas, rad.

Esant tokiam augalo lapo paviršiaus ploto projekcijos sumažėjimui dėl lapo padėties pasikeitimo saulės atžvilgiu, šilumos kiekis, patenkančias į lapo paviršių kintant lapo padėčiai iš B į C, sumažės dydžiu ΔQ_1 .



5.4 pav. Augalo lapo padėties saulės atžvilgiu kitimo schema: A – saulės spinduliuotės kryptis; B, C – augalo lapo kraštinės padėtys saulės atžvilgiu

Kai absorbuojamas saulės energijos srauto tankis $q_1 = const$, į lapo paviršių patenkančio energijos srauto kiekio Q_1 sumažėjimas dydžiu ΔQ_1 , dėl augalo lapo padėties pasikeitimo kampų β bus išreiškiamas tokią priklausomybę:

$$\Delta Q_1 = Q_{1B} - Q_{1C} = q_1 F(1 - \cos \beta) \quad (5.21)$$

arba

$$\Delta Q_1 = Q_1(1 - \cos \beta), \quad (5.22)$$

čia ΔQ_1 – į augalo lapo paviršių patenkančio šilumos srauto Q_1 sumažėjimas, J/s;

Q_{1B} , Q_{1C} – absorbuojamas saulės energijos srautas augalo lapui esant atitinkamai padėtyje B ir C (5.4 pav. B), J/s;

q_1 – absorbuojamas saulės energijos srauto tankis, W/cm².

Energijų balanso išraiška pasireiškia per augalo lapo termoakumuliacijos procesą. Transpiracijos Q_3 ir konvekcinių šilumos mainų Q_2 intensyvumas per labai trumpą laikotarpį $d\tau$ išlieka pastovus, todėl kintant lapo temperatūrai dydžiu Δt , energijos trūkumą padengia augalo lapo audinių sukaupta šiluma Q_6 .

Kintant augalo lapo ekspozicijai saulės atžvilgiu, saulės energijos svyravimams išreikšti galime sudaryti tokią energijų balanso lygtį:

$$\Delta Q_1 = Q_6 \quad (5.23)$$

arba

$$(1 - \cos \beta)\Delta Q_1 = Q_6 \frac{d(\Delta t)}{d\tau}. \quad (5.24)$$

Energijų balanso lygties narys $(1 - \cos \beta)$, reiškiantis į lapo paviršių patenkančios energijos sumažėjimą, keisis laikui bėgant priklausomai nuo lapo padėties saulės atžvilgiu kampo β dydžio.

Augalo lapo sukauptos šilumos kiekis Q_6 išreiškiamas lygtimi:

$$Q_6 = \rho c V \frac{d(\Delta t)}{d\tau}, \quad (5.25)$$

čia ρ – augalo lapo audinių tankis, g/cm³;

c – augalo lapo savitoji šilumos talpa, J/(g·K);

V – augalo lapo tūris, cm³;

Δt – augalo lapo temperatūros pokytis, °C;

τ – laikas, s.

Energijų balanso lygties (5.19) narys Q_2 , nusakantis konvekcinius šilumos mainus tarp augalo lapo ir aplinkos, bus išreiškiamas tokia lygtimi:

$$Q_2 = \alpha F(t_1 - t_0) + \alpha F(t_1 - \Delta t - t_0), \quad (5.26)$$

čia t_1 – pradinė augalo lapo temperatūra, °C;
 t_0 – augalo lapą supančios aplinkos temperatūra, °C;
 Δt – augalo lapo temperatūros pokytis tam tikru laiko momentu, °C;
 α – augalo lapo šilumos atidavimo koeficientas, J/(s·cm²·K);
 F – augalo lapo plotas, cm².

Augalo dalys ar jo dalelės yra nuolatinėje energijų balanso dinaminėje pusiausvyroje. Todėl augalo lapo temperatūros kitimą nusako tam tikro momento augalo lapo ar jo dalies energijų balanso kaita. Augalo lapo temperatūros pokytis, Δt , kaip energijų balanso išraiška, pasireiškia per augalo lapo termoakumuliacijos procesą.

Energijų balanso lygties (2.42) narys Q_3 , nusakantis ir transpiracijos procesą, išreiškiamas tokia lygtimi:

$$Q_3 = wrF, \quad (5.27)$$

čia w – transpiracijos intensyvumas, g/(cm²·s);
 r – garavimo šiluma, J/g.

Atsižvelgdami į tai, kad transpiracijos Q_3 ir konvekcinių šilumos mainų Q_2 intensyvumas per tam tikrą laikotarpį dt išlieka pastovus, energijų balanso lygtį (5.19) sudarome taip:

$$(1 - n)Q_1 = 2\alpha F(t_1 - t_0) - \alpha F\Delta t + wrF. \quad (5.28)$$

Iš (5.28) formulės matyti, kad į lapo paviršių patenkantis šilumos pavidalo saulės energijos kiekis Q_1 bus lygus:

$$Q_1 = \frac{2\alpha F(t_1 - t_0) - \alpha F\Delta t + wrF}{1 - n}. \quad (5.29)$$

Tokiu būdu, atsižvelgdami į (5.25), (5.26) ir (5.29) formules, energijos balanso lygtį (5.24) sudarome taip:

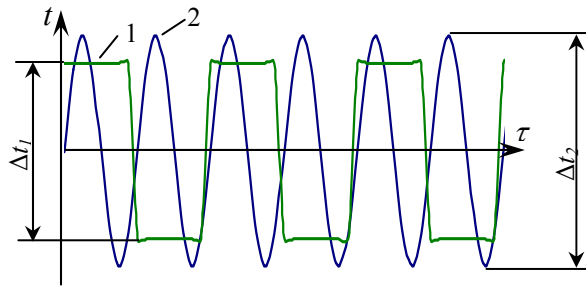
$$\frac{1 - \cos \beta}{1 - n} [2\alpha F(t_1 - t_0) - \alpha F \Delta t + wrF] = \rho c V \frac{d\Delta t}{d\tau}. \quad (5.30)$$

Lygties (5.30) narį $\frac{1 - \cos \beta}{1 - n}$ pažymime S . Šis dydis fizikine prasme išreiškia absorbuojamos saulės energijos sumažėjimą S . Šis sumažėjimas gali būti priimamas kaip pastovus dydis tam tikru lapo padėties C_i momentu τ_i arba kintantis pagal tam tikrą dėsningumą, kurį lemia lapo svyravimai.

Analizuodami saulės energijos poveikio priklausomybę nuo lapo padėties kampo β , nagrinėjame du atvejus.

Pirmuoju atveju į lapo paviršių patenkančios energijos sumažėjimas įvertinamas pagal kampo β (5.4 pav.) dydį tam tikru laiko momentu τ (5.5 pav., 1 kreivė).

Antruoju atveju, kuris taip pat galimas realiomis sąlygomis, lapo padėties saulės atžvilgiu kampas β (5.4 pav.) gali kisti laike, t. y. $\beta = f(\tau)$. Tokiu atveju kampo β kitimas gali būti išreiškiamas tam tikra periodine funkcija (5.5 pav., 2 kreivė).



5.5 pav. Augalo lapo padėties kampo β kitimo saulės atžvilgiu atveju pavyzdžiai (paaiškinimas tekste)

Nagrinėjamoju antruoju atveju (5.5 pav., 2 kreivė) laikome, kad augalo lapo svyravimas vyksta pusapskritimo trajektorija, kurią galima

išreikšti sinuso funkcija. Šiuo atveju lapo padėties kampo dydžio kitimą išreiškėme tokia lygtimi:

$$\beta = \beta_A \sin(\pi f\tau + \varphi_0), \quad (5.31)$$

čia: β_A – lapo svyravimo amplitudė, rad;

f – lapo svyravimo dažnis, s^{-1} ;

τ – laikas, s;

φ_0 – pradinė svyravimo fazė (skaičiavimuose $\varphi_0 = 0$), rad.

Lygties (5.30) sprendinys tiesiogiai priklauso nuo jos nario S – absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficiento. Aptartais dviem augalo lapo svyravimo atvejais (5.5 pav.), kuriuos atitinka 1 ir 2 kreivės, absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficientą S atitinkamai išreiškiame tokiomis lygtimis:

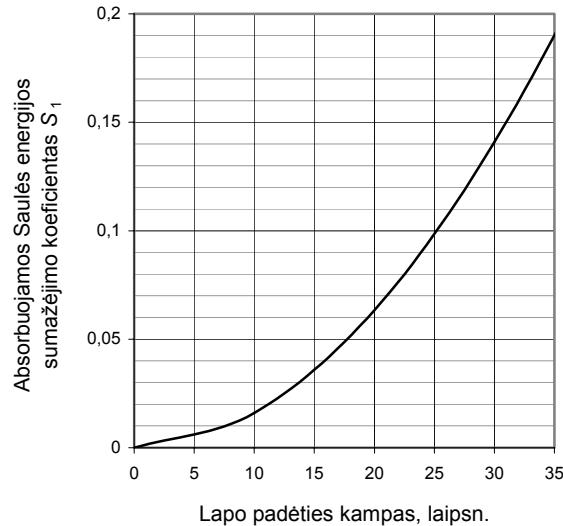
$$S_1 = \frac{1 - \cos \beta}{1 - n}, \quad (5.32)$$

$$S_2 = \frac{1 - \cos(\beta_A \sin(\pi f\tau + \varphi_0))}{1 - n}. \quad (5.33)$$

Kaip matyti iš lygties (5.32), absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficientas S_1 nepriklauso nuo augalo lapo buvimo tam tikroje padėtyje trukmės. Koeficiento S_1 vertę lemia augalo lapo padėties kampo β dydis.

Pagal formulę (5.32) apskaičiuotos absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficiento S_1 reikšmės pateiktos 5.6 paveiksle.

Nagrinėjant absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficiento S_1 vertes matyti, kad augalo lapui esant 10° , 20° ir 30° kampais saulės atžvilgiu, atitinkamai koeficientas S_1 yra 0,015, 0,06 ir 0,13. Šie rezultatai rodo, kad augalo lapui esant minėtose kampo β padėtyse saulės atžvilgiu, į augalo lapą atitinkamai patenka 1,5 %, 6 % ir 13 % mažiau saulės energijos.



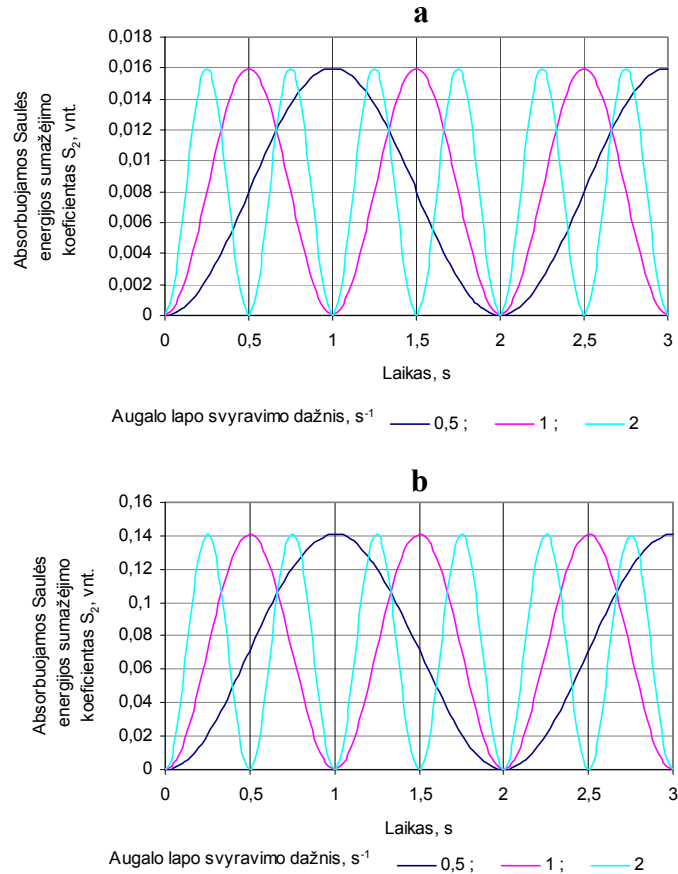
5.6 pav. Absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficiento S_1 priklausomybė nuo lapo padėties kampo β

Periodiškai kintančio laike absorbuojamos energijos sumažėjimo koeficiento S_2 vertės priklauso nuo augalo lapo svyravimo amplitudės β_A ir svyravimo dažnio f , kurio vertę tiesiogiai lemia svyravimų skaičius per tam tikrą periodą. Skaičiavimams naudojome augalo lapo svyravimo dažnį $f = 0,5 \text{ s}^{-1}$, 1 s^{-1} ir 2 s^{-1} , minimalią augalo lapo svyravimo amplitudę $\beta_A = 10^\circ$, maksimalią amplitudę $\beta_A = 30^\circ$.

Pagal (5.33) formulę apskaičiuotos saulės energijos sumažėjimo koeficiento S_2 reikšmės, kai augalo lapo svyravimo amplitudė $\beta_A = 10^\circ$ ir $\beta_A = 30^\circ$, pateiktos 5.7 paveiksle a ir b. Kai augalo svyravimo amplitudė siekia 30° , saulės energijos sumažėjimo koeficiento S_2 reikšmės yra iki 8,75 karto didesnės negu tuomet, kai lapo svyravimo amplitudė yra 10° . Tai rodo, kad augalo lapo svyravimo amplitudei padidėjus tris kartus, į lapo paviršių patenkančios saulės energijos kiekio sumažėjimas viršija amplitudės padidėjimą, t. y. saulės energijos kiekio sumažėjimas nėra tiesiai proporcingas augalo lapo svyravimo amplitudės padidėjimui. Priklausomai nuo augalo lapo svyravimo dažnio tam tikrais laiko intervalais vyksta absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo pokyčiai (5.7 pav.).

Koeficiento S_2 skaičiavimo rezultatai, esant skirtingiems augalo lapo svyravimo dažniams, rodo, kad bendras saulės energijos kiekio su-

mažėjimas per tam tikrą laiko intervalą nepriklauso nuo lapo svyravimo dažnio. Energijos sumažėjimą atspindi koeficiento S_2 funkcijos grafiko ribojamas plotas, išreiškiantis saulės energijos kiekį. Kaip matyti 5.7 paveiksle, saulės spinduliuotės metu gautas bendras energijos kiekis per 1 s, nepriklausomai nuo svyravimo dažnio, yra vienodas, todėl nepriklauso nuo svyravimo dažnio tame pačiame laiko intervale. Svyravimo dažnis lemia saulės energijos sumažėjimo vertę tam tikru laiko momentu, t. y. koeficiento S_2 dydį.



5.7 pav. Absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo koeficiento S_2 priklausomybė nuo laiko, periodiškai kintant lapo padėties kampui β , kai svyravimo amplitudė **a** – $\beta_A = 10^\circ$, **b** – $\beta_A = 30^\circ$

Augalo lapui periodiškai svyruojant amplitude $\beta_A = 10^\circ$, per tam tikrą laiką į jo paviršių patenka iki 1,6 % mažiau saulės energijos (5.7 pav. a). Kai augalo lapo svyravimo amplitudė siekia iki 30° , atitinkamai į lapo paviršių per tam tikrą svyravimo periodą patenka iki 14 % mažiau saulės energijos (5.7 pav. b).

Augalo lapui natūraliai keičiant padėtį saulės atžvilgiu (pvz., dėl vėjo poveikio), saulės energijos sukelti svyravimai sukelia augalo lapo energijų balanso pokyčius, kurių rezultatas – lapo temperatūros svyravimai.

5.3. Augalo lapo temperatūros svyravimai kintant jo ekspozicijai saulės atžvilgiu

Visi augale vykstantys biologiniai procesai priklauso nuo augalo audinių temperatūros, todėl augalo ir jo aplinkos temperatūra yra ypač svarbi teoriniams ir taikomiesiems augalijos mokslams. Augalo dalies temperatūra yra toje dalyje vykstančių biologinių procesų ir jos energinės apykaitos su aplinka energijų balanso rezultatas. Lokali augalo lapo temperatūra priklauso nuo lokalaus augalo lapo energijų balanso. Augalo lapo temperatūros kitimo dinamiką nusako tam tikro momento energijų balansas, kuris saulėtu paros metu yra nuolatinėje dinaminėje pusiausvoroje. Augalo lapo temperatūros kitimas, kaip dinaminio energijų balanso išraiška, pasireiškia per augalo lapo termoakumuliacijos procesą, kuris sukelia konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumo pokyčius.

Natūraliomis aplinkos sąlygomis esant mažiausiam vėjui augalo lapai keičia savo padėtį saulės atžvilgiu. Svyruojantis augalo lapas atitinkamai gauna kintantį saulės energijos kiekį. Nustatyta (5.2 skyrius), kad saulės energijos svyravimų metu gautas bendras energijos kiekis nepriklauso nuo svyravimo dažnio tame pačiame laiko intervale. Saulės energija, augalo lapuose virtusi šiluma, turi būti atiduota aplinkai arba sukaupta augalo audiniuose, didinant augalo audinių temperatūrą. Ploni augalo lapai dėl mažos jų masės ir biologiškai ribojamos maksimalios augalo audinių temperatūros (Stašauskaitė, 1995; Ellwagner et al., 1973; Hege, 1990; Levitt, 1980) gali mažai kaupti augalo lape išskirtos šilumos. Todėl augalo lapo padėties saulės atžvilgiu svyravimai turi sukelti augalo lapo temperatūros svyravimus. Yra žinoma, kad kintanti ap-

švita suaktyvina procesus, vykstančius augalo lape (Hayashi 2001; Stašauskaitė 1995; Lafta *et al.* 1995).

Bet kurios augalo dalies temperatūros kitimo dinamiką nusako tam tikro momento augalo dalies ar jo dalelės energijų balansas, kuris saulėtu paros metu yra nuolatinėje dinaminėje pusiausvyroje. Augalo dalies temperatūros kitimas, kaip dinaminio energijų balanso išraiška, pasireiškia per augalo lapo temoakumuliacijos procesą, kuris sukelia konvekcinį šilumos mainų su aplinka intensyvumo pokyčius. Augalo temperatūrą galima rasti pagal augalo energijų balanso lygtį (1.9) arba (5.17).

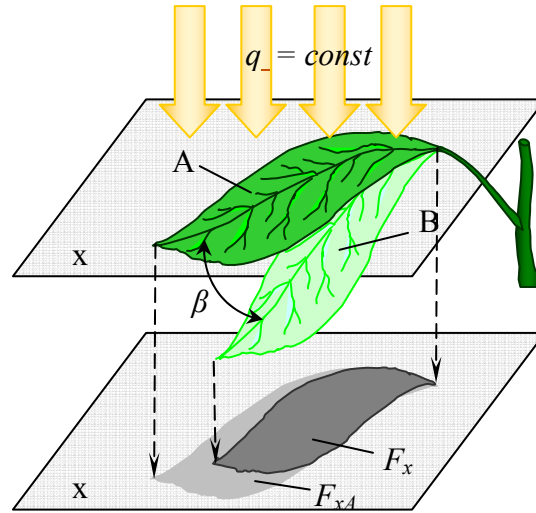
Augalo dalies temperatūra t yra dviejuose augalo energijų balanso nariuose. Nuo augalo audinių temperatūros priklauso konvekciniai šilumos mainai su aplinka Q_2 ir energijų balanso narys, įvertinantis augalo dalies termoakumuliaciją Q_5 . Naudojantis augalo energijų balanso lygtimi (5.14) galima apskaičiuoti lokaliaus augalo lapo audinių temperatūros svyravimus, kuriuos sukelia lapo svyravimai saulės atžvilgiu.

Nagrinėdami augalo lapų lokaliaus temperatūros svyravimus kaip saulės spinduliuotės priklausomybę tikrai nuo vieno veiksnio – lapo svyravimų saulės atžvilgiu, energinės apykaitos procesus, vykstančius augalo lape, schematizavome. Akivaizdu, kad pakitus augalo lapo padėties kampui β iš pradinės padėties A į padėtį B (5.8 pav.), į augalo lapo paviršių patenka mažesnis saulės energijos kiekis. Šios energijos sumažėjimas tiesiogiai priklauso nuo augalo lapo paviršiaus ploto F , projekcijos į spindulių kritimo kryptį statmeną x dydžio plokštumą.

Siekdami nustatyti šį paviršiaus ploto projekcijos sumažėjimą, laikome, kad saulės energijos šaltinio skleidžiamas šilumos srauto tankis $q = const$ ir saulės spindulių srauto kritimo kryptis yra statmena augalo lapo plokštumai. Pakitus augalo lapo padėčiai (5.8 pav.) kampui β (iš A padėties patekus į B), augalo lapo paviršiaus ploto projekcija sumažėtų dydžiu ΔF_x , t. y.:

$$\Delta F_x = F_{xA} - F_{xB} = F(1 - \cos \beta). \quad (5.34)$$

Esant tokiam augalo lapo paviršiaus ploto projekcijos sumažėjimui, dėl lapo padėties pasikeitimo saulės energijos šaltinio atžvilgiu, šilumos kiekis, patenkantis į lapo paviršių kintant lapo padėčiai iš A į B, sumažės.



5.8 pav. Augalo lapo padėties saulės spinduliuotės atžvilgiu kitimo schema

Norėdami išreikšti temperatūros pokyčius, kuriuos sukelia lapo padėties kitimas saulės energijos šaltinio atžvilgiu, remiamės 5.2 skyriaus prielaidomis ir rezultatais, gautais nagrinėjant saulės energijos svyravimus augalo lape. Gautą augalo lapo energijų balanso lygtį (5.30) parašome tokia išraiška:

$$\frac{(1 - \cos \beta)}{1 - n} (\alpha F (2t_1 - 2t_0 - \Delta t) + wrF) = \rho cV \frac{d(\Delta t)}{d\tau}. \quad (5.35)$$

Ieškodami energijų balanso lygties (5.35) sprendinio $t = f(\Delta t)$, minėtąją lygtį pertvarkome taip:

$$\frac{d\Delta t}{\alpha F (2(t_1 - t_0) - \Delta t) + wrF} = \frac{1 - \cos \beta}{(1 - n) \rho cV} d\tau. \quad (5.36)$$

Lygtį (5.36) integravus ir antilogaritmavus gauta tokia lygtis:

$$2(t_1 - t_0) - \Delta t - \frac{wr}{\alpha} = C \exp\left(\frac{-\alpha F(1 - \cos \beta)}{(1-n)\rho cV} \tau\right). \quad (5.37)$$

Naudodami (5.37) lygtį randame integravimo konstantą C :

$$C = \frac{2(t_1 - t_0) - \Delta t - \frac{wr}{\alpha}}{\exp\left(\frac{-\alpha F(1 - \cos \beta)}{(1-n)\rho cV} \tau\right)}. \quad (5.38)$$

Pradiniu laiko momentu, kai $\tau = 0$, temperatūrų skirtumas $\Delta t = 0$, integravimo konstanta C bus lygi:

$$C = -2(t_1 - t_0) - \frac{wr}{\alpha}. \quad (5.39)$$

Ieškomąjį (2.158) lygties sprendinį – temperatūros pokytį Δt – gauname į (2.160) išraišką įrašę integravimo konstantą C , gautą pagal (2.162) išraišką:

$$\Delta t = \left(2(t_1 - t_0) + \frac{wr}{\alpha}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha F(\cos \beta - 1)}{(1-n)\rho cV} \cdot \tau\right)\right). \quad (5.40)$$

Įvertinę tai, kad augalo lapo tūris $V = F\delta$ ir atsižvelgę į temperatūros žymėjimus, gauname galutinę augalo lapo temperatūros pokyčio išraišką:

$$\Delta t = \left(2(t_1 - t_0) + \frac{wr}{\alpha}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha(\cos \beta - 1)}{(1-n)\rho c\delta} \cdot \tau\right)\right). \quad (5.41)$$

Trumpalaikės temperatūros svyravimai augalo lape, priklausomai nuo lapo buvimo trukmės tam tikroje padėtyje saulės atžvilgiu, gali būti dvejopi. Galimas atvejis, kai iš padėties A (5.8 pav.) augalo lapas patenka į B padėtį ir išlieka joje tam tikrą laiką τ . Realiomis sąlygomis tikėtina, kad šis laiko intervalas yra 3–6 s. Tokiam atvejui temperatūros pokytis Δt apskaičiuojamas pagal (5.41) lygtį. Antrasis atvejis būdingas augalo lapo periodiniam svyravimui tam tikra amplitude tarp padėčių A ir B

(5.8 pav.). Realų augalo lapo svyravimą galime aprašyti sinuso funkcija, laikant, kad lapas svyruoja pusapskritimo trajektorija, t. y. kampo β kintimą išreiškiame lygtimi:

$$\beta = \beta_A \sin(\pi f \tau + \varphi_0), \quad (5.42)$$

čia: β_A – lapo svyravimo amplitudė, rad;

f – lapo svyravimo dažnis, s^{-1} ;

τ – laikas, s;

φ_0 – pradinė svyravimo fazė (skaičiuojant laikoma, kad $\varphi_0 = 0$), rad.

Minėtuojų augalo lapo svyravimo atveju temperatūros pokytis Δt reiškia augalo lapo temperatūros svyravimus ir bus apskaičiuojamas į (5.41) lygtį įtraukus kampo β svyravimo korekciją (5.42):

$$\Delta t = \left(2(t_1 - t_0) + \frac{wr}{\alpha} \right) \times \left(1 - \exp \left(\frac{\alpha (\cos(\beta_A \sin(\pi f \tau + \varphi_0)) - 1)}{(1-n)\rho c \delta} \cdot \tau \right) \right) \quad (5.43)$$

Kaip matyti iš (5.41) ir (5.43) lygčių, tiek augalo lapo temperatūros pokytis Δt tam tikru laikotarpiu, tiek temperatūros svyravimai priklauso nuo daugelio parametrų: pradinio temperatūrų skirtumo tarp lapo paviršiaus ir aplinkos ($t_1 - t_0$), absorbuojamos saulės energijos sumažėjimo, kurį lemia augalo lapo svyravimo kampo β amplitudė ir dažnis, augalo lapo storio δ , taip pat nuo augalo transpiracijos intensyvumo, garavimo šilumos, šilumos atidavimo koeficiento, lapo audinių tankio ir jų savitosios šilumos.

Teorinei augalo lapo temperatūros kitimo, priklausomai nuo lapo padėties saulės energijos šaltinio atžvilgiu, analizei buvo pasirinktos šios skaičiavimams reikalingų parametrų vertės: šilumos atidavimo koeficientas $\alpha = 0,00125 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K})$; augalo lapo savitoji šiluminė talpa $c = 3,58 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$; tankis $\rho = 0,9 \text{ g}/\text{cm}^3$; koeficientas, kuriuo įvertinama biologiniams procesams sunaudojama absorbuotos saulės energijos dalis $n = 0,05$; transpiracijos intensyvumas $w = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$; garavimo šiluma $r = 2500 \text{ J}/\text{g}$.

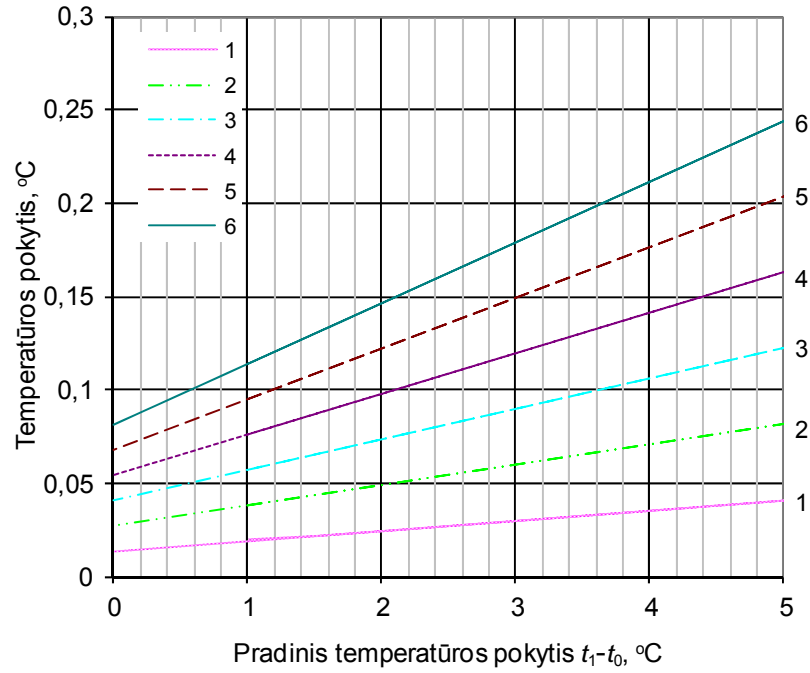
Temperatūros pokyčius augalo lape lemiančių parametrų analizę pradėjome nuo pradinio temperatūrų skirtumo tarp lapo paviršiaus ir aplinkos ($t_1 - t_0$) įtakos Δt reikšmei. Laikydami, kad temperatūrų skirtumas ($t_1 - t_0$) tarp augalo lapo paviršiaus ir aplinkos kinta nuo 0 °C iki 5 °C, apskaičiavome temperatūros pokyčių Δt reikšmes pagal (5.41) ir (5.43) išraiškas. Skaičiuota naudojant du nagrinėjamus atvejus, t. y., kai augalo lapas saulės atžvilgiu kampu β išlieka toje padėtyje tam tikrą laiką ir kai lapas svyruoja apmlitute β_A tam tikru dažniu. Skaičiavimams imtas 0,2 mm augalo lapo storis. Lapo storiui mažėjant proporcingai didėja temperatūros pokytis.

Pirmuoju atveju skaičiavimai atlikti, kai augalo lapas keičia savo padėtį spinduliavimo šaltinio atžvilgiu 10°, 20°, 30° ir 60° kampu β (2.58 pav.) ir išlieka šiose padėtyse nuo 1 iki 6 s. Antruoju atveju augalo lapo svyravimo amplitudė β_A siekia 30° ir 60°, o svyravimo dažnis f yra 0,5 s⁻¹; 1 s⁻¹ ir 2 s⁻¹.

Augalo lapui keičiant savo padėtį spinduliavimo šaltinio atžvilgiu pradinis temperatūrų skirtumas ($t_1 - t_0$) tarp augalo lapo paviršiaus ir aplinkos daro įtaką augalo lapo temperatūros pokyčiui Δt . Skaičiavimo rezultatai, kai augalo lapas tam tikrą laiko tarpą yra 30° kampu saulės atžvilgiu, pateikti (5.9 pav.).

Augalo lapo svyravimų amplitudė $\beta_A = 30^\circ$ atveju, pradinio temperatūrų skirtumo ($t_1 - t_0$) įtakos augalo lapo temperatūros pokyčiui Δt skaičiavimo rezultatai pateikti 2.60 paveiksle.

Įvairiais skaičiavimo atvejais gautos tiesinės lapo temperatūros pokyčio (nuo pradinio augalo lapo paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumo) priklausomybės $\Delta t = f(t_1 - t_0)$. Tai leidžia daryti prielaidą, kad egzistuoja tiesioginis ryšys tarp dydžių Δt ir ($t_1 - t_0$) nepriklausomai nuo augalo lapo storio δ , padėties spinduliavimo šaltinio atžvilgiu (kampu β arba amplitudės β_A), buvimo tam tikroje padėtyje trukmės τ arba svyravimo dažnio f . Siekdami nustatyti šį ryšį, pasirinkome ribinę sąlygą, kai temperatūrų skirtumas ($t_1 - t_0$) yra lygus nuliui, t. y. Δt nepriklauso nuo minėtojo skirtumo.

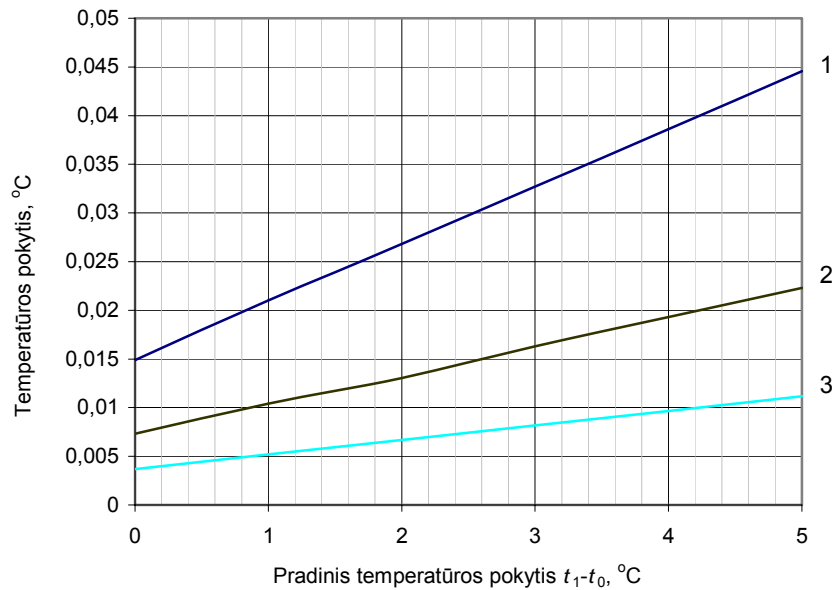


5.9 pav. Augalo lapo temperatūros pokyčio Δt priklausomybė nuo pradinio augalo lapo paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumo, kai augalo lapas keičia savo padėtį spinduliavimo šaltinio atžvilgiu kampų $\beta = 30^\circ$. Pakitusios lapo padėties saulės atžvilgiu trukmė: kreivė 1 – 1 s; 2 – 2 s; 3 – 3 s; 4 – 4 s; 5 – 5 s; 6 – 6 s

Tokių atveju temperatūrų skirtumą Δt žymime Δt_{rib} . Atitinkamai pagal (5.41) ir (5.43) išraiškas jis lygus:

$$\Delta t_{rib} = \frac{wr}{\alpha} \left(1 - \exp \left(\frac{\alpha (\cos \beta - 1)}{(1-n)\rho c \delta} \cdot \tau \right) \right) \quad (5.44)$$

$$\Delta t_{rib} = \frac{wr}{\alpha} \left(1 - \exp \left(\frac{\alpha (\cos(\beta_A \sin(\pi f \tau + \varphi_0)) - 1)}{(1-n)\rho c \delta} \cdot \tau \right) \right). \quad (5.45)$$



5.10 pav. Augalo lapo temperatūros pokyčio Δt priklausomybė nuo pradinio augalo lapo ir jį supančios aplinkos temperatūrų skirtumo, kai lapas svyruoja spinduliavimo šaltinio atžvilgiu amplitudė $\beta_A = 30^\circ$. Augalo lapo svyravimo dažnis: kreivė 1 – $0,5 \text{ s}^{-1}$; 2 – 1 s^{-1} ; 3 – 2 s^{-1}

Temperatūrų skirtumo Δt_{rib} reikšmę lemia jau tik trys kintamieji: δ (lapo storis), β (augalo lapo padėties pokyčio kampas) ir τ (arba f). Todėl priklausomybės $\Delta t = f(t_1 - t_0)$ analizei Δt_{rib} prilyginame 100 % ir nuo šios vertės galime analizuoti, kaip temperatūrų skirtumas $t_1 - t_0$ daro įtaką dydžio Δt vertei. Siekdami tarpusavyje palyginti Δt kitimo rezultatus priklausomai nuo temperatūrų skirtumo $t_1 - t_0$, kai augalo lapas yra skirtingose padėtyse spinduliavimo šaltinio atžvilgiu įvairų laiką arba svyruoja, t. y. abiem tirtaisiais atvejais apskaičiuojame procentinį Δt padidėjimą, skirtumui $t_1 - t_0$ kintant kas laipsnį. Gavome, kad augalo lapo ir aplinkos temperatūrų skirtumo padidėjimas vienu laipsniu (1°C) sukelia augalo lapo temperatūros pokyčio Δt padidėjimą 40 %, nepriklausomai nuo augalo lapo storio δ , lapo padėties kampo β , buvimo tam tikroje padėtyje trukmės τ arba svyravimo dažnio f . Apibendrinant gautus rezulta-

tus galima užrašyti tokią augalo lapo temperatūrų pokyčio Δt priklausomybę nuo pradinio lapo paviršiaus ir aplinkos temperatūrų skirtumo $t_1 - t_0$:

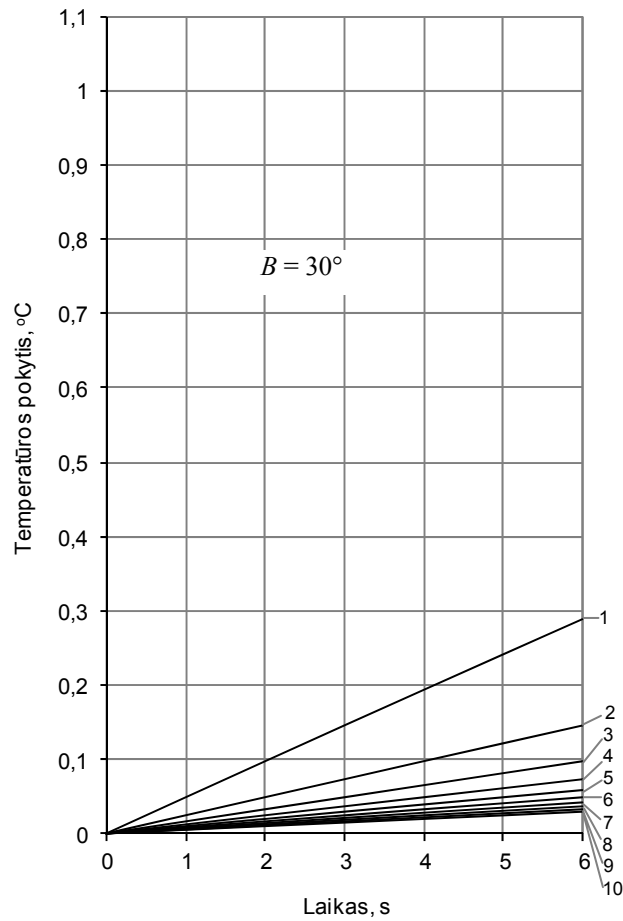
$$\Delta t = \Delta t_{rib} (1 + 0,4(t_1 - t_0)). \quad (5.46)$$

Kaip minėta, augalo lapo temperatūros pokytis, kintant lapo padėčiai spinduliavimo šaltinio atžvilgiu, priklauso ir nuo augalo lapo storio δ , lapo padėties kampo β , buvimo tam tikroje padėtyje trukmės τ arba svyravimo dažnio f ; tačiau (2.169) išraiška rodo, kad temperatūrų skirtumas tarp lapo paviršiaus ir aplinkos $t_1 - t_0$ turi nemažą įtaką dydžiui Δt .

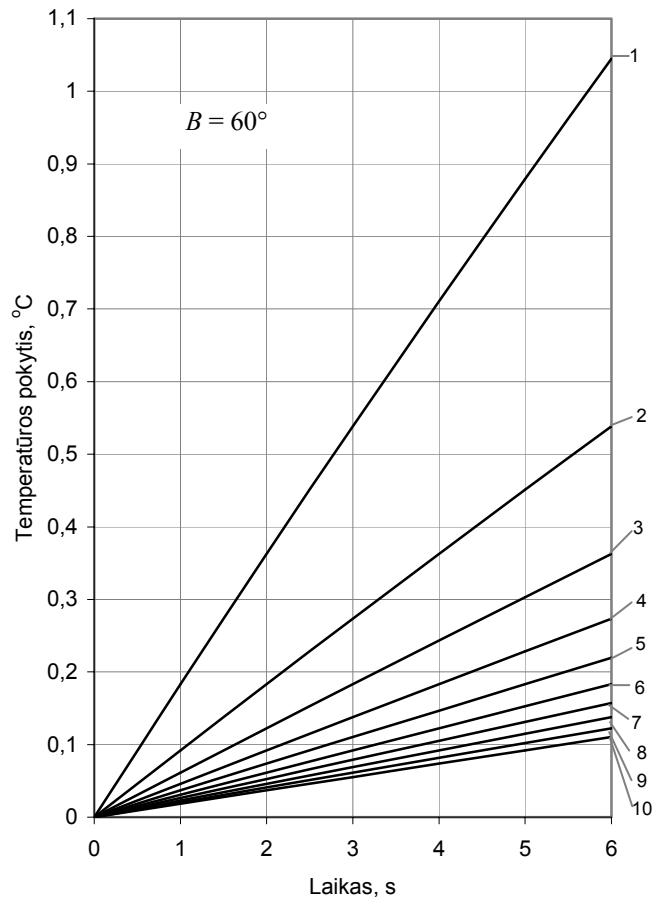
Kitas svarbus augalo lapo parametras yra jo storis δ . Skirtingu augimo laikotarpiu lapo storis yra nevienodas. Šviesinių buko (*Fagus sylvatica*) jaunų lapų storis gali būti 0,117 mm, o suaugusių siekia 0,210 mm (Šlapakauskas, 2006). Priklausomai nuo augalo rūšies ir lapų sandaros gali būti atveju, kai lapo storis δ siekia 1 mm. Kintant augalo lapo padėčiai spinduliavimo šaltinio atžvilgiu, lapo temperatūros pokytis priklauso ir nuo lapo storio δ (žr. formules (5.41) ir (5.43)). Atsižvelgiant į lapo storius įvairiais augimo tarpsniais, lapo temperatūros pokyčių skaičiavimams pasirinkti skirtingi lapo storiai δ nuo 0,1 iki 1 mm. Augalo lapo temperatūros pokyčiai skaičiuoti dviem nagrinėjamaisiais atvejais.

Pirmuoju atveju, kai augalo lapas pakeičia padėtį saulės atžvilgiu ir išlieka toje padėtyje tam tikrą laiką, skaičiavimai atlikti pagal (5.41) formulę. Kaip būdingą augalo lapo temperatūros kitimo skaičiavimo pavyzdį pateikiame temperatūros pokyčio Δt vertes, kai augalo lapo padėties spinduliavimo šaltinio atžvilgiu kampas β yra 30° ir 60° ir tokiose padėtyse išlieka iki 6 sekundžių (5.11 ir 5.12 pav.).

Kaip matyti 5.11 ir 5.12 pav., kai lapo padėties saulės atžvilgiu kampas β yra 30° arba 60° , priklausomai nuo lapo storio pastebimi ženklūs temperatūros pokyčio skirtumai, esant tam pačiam kampui β . Kai lapo storis δ yra nuo 0,1 iki 1 mm, temperatūros pokytis per 6 s atitinkamai siekia 0,03–0,29 °C (kai $\beta = 30^\circ$) ir 0,11–1,04 °C (kai $\beta = 60^\circ$). Lapo temperatūros pokytis yra didžiausias, kai lapo storis mažiausias. Tačiau pastebima netiesinė temperatūros pokyčio kitimo priklausomybė nuo lapo storio.



5.11 pav. Augalo lapo temperatūros pokyčio Δt priklausomybė nuo laiko, kai $\beta = 30^\circ$, esant augalo lapo storiui: 1 kreivė – 0,1 mm; 2 – 0,2 mm; 3 – 0,3 mm; 4 – 0,4 mm; 5 – 0,5 mm; 6 – 0,6 mm; 7 – 0,7 mm; 8 – 0,8 mm; 9 – 0,9 mm; 10 – 1 mm



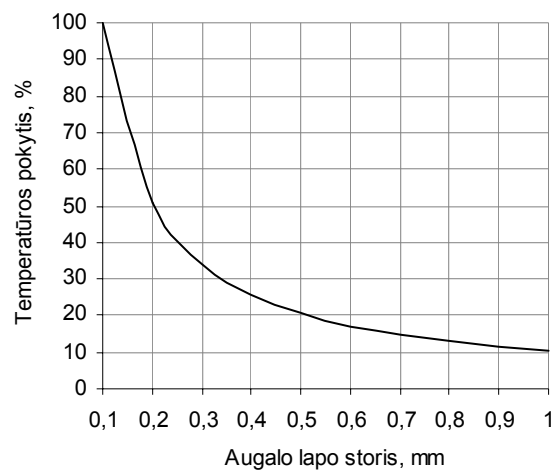
5.12 pav. Augalo lapo temperatūros pokyčio Δt priklausomybė nuo laiko, kai $\beta = 60^\circ$, esant augalo lapo storiui: 1 kreivė – 0,1 mm; 2 – 0,2 mm; 3 – 0,3 mm; 4 – 0,4 mm; 5 – 0,5 mm; 6 – 0,6 mm; 7 – 0,7 mm; 8 – 0,8 mm; 9 – 0,9 mm; 10 – 1 mm

Siekdami išsiaiškinti ir apibendrinti šią priklausomybę laikome, kad 0,1 mm storio lapo temperatūros pokytis atitinka 100 %. Lapo storiui didėjant, temperatūros pokytis atitinkamai mažėja: 0,2 mm storio lapo temperatūros pokytis mažesnis beveik 50 %, 0,3 mm – 66 %, 0,5 mm – 80 %, o 1 mm – 89 % negu 0,1 mm storio lape. Matematiškai temperatūros pokyčio procentinį mažėjimą, didėjant augalo lapo storiui, galime išreikšti tokia priklausomybe:

$$\Delta t_{\%} = 10,324\delta^{-0,9884}, \quad (5.47)$$

čia $\Delta t_{\%}$ – temperatūros pokyčio sumažėjimas, %;
 δ – augalo lapo storis, mm.

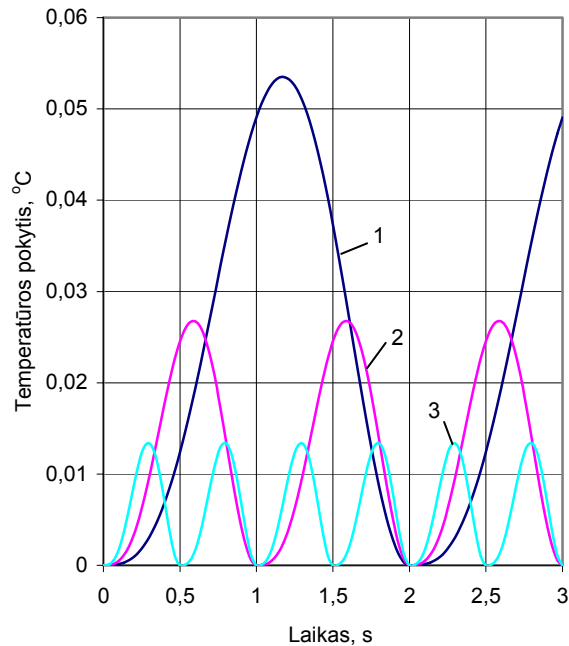
Grafinė (5.47) priklausomybės išraiška pateikta 2.63 paveiksle.



5.13 pav. Temperatūros pokyčio priklausomybė nuo augalo lapo storio, procentais

Nagrinėdami antrąjį atvejį, kuris yra būdingas augalo lapo periodiškam svyravimui tam tikra amplitude tarp padėčių A ir B (5.8 pav.) gauname, kad temperatūros svyravimai yra analogiški periodiškiems saulės energijos pokyčiams augalo lape. Kai augalo lapo svyravimą nusako

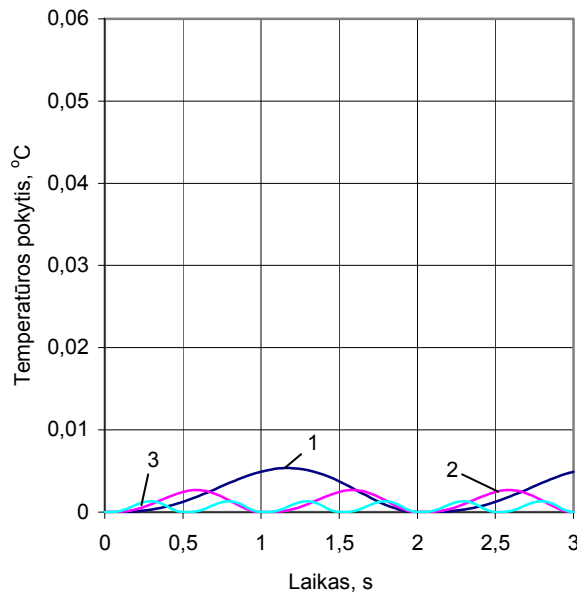
sinuso funkcija, ir lapas svyruoja pusapskritimio trajektorija, augalo lapo temperatūros pokyčio priklausomybės nuo lapo storio skaičiavimo rezultatai pagal (5.43) lygtį pateikti 5.14, 5.15, 5.16 ir 5.17 pav.



5.14 pav. Temperatūros svyravimų augalo lapo plokštelėje priklausomybė nuo augalo lapo svyravimo dažnio, kai lapo svyravimo amplitudė $\beta_A = 30^\circ$. Lapo plokštelės storis 0,1 mm. Augalo lapo svyravimo dažnis: 1 kreivė – $0,5 \text{ s}^{-1}$; 2 kreivė – 1 s^{-1} ; 3 kreivė – 2 s^{-1}

Skaičiavimai atlikti, kai augalo lapo svyravimo amplitudė β_A siekia 30° ir 60° , o svyravimo dažnis f yra $0,5 \text{ s}^{-1}$, 1 s^{-1} ir 2 s^{-1} . Pradinis augalo lapo paviršiaus ir aplinkos temperatūros skirtumas – $2 \text{ }^\circ\text{C}$. Priklausomai nuo lapo svyravimo dažnio, kai lapo svyravimo amplitudė $\beta_A = 30^\circ$ (2.64 ir 2.65 pav.) ir $\beta_A = 60^\circ$, (5.16 ir 5.17 pav.), gaunami panašios trukmės temperatūros svyravimai, tačiau esant didesnei lapo svyravimo amplitudei gaunami didesni lapo temperatūros pokyčiai. Kai augalo lapas svyruoja dažniu $f = 0,5 \text{ s}^{-1}$, 0,1 mm storio lapo temperatūros pokytis pasiekia iki $0,053 \text{ }^\circ\text{C}$, kai $\beta_A = 30^\circ$ (5.14 pav.), ir iki $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, kai

$\beta_A = 60^\circ$ (5.16 pav.). Būdinga, kad esant didesniam augalo lapo storiui gaunami mažesni temperatūros svyravimai. Esant $0,5 \text{ s}^{-1}$ svyravimo dažniui atitinkamai gaunami 10 kartų mažesni 1 mm storio lapo temperatūros pokyčiai, negu 0,1 mm storio lapo, t. y. jie siekia iki $0,0053 \text{ }^\circ\text{C}$, kai $\beta_A = 30^\circ$ (5.15 pav.), ir iki $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$, kai $\beta_A = 60^\circ$ (5.17 pav.).

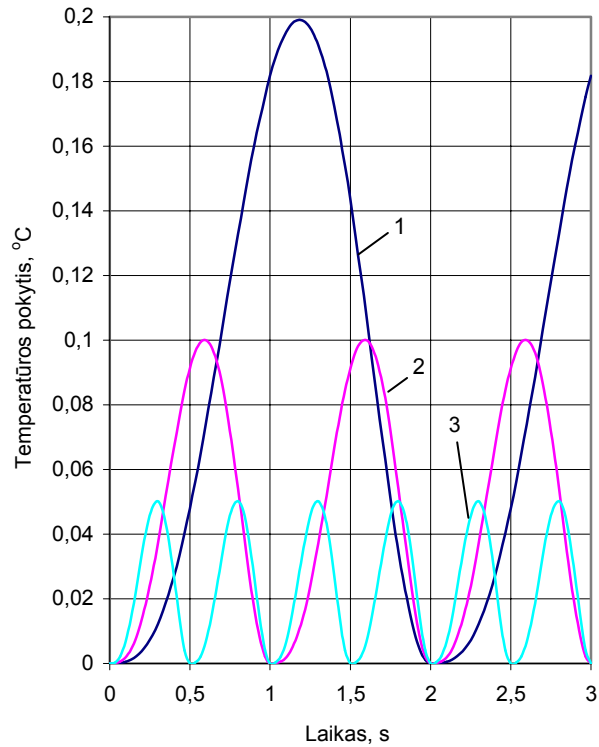


5.15 pav. Temperatūros svyravimų augalo lapo plokštelėje priklausomybė nuo augalo lapo svyravimo dažnio, kai lapo svyravimo amplitudė $\beta_A = 30^\circ$. Lapo plokštelės storis 1 mm. Augalo lapo svyravimo dažnis: 1 kreivė – $0,5 \text{ s}^{-1}$; 2 kreivė – 1 s^{-1} ; 3 kreivė – 2 s^{-1}

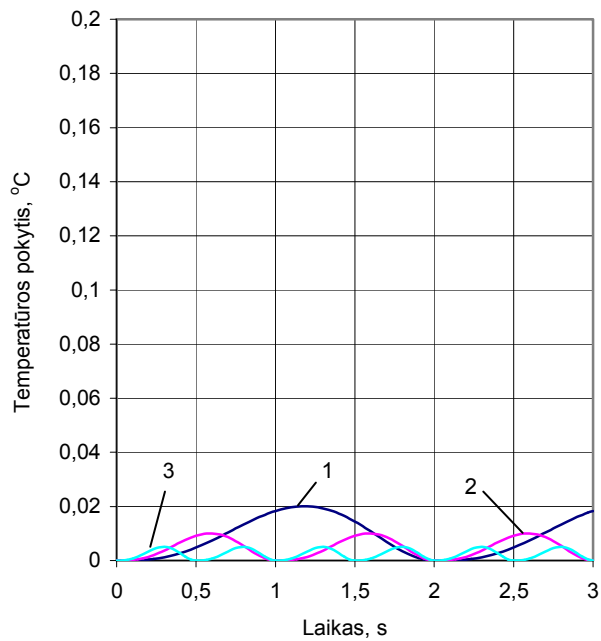
Duomenys, pateikti 5.14, 5.15, 5.16 ir 5.17 pav. rodo, kad saulėtu paros metu saulės energijos svyravimai, augalo lapui natūraliai keičiant padėtį saulės atžvilgiu, sukelia ir augalo lapo lokalias temperatūros svyravimus.

Duomenys, pateikti 5.18 pav., rodo, kad temperatūros impulso metu pasiekta maksimali lokali temperatūra augalo lapo plokštelėje, esant kitoms vienodoms sąlygoms, priklauso nuo lokalaus augalo lapo storio. Vidutinio drėgnumo augaviečių augalų (mezofitų) lapų gyslotumas ir

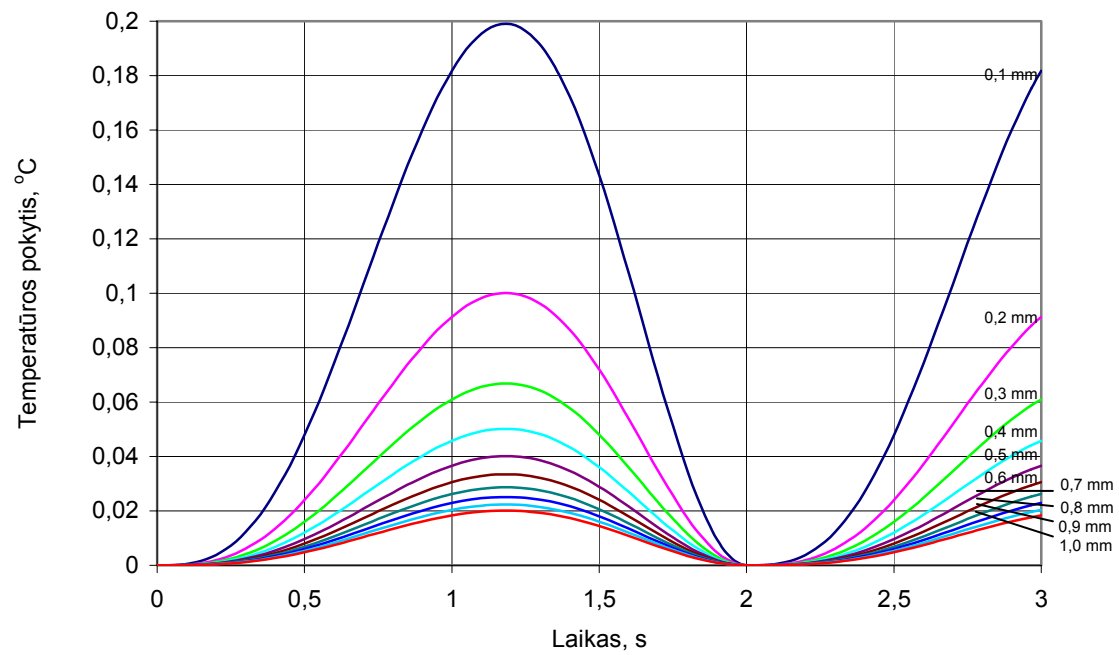
lapo anatinė sandara sukelia jų skersinio pjūvio storio (lapo ploto vieteto masės) lokalų kitimą. Tai įvertinę gauname, kad lokali augalo lapo storio kaita sukelia lokalius lapo temperatūros svyravimus. Todėl augalo lapo plokštelė natūralioje aplinkoje saulėtu paros metu, keičiant padėtį saulės atžvilgiu, tampa kintančia temperatūros mozaika. Apie lokali temperatūros svyravimų dydžius augalo lapo plokštelėje galime spręsti iš 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 ir 5.18 pav. pateiktų duomenų.



5.16 pav. Temperatūros svyravimų augalo lapo plokštelėje priklausomybė nuo augalo lapo svyravimo dažnio, kai lapo svyravimo amplitudė $\beta_A = 60^\circ$. Lapo plokštelės storis 0,1 mm; augalo lapo svyravimo dažnis: 1 kreivė – $0,5 \text{ s}^{-1}$; 2 kreivė – 1 s^{-1} ; 3 kreivė – 2 s^{-1}

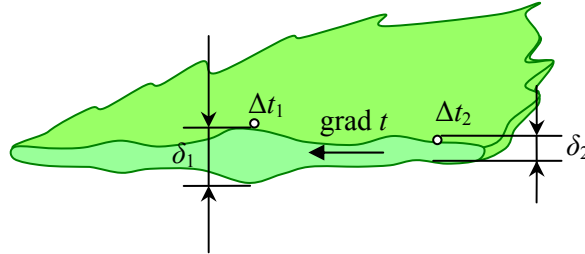


5.17 pav. Temperatūros svyravimų augalo lapo plokštelėje priklausomybė nuo augalo lapo svyravimo dažnio, kai lapo svyravimo amplitudė $\beta_A = 60^\circ$. Lapo plokštelės storis 1 mm; augalo lapo svyravimo dažnis: 1 kreivė – $0,5 \text{ s}^{-1}$; 2 kreivė – 1 s^{-1} ; 3 kreivė – 2 s^{-1}



5.18 pav. Lokalios augalo lapo temperatūros svyravimai priklausomai nuo lapo plokštelės storio, kai augalo lapo svyravimo dažnis $0,5 \text{ s}^{-1}$ ir amplitudė $\beta_A = 60^\circ$

Augalo lapo gyslotumas ir anatinė sandara sukelia lapo plokštelės storio kaitą. Kaip rodo aukščiau pateikti duomenys, augalo lapo plokštelė saulėtu paros metu, keičiant padėtį saulės atžvilgiu, yra kintanti temperatūros mozaika priklausomai nuo lapo skersinio pjūvio storio (lapo ploto vieneto masės). Todėl dėl skirtingo augalo lapo plokštelės storio (5.19 pav.) visame augalo lapo paviršiuje (pvz., δ_1 ir δ_2) susidaro skirtingi saulės energijos sukelti temperatūrų pokyčiai Δt_1 ir Δt_2 .



5.19 pav. Augalo lapo skersinis pjūvis

Kaip matome, minėtųjų skirtingo storio augalo lapo dalių temperatūros gradientas ($\text{grad } t$) ir temperatūrų skirtumas Δt_δ yra sąlygojami šių lapo storio skirtumų. Remdamiesi prielaida, kad $\Delta t_2 > \Delta t_1$, ir formule (5.43), skirtingo storio δ_1 ir δ_2 augalo lapo dalių temperatūrų skirtumą Δt_δ galime išreikšti taip:

$$\Delta t_\delta = \Delta t_2 - \Delta t_1 = \left(2(t_1 - t_0) + \frac{wr}{\alpha} \right) \times \left(\exp\left(\frac{-\alpha S \tau}{\rho c \delta_1} \right) - \exp\left(\frac{-\alpha S \tau}{\rho c \delta_2} \right) \right). \quad (5.48)$$

Priklausomai nuo augalo lapo plokštelės storio kitimo gauname analogišką augalo lapo audinių temperatūros mozaiką. Saulės energijos svyravimai augalo lapo plokštelės audiniuose sukelia lokalius temperatūros svyravimus, kurie augalo lapo plokštelėje sukuria šilumos srautus, veikiamus temperatūros gradiento $\text{grad } t$. Šilumos srauto kryptis augalo lapo audiniuose yra nukreipta temperatūros išsilyginimo kryptimi.

5.4. Augalo lapo temperatūros svyravimų poveikis jo energinei apykaitai su aplinka

Matėme (5.3 skyrius), kad augalo lapas natūraliai keičiant padėtį saulės atžvilgiu patiria saulės energijos poveikį, kuris sukelia temperatūros svyravimus augalo lapo audiniuose. Pagal šioms svyravimams skaičiuoti pateiktas lygtis (5.41), (5.43) ir grafikus (5.14, 5.15, 5.16 ir 5.17 pav.) galima spręsti apie augalo lapo temperatūrų pokyčius kintant lapo padėčiai saulės atžvilgiu. Skaičiavimo būdu nustatant augalo lapo temperatūrų pokyčius energijų apykaitos procesas buvo schematizuotas. Nagrinėjant labai trumpą laiko periodą transpiracijos $Q_3 = const$ ir konvekcinių šilumos mainų $Q_2 = const$ intensyvumas buvo pastovus. Konstatavę ir pagrindę lapo judesį kaip išorinį veiksni, sukeltą augalo lapo temperatūros pokyčius, toliau galime termodinamiškai nagrinėti augalo energijų balansą, siekdami išsiaiškinti galimus transpiracijos Q_3 ir konvekcinių šilumos mainų Q_2 pokyčius kintant augalo lapo temperatūrai.

Dėl saulės spinduliuotės poveikio augalo lapo temperatūros svyravimai gali vykti neigiamo ($t_1 > t_0$) arba teigiamo ($t_0 > t_1$), temperatūros gradiento srityje. Kintančio temperatūros gradiento atvejis mažai tikėtinas. Vadinasi, temperatūros gradiento atžvilgiu galimi du realūs augalo lapo temperatūros svyravimų atvejai.

1 atvejis. Nagrinėjame atvejį, kai augalo lapo temperatūros svyravimai dėl saulės energijos poveikio vyksta teigiamo temperatūros gradiento srityje. Augalo lapo temperatūra t_1 yra mažesnė už jį supančio oro t_0 temperatūrą ($t_0 > t_1$), t. y. aplinkos oras konvekcinių šilumos mainų būdu atiduoda šilumą augalui. Sakykime, kad aplinkos temperatūra t_0 nagrinėjamoju trumpalaikiu periodu yra pastovi, kinta tik augalo lapo temperatūra t_1 dėl saulės energijos poveikio. Augalo energinės apykaitos procesą 1–0, naudodamiesi anksčiau aptarta metodika ir analizės taisyklėmis (2.14 ir 2.15 pav.), pateikiame $h-x$ diagramoje (5.20 pav.). Vėjo sužadinta saulės spinduliuotė sukelia staigius augalo lapo temperatūros t_1 pokyčius, kurie vyksta per tarpinius taškus 1_C , 1_B ir patenka į kraštinę temperatūros impulso padėtį 1_A . Gauname vieno temperatūros impulso periodo augalo energijų apykaitos proceso kraštines padėtis 1–0 ir 1_A-0 $h-x$ diagramoje (5.20 pav.).

Nustatome augalo energinės apykaitos procesų 1–0 ir 1_A–0 minimalų būtiną oro kiekį $G_{1\min}$, dalyvaujantį transpiracijos procese. Kaip matyti iš (2.14) lygties, $G_{1\min}$ priklauso nuo oro drėgnių x_1 ir x_0 skirtumo. Iš 2.70 pav. pateiktos augalo lapo temperatūros svyravimų schemos $h-x$ diagramoje matome, kad oro drėgnių $x_1 - x_0$ ir $x_{1A} - x_0$ skirtumai yra nevienodi. Įvertinę šiuos skirtumus minimalų būtiną oro kiekį $G_{1\min}$, dalyvaujantį transpiracijos procesuose 1–0 ir 1_A–0, apskaičiuojame pagal lygtis:

$$\text{procesas 1–0} \quad G_{1\min} = \frac{1}{x_1 - x_0}; \quad (5.49)$$

$$\text{procesas 1}_A\text{–0} \quad G_{1\min A} = \frac{1}{x_{1A} - x_0}. \quad (5.50)$$

Lygtys (5.49) ir (5.50) rodo, kad energinės apykaitos procesuose 1–0 ($G_{1\min}$) ir 1_A–0 ($G_{1\min A}$) dalyvauja nevienodas aplinkos oro kiekis, kuris gali absorbuoti 1 kg augalo lapo išgarintos drėgmės.

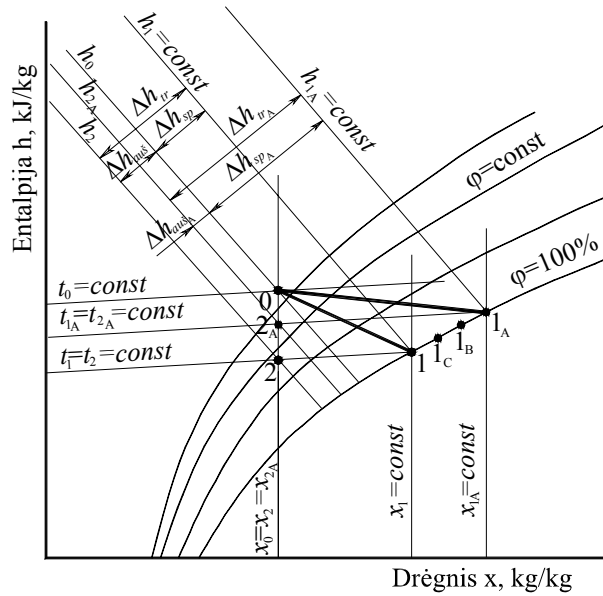
Augalo energinės apykaitos procesų analizė $h-x$ diagramoje (5.20 pav.) rodo, kad procesuose 1–0 ir 1_A–0 transpiracijos proceso entalpijų pokyčiai Δh_{tr} ir Δh_{trA} yra nevienodi. Matome, kad augalo energinės apykaitos procesuose 1–0 ir 1_A–0 dalyvauja nevienodi minimalūs aplinkos oro kiekiai $G_{1\min}$ ir $G_{1\min A}$, gaunami nevienodi entalpijų pokyčiai Δh_{tr} ir Δh_{trA} . Tačiau šilumos (energijos) kiekis, sunaudojamas transpiracijai (1 kg vandens išgarinti), lieka vienodas. Tai galime nustatyti naudodamiesi $h-x$ diagramos duomenimis. Remdamiesi (2.46) lygties pagrindu sudarome lygybę:

$$Q_3 = G_{1\min} \Delta h_{tr} = G_{1\min A} \Delta h_{trA}. \quad (5.51)$$

Žinodami $G_{1\min}$ (2.172) ir $G_{1\min A}$ (5.50), pagal (2.43) lygtį nustatome minimalų šilumos kiekį Q_2 , kuri atiduoda aušdamas aplinkos oras augalo lapui šildyti $Q_{2\min}^{aus}$ transpiracijos proceso metu, augalui išgarinant 1 kg drėgmės procesų 1–0 ir 1_A–0 metu, naudodamiesi lygtimis:

$$Q_{2\min}^{aus} = (h_0 - h_2) G_{1\min} = \Delta h_{aus} G_{1\min}; \quad (5.52)$$

$$Q_{2\min A}^{aus} = (h_0 - h_{2A})G_{1\min A} = \Delta h_{ausA} G_{1\min A} \quad (5.53)$$



5.20 pav. Augalo lapo energinės apykaitos, kintant lapo temperatūrai teigiamo temperatūros gradiento srityje ($t_0 > t_1$), esant pastoviai aplinkos oro temperatūrai t_0 , schema $h-x$ diagramoje

Nagrinėdami augalo energinės apykaitos schemą $h-x$ diagramoje (5.20 pav.) matome, kad procesų 1–0 ir 1_A–0 metu yra skirtingi entalpijų pokyčiai Δh_{aus} ir Δh_{ausA} , taip pat nevienodi minimalūs aplinkos oro kiekiai $G_{1\min}$ (5.49) ir $G_{1\min A}$ (5.50). Energijų dalyvaujančių konvekciniuose šilumos mainuose su aplinka skaičiavimo rezultatai, naudojantis lygtimis (5.52), (5.53) ir $h-x$ diagrama rodo, kad energinės apykaitos procesuose 1–0 ir 1–0_A šilumos kiekis, sunaudojamas lapui šildyti, yra nevienodas. Taigi šilumos kiekis $Q_{2\min}^{aus}$ nelygus $Q_{2\min A}^{aus}$. Tai yra todėl, kad oro masė $G_{1\min}$ proceso 1–0 metu aušinama nuo t_0 iki t_1 ($t_0 - t_1$), o proceso 1_A–0 metu oro masė $G_{1\min A}$ aušinama mažesniu temperatūrų skirtumu

nuo tos pačios temperatūros t_0 iki t_{1A} ($t_0 - t_{1A}$). Papildomą energijos kiekį tiekia aušdamas aplinkos oras, kuris šilumos pavidalo atiduodamas augalo lapo transpiracijos procesui.

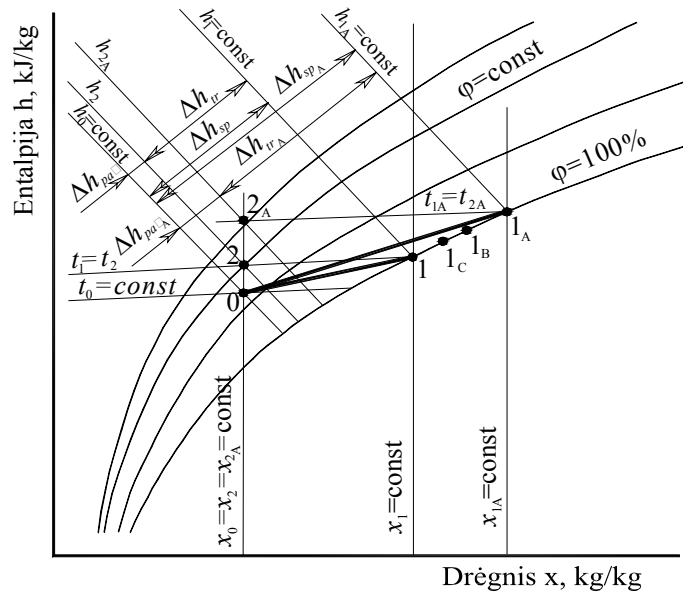
Transpiracijos kriterijų S_k randame naudodamiesi (2.55) lygtimi. Skaičiavimo duomenys, gauti panaudojus $h-x$ diagramą rodo, kad augalo lapo temperatūros svyravimai sukelia didelius transpiracijos kriterijaus S_k pokyčius.

2 atvejis. Nagrinėjame atvejį, kai augalo lapo temperatūros svyravimai dėl saulės energijos poveikio vyksta neigiamo temperatūros gradiento srityje, t. y. kai lapo temperatūra t_1 yra didesnė už jį supančio oro temperatūrą t_0 ($t_1 > t_0$). Aušdamas augalo lapas konvekcinių šilumos mainų būdu atiduoda šilumą aplinkos orui. Laikome, kad aplinkos temperatūra t_0 nagrinėjamoju trumpalaikiu periodu yra pastovi, kinta tik augalo lapo temperatūra t_1 . Augalo energinės apykaitos procesą 1–0, naudodamiesi anksčiau aptarta metodika ir analizės taisyklėmis (2.10 pav.), pateikiame $h-x$ diagramoje (5.21 pav.). Staigus augalo lapo temperatūros t_1 kitimas saulės spinduliuotės metu vyksta per tarpinius taškus 1_C , 1_B ir patenka į kraštinę temperatūros impulso padėtį 1_A . Gauname augalo energinės apykaitos proceso kraštines padėtis 1–0 ir 1_A-0 $h-x$ diagramoje (5.21 pav.) vieno temperatūros impulso metu.

Naudodamiesi 1 atvejo nagrinėjimo eiga ir (5.49) bei (5.50) lygtimis nustatome augalo energinės apykaitos procesams 1–0 ir 1_A-0 būtiną minimalų oro kiekį, dalyvaujantį transpiracijos procese $G_{1 \min}$. Iš skaičiavimo duomenų matome, kad energinės apykaitos procesuose 1–0 ($G_{1 \min}$) ir 1_A-0 ($G_{1 \min A}$) dalyvauja nevienodas minimalus aplinkos oro kiekis, kuris gali absorbuoti 1 kg augalo lapo išgarintos drėgmės.

Augalo energinės apykaitos procesų analizė $h-x$ diagramoje (5.21 pav.) rodo, kad procesų 1–0 ir 1_A-0 transpiracijos entalpijų pokyčiai Δh_{tr} ir Δh_{trA} yra nevienodi. Tačiau transpiracijai sunaudojamas šilumos (energijos) kiekis yra vienodas, nes išgarinama 1 kg vandens. Tai įvertinę naudodamiesi $h-x$ diagrama ir (2.22) lygtimi sudarome lygybę:

$$Q_3 = G_{1 \min} \Delta h_{tr} = G_{1 \min A} \Delta h_{trA}. \quad (5.54)$$



5.21 pav. Augalo lapo energinės apykaitos, kintant lapo temperatūrai neigiamo temperatūros gradiento srityje ($t_0 > t_1$), esant pastoviai aplinkos oro temperatūrai t_0 , schema $h-x$ diagramoje

Žinodami $G_{1 \min}$ (5.49) ir $G_{1 \min A}$ (5.50), pagal (2.21) lygtį nustatome minimalų šilumos kiekį Q_2 , kurį augalo lapas aušdamas atiduoda aplinkos orui šildyti $Q_{2 \min}^{pas}$ transpiracijos proceso metu išgarindamas 1 kg drėgmės procesų 1-0 ir 1_A-0 metu:

$$Q_{2 \min}^{pas} = (h_2 - h_0)G_{1 \min} = (h_3 - h_0)G_{1 \min} = \Delta h_{pas} G_{1 \min}; \quad (5.55)$$

$$Q_{2 \min A}^{pas} = (h_2 - h_0)G_{1 \min A} = (h_3 - h_0)G_{1 \min A} = \Delta h_{pasA} G_{1 \min A}. \quad (5.56)$$

Nagrinėdami augalo energinės apykaitos schemą $h-x$ diagramoje (2.71 pav.) matome, kad energinės apykaitos procesuose 1-0 ir 1_A-0 entalpijų pokyčiai Δh_{aus} ir Δh_{aus} yra nevienodi. Kadangi drėgnių skirtumai $x_1 - x_0$ ir $x_{1A} - x_0$ nevienodi, bus skirtingi minimalūs aplinkos oro

kiekiai $G_{1\min}$ (5.49) ir $G_{1\min A}$ (5.50). Energijų, sunaudojamų šilumos mainams su aplinka, skaičiavimo rezultatai naudojantis lygtimis (5.55) (5.56) ir $h-x$ diagrama rodo, kad energijos apykaitos procesuose 1–0 ir 1–0_A šilumos kiekis, sunaudojamas orui šildyti, kol išgarinama 1 kg vandens, taip pat yra nevienodas. Taigi šilumos kiekis $Q_{2\min}^{aus}$ nelygus $Q_{2\min A}^{aus}$. Tai yra todėl, kad augalo lapo oro masė $G_{1\min}$ procese 1–0 šildoma nuo t_0 iki t_1 ($t_1 - t_0$). Proceso 1_A–0 metu oro masė $G_{1\min A}$ šildoma nuo tos pačios temperatūros t_0 iki temperatūros t_{1A} mažesniu temperatūrų skirtumu ($t_{1A} - t_0$). Transpiracijos proceso metu augalo lapas, atiduodamas aplinkos orui šilumą, netenka atitinkamai energijos $Q_{2\min}^{pas}$ arba $Q_{2\min A}^{pas}$.

Transpiracijos skaičių S_k randame iš (2.24) lygties. Skaičiavimo duomenys, gauti panaudojus $h-x$ diagramą rodo, kad augalo lapo temperatūros svyravimai sukelia didelius transpiracijos kriterijaus S_k pokyčius.

Apibendrinant saulės energijos sukeltus augalo lapo temperatūros svyravimus neigiamo ($t_1 < t_0$) ir teigiamo ($t_0 > t_1$) temperatūrų gradiento srityse galima teigti, kad šie svyravimai keičia transpiracijos proceso intensyvumą. Taip pat kinta augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumas, nes augalo audinių termoakumuliacija sukelia temperatūros pokyčius augalo audiniuose. Kintant augalo audinių temperatūrai kinta konvecciniai šilumos mainai su aplinka.

5.5. Augalo lapo temperatūros svyravimai

Atlikus augalų ir aplinkos energinės apykaitos analizę paaiškėjo, kad natūralioje aplinkoje augalai gali patirti be galo daug energinės apykaitos atvejų. Augalų ir aplinkos energinės apykaitos požiūriu, kaip rodo 2.3 lentelėje pateikti duomenys, augalas teoriškai gali patirti 11 būdingų energinės apykaitos atvejų. Realiai natūralioje aplinkoje augalas patiria 7 tokius atvejus. Visus galimus augalo lapo energinės apykaitos procesus apibūdina šių procesų analizė $h-x$ diagramose, kurios pateiktos 2.29, 2.30 ir 2.31 pav. Jie nurodo augalo augimo, vystymosi, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas. Tačiau daug sudėtingesni energinės apykaitos procesai vyksta natūralioje, nuolat kintančioje aplinkoje. Augale vykstančių biologinių procesų (transpiracijos, konveccinio šilumos ati-

davimo, metabolitų judėjimo ir kt.) tąsa augalo fizinėje aplinkoje yra labai sudėtinga. Augalo aplinkoje vykstančių procesų dėsningumai, jų kilmė, susidarymo mechanizmas ir priklausomybė nuo daugybės biologinių ir fizikinių rodiklių taip apsunkina augalų energinės apykaitos tyrimus, kad daugeliu atvejų realiai vykstančius procesus tenka schematizuoti.

Augalo lape vykstančių biologinių ir energinių procesų ir jo energinės apykaitos su aplinka rezultatą rodo lokali lapo temperatūra. Augalo lapo ar lokaliios jo dalies temperatūra yra lapo energijų balanso rezultatas, nusakomas (1.7) ir (1.9) energijų balanso lygtimis. Nuo augalo audinių temperatūros priklauso visi augalo biologiniai procesai, todėl augalo lapo ir jo aplinkos temperatūra įgauna ypatingą reikšmę. Todėl daugelis tyrinėtojų vykdė tiesioginius jos matavimus, sukurta daugybė tam skirtų priemonių, kurias detalai aprašėme. Tačiau tyrusieji augalo temperatūrą naudodami tiesioginius jos matavimus neįvertino, kad mažo šilumos laidžio ir plonų objektų (tokių kaip augalo lapas) temperatūros matavimas yra sudėtinga fizikinė problema. Temperatūros jutiklis teisingai rodo tada, kai įgyja matuojamo objekto temperatūrą. Neįvertinta, kad temperatūros impulsą perduodančio jutiklio temperatūra yra šilumos mainų su visa jį supančia aplinka rezultatas, o ne vien tik su mus dominančia augalo dalimi. Todėl literatūroje pateikiami duomenys gana prieštaringi. Lokali augalo lapo temperatūra priklauso nuo lokalaus augalo lapo energijų balanso. Visas augalas, taip pat ir kiekvienas jo lapas ar jo dalis su aplinka energiniu požiūriu sąveikauja atskirai. Todėl kiekvieno augalo lapo ar jo dalies energijų balansas tiriamuoju momentu gali būti skirtingas. Atskirų augalo energijų balanso narių įtaka yra gana nevienoda. Tai lemia ne tik augalo fiziologiniai procesai, bet ir savita jo energinė apykaita su augavietės aplinka.

Natūraliomis aplinkos sąlygomis saulėtu paros metu augalo energinėje apykaitoje dalyvaujanti aplinka yra dinamiška, sukelianti kintamus procesus ir lokalius augalo dalies balansus.

Aptarkime augalo energinės apykaitos veiksnius, darančius įtaką lokaliui nestabiliam augalo energijų balansui.

1. Augalo lapai yra lankstūs. Natūraliomis aplinkos sąlygomis, esant mažiausiam vėjui, augalo lapai keičia savo padėtį saulės atžvilgiu. Svyruojantis lapas atitinkamai gauna kintantį saulės energijos kiekį Q_1 , kuris sukelia jo energijų balanso pokyčius. Augalo lapo apšvita suaktyvina jame vykstančius procesus, taip pat sukelia lapo energijų balanso

pokyčius. Kinta konvekciniai šilumos mainai, transpiracijos intensyvumas, augalo lapo temperatūra ir kiti asimiliacijos procese pasireiškiantys energinės apykaitos rodikliai.

2. Natūraliomis aplinkos sąlygomis esant mažiausiam vėjui augalo lapai keičia savo padėtį saulės atžvilgiu. Svyruojantis augalo lapas atitinkamai gauna kintantį saulės energijos kiekį. Nustatyta (2.5.2 skyrius), kad saulės energijos pulsacijų metu gautas bendras energijos kiekis nepriklauso nuo svyravimo dažnio tame pačiame laiko intervale. Svyravimo dažnis lemia momentinį saulės energijos sumažėjimo dydį.

3. Skirtinga anatominė augalo dalių geometrinė forma yra viena iš priežasčių, sukeliančių įvairias temperatūras skirtingos geometrinės formos augalo dalyse. Todėl augalo dalies geometrinė forma daro įtaką jo energinei apykaitai.

4. Saulės energija, augalo lapuose virtusi šiluma, turi būti atiduota aplinkai arba sukaupta augalo audiniuose didinant jų temperatūrą. Temperatūros impulso metu pasiekta maksimali lokali temperatūra augalo lapo plokštelėje, esant kitoms vienodoms sąlygoms, priklauso nuo lokalaus augalo lapo storio. Augalo lapų gyslotumas ir anatominė sandara sukelia jų skersinio pjūvio storio (lapo ploto vieneto masės) lokalų kintimą. Todėl dėl skirtingų augalo lapo plokštelės storių visame augalo lapo paviršiuje (pvz., δ_1 ir δ_2) susidaro skirtingi saulės energijos sukelti temperatūrų pokyčiai Δt_1 ir Δt_2 . Dėl šios priežasties augalo lapo plokštelė natūralioje aplinkoje saulėtu paros metu, keičiant padėtį saulės atžvilgiu, tampa svyruojančia temperatūros mozaika.

5. Išnagrinėjus saulės energijos sukeltus augalo lapo temperatūros svyravimus neigiamo ($t_1 < t_0$) ir teigiamo ($t_0 > t_1$) temperatūrų gradiento srityse galima teigti, kad augalo lapų temperatūros svyravimai keičia transpiracijos proceso intensyvumą. Taip pat kinta augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka intensyvumas, nes dėl augalo audinių termoakumuliacijos augalo audiniuose atsiranda temperatūros pokyčių. Kintant augalo audinių temperatūrai kinta konvekciniai šilumos mainai su aplinka.

6. Pagal augalų energinės apykaitos procesų, vykstančių augalo dalių paviršiuje, dėsnius, augalo dalies paviršiuje egzistuoja temperatūrinis augalo apykaitos su aplinka sluoksnis, kuriame oro srauto temperatūra dėsningai kinta nuo augalo dalies paviršiaus iki augalą supančio oro temperatūros. Todėl gretimas augalo dalis veikia kintančios temperatūros

oro srautas, kurį suformuoja kitų augalo dalių temperatūrinis apykaitos sluoksnis.

7. Augalo dalies temperatūra, išskyrus perėjimo momentus iš teigiamo į neigiamą (arba atvirkščiai) temperatūros gradientą, visuomet skiriasi nuo aplinkos temperatūros.

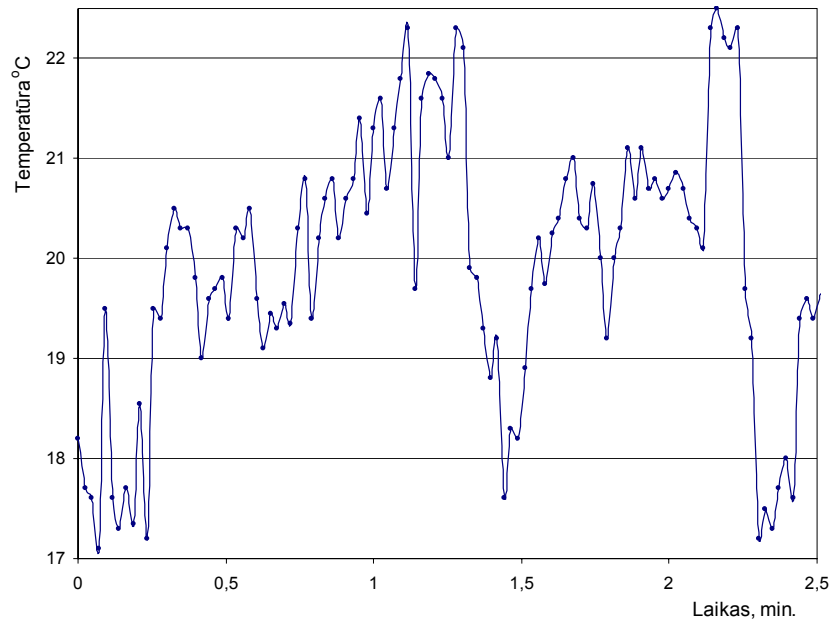
8. Vertikalus oro temperatūros kitimas pasėlyje natūraliomis aplinkos sąlygomis šviesiu paros metu sudaro kintamas termines sąlygas augalo energinei apykaitai skirtinguose pasėlio aukščiuose (4.1 skyrius).

9. Augalą supančio oro temperatūros svyravimai teigiamo ir neigiamo temperatūros gradiento srityje sukelia temperatūros svyravimus augalo audiniuose. Kintant augalo audinių temperatūrai kinta konvekciniai šilumos mainai su aplinka ir augalo energinė apykaita.

10. Aiškūs augalo temperatūros pokyčius pastebime tada, kai pasireiškia stiprus išorinis veiksnys (staigus vėjo sukūrys, staigus lietus, oro srautai šiltnamiuose, augalų laistymas), sukeliantis esminius augalo dalies energijų balanso pokyčius.

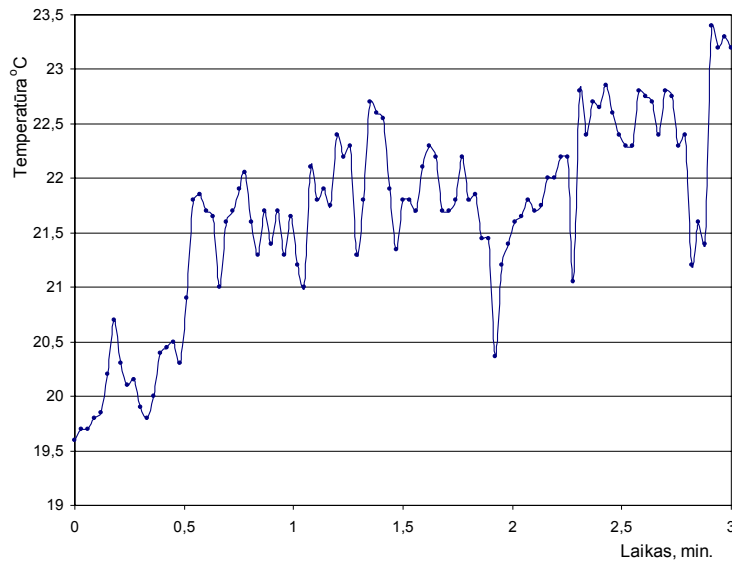
11. Augalo dalių geometrinė forma daro įtaką jų temperatūrai esant kitoms vienodoms sąlygoms, o tai sukelia esminius augalo dalies energijų balanso pokyčius.

Kaip matome, augalo ir aplinkos energinėje apykaitoje dalyvauja labai daug kintančių veiksnių. Daugeliu atvejų šiuos veiksnius labai sunku įvertinti. Augalo lapo temperatūros kitimo dinamiką nusako tam tikro momento energijų balansas, kuris saulėtu paros metu yra nuolatinėje dinaminėje pusiausvyroje. Augalo lapo temperatūros kitimas, kaip dinaminio energijų balanso išraiška, pasireiškia per augalo lapo termoakumuliacijos procesą, kuris sukelia augalo lapo temperatūros ir konvekcinį šilumos mainų su aplinka pokyčius. Turėdami daugiau kaip 40 metų mikroklimato ir augalų temperatūros matavimo patirties pateikiame pavienius temperatūros matavimų rezultatus.

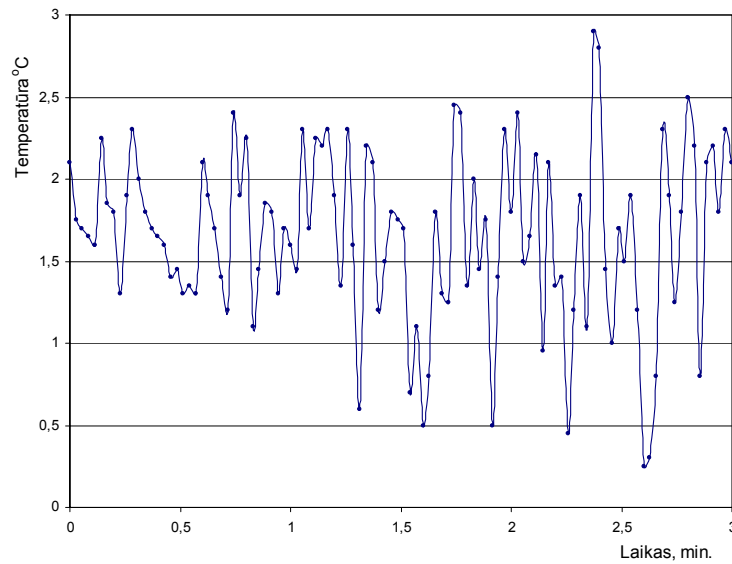


5.22 pav. Oro, supančio augalą, temperatūros svyravimai saulėtu paros metu natūraliomis aplinkos sąlygomis. Vėjo greitis $v_{\text{vid}} = 5,6$ m/s

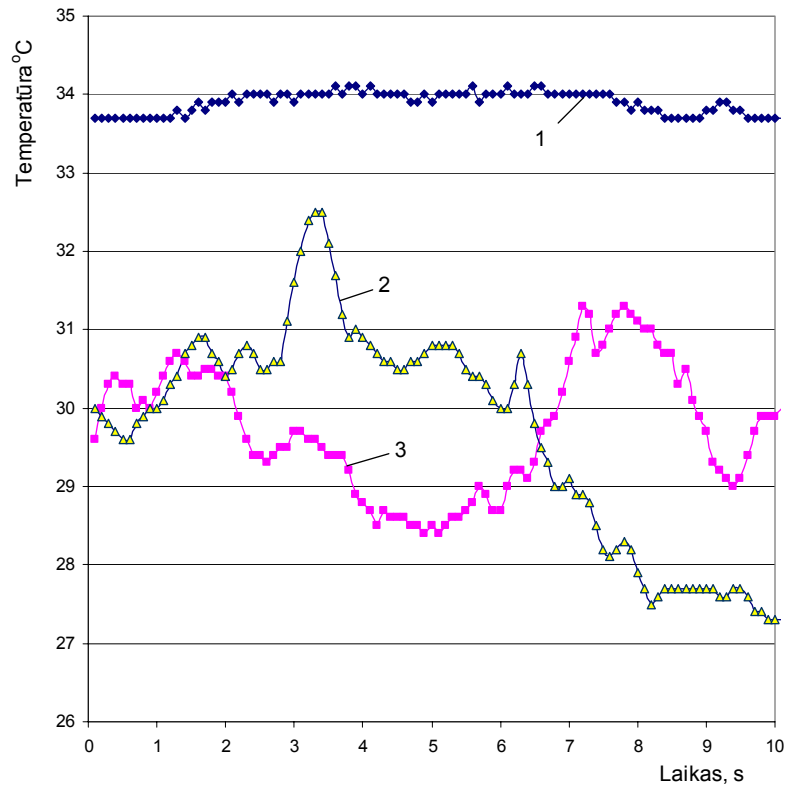
Natūraliomis aplinkos sąlygomis saulėtu paros metu augalą supančio oro temperatūra yra nuolat kintanti (5.22.). Temperatūros svyravimai pastebimi teigiamo ir neigiamo temperatūros gradiento srityje. Nuolat kintanti augalą supančio oro temperatūra sukelia kintamus augalo energinius procesus ir lokalius augalo dalies balansus. Augalo energijų balansą veikiančių veiksnių visuma sukelia temperatūros svyravimus augalo audiniuose (5.23 pav.). Natūraliomis aplinkos sąlygomis saulėtu paros metu pastebime temperatūros gradiento tarp augalo ir aplinkos kaitą (5.24 pav.).



5.23 pav. Augalo lapo temperatūros svyravimai saulėtu paros metu natūraliomis aplinkos sąlygomis. Vėjo greitis $v_{vid} = 5,3$ m/s



5.24 pav. Augalo lapo ir aplinkos temperatūros gradiento svyravimai saulėtu paros metu natūraliomis aplinkos sąlygomis. Vėjo greitis $v_{vid} = 5,8$ m/s



5.25 pav. Augalo lapo plokštelės (1 kreivė) ir oro (2, 3 kreivės) temperatūrų kitimas atitinkamai lapo viršuje ir apačioje saulėtu paros metu natūraliomis aplinkos sąlygomis. Vėjo greitis $v_{\text{vid}} = 0,5\text{m/s}$

Atlikus tyrimus galima teigti (5.22, 5.23, 5.24 ir 5.25 pav.), kad natūralioje aplinkoje saulėtu paros metu augalo ir oro energijų apykaita vyksta nuolat kintančiomis aplinkos sąlygomis. Augalo energijų balanso kaitą sukelia augalo lapo ir oro temperatūros svyravimai. Galutinis rezultatas – transpiracijos ir augalo konvekcinių šilumos mainų su aplinka kintamumas, kuris sukelia augalo energijų apykaitos balanso kaitą.

5.6. Augalo lapo temperatūros svyravimų sukelti termodinaminiai procesai

Augalo energinės apykaitos balanso narys Q_3 apibūdina energijų sąnaudas transpiracijai. Vandens garinimas, taip pat vandens garo kondensacija yra energinis procesas. Transpiracijos proceso metu augalas išgarina vandens tiek, kiek garinti sunaudoja energijos. Transpiracijos procese 1 kg vandens išgarinti sunaudojama garinimo šiluma r (kJ/kg). Vandens garinimo šiluma mažai kinta nuo garinančio paviršiaus (augalo) temperatūros. $r_{10\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2477$ kJ/kg; $r_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2453$ kJ/kg. Taigi augalo transpiracijos intensyvumas gali būti išreiškiamas energiniais vienetais. Jei svyruoja augalo energinis balansas, gali svyruoti ir transpiracijos procesas.

Augalo lapo ventiliacijos sistemoje vyksta garavimo ir kondensacijos procesai. Šių procesų metu vyksta labai sudėtingi šilumos apykaitos procesai, nes kinta vandens agregatinis būvis, iš esmės kinta šilumos atidavimo koeficientas o natūralioje aplinkoje ir procesą apibūdinantys parametrai (Skrinska, 2006, Leskauskas ir kt. 2007, Дзюбенко, Ашмонгас, Мякочин, 2006, Kajaļavičius, 2010, Драганов, 2006, Макаревиčius 2001, 2009). Technikoje kondensacijos ir garavimo procesai tyrinėti vertikaliuose (Panday, 2003, Revankar, Pollock, 2005, Dengliang, et al., 2010) ir horizontaliuose paviršiuose (Chen, Lin, 2009). Augalijos atvejui artimiausi tie tyrimai, kurie susieti su kondensacijos ir garavimo procesais oro ir vandens garo mišinyje (Chen, Lin, 2009, Kajaļavičius, 2010, Драганов, 2006), taip pat garavimo ir kondensacijos procesai, vykstantys vandens lašo paviršiuje (Miliauskas, 2001, Miliauskas ir kt. 2006, 2009, 2010). Nagrinėjant augalo lapo temperatūros svyravimų sukeltus termodinaminius procesus svarbiausias rodiklis yra garavimo ir kondensacijos procesų šilumos atidavimo koeficientas ir jo kitimas (Šinkūnas, Kiela, 2011, Miliauskas ir kt. 2006, 2009, 2010), leidžiantys orientotis analogiškuose procesuose, kurie vyksta augalo lape.

Vandens apykaita augalo aplinkoje lemia vandens patekimą į augalą, judėjimą jame ir jo eikvojimą. Augalo ir aplinkos vandens pusiausvyra yra labai nestabili. Kaip nurodo V. A. Šlapauskas (2006), ją lemia ne vien išoriniai veiksniai, bet ir augalo genotipas, adaptacija, plastiškumas, anatominio reguliavimo galimybės ir natūralių bei antropogeninių veiksnių visuma. Augalų fiziologų aptariamieji veiksniai, darantys įtaką transpiracijos procesui, atsispindi žemiau pateiktose augalo energijų ba-

lanso lygtyse. Neigiamą temperatūros gradientą rodo (5.57) lygtis, o teigiamą – temperatūros gradiento (5.58) lygtis.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2; \quad (5.57)$$

$$Q_3 = Q_1 - Q_2. \quad (5.58)$$

Augalo energijų balanso lygtyse (5.57) ir (5.58) energijų srautų pasiskirstymas tarp Q_2 (konvekcinių šilumos mainų su aplinka) ir Q_3 (garinimo procesui sunaudotos šilumos) priklauso tik nuo aukščiau minėtų transpiracijos procesą veikiančių veiksnių visumos. Tai augalo adaptacijos rezultatas augavietės veiksnių visumai, paskirstant energijos sąnaudas tarp transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų su aplinka, kurie pasireiškia lokaliais augalo dalies temperatūros išraiška.

Augale esantis vanduo tiesioginio ryšio su oru neturi. Lape esantis vanduo nuo aplinkos oro atskirtas žiotelėmis, kutikula, periderma ir kitais dariniais. Kaip teigiama, didžiausią vandens dalį (80–98 %) augalai išgarina pro žioteles. Žiotelių transpiraciją tam tikri augalai gali nevienodai reguliuoti (Šlapakauskas, 2006).

Vandens garavimas augalo lapo žiotelėje skiriasi nuo garavimo atviraime vandens telkinyje, dirvos paviršiuje ir kitur, kur vanduo turi tiesioginį ryšį su aplinkos oru. Tačiau vandens garavimo procesas augalo lapo žiotelėje ir atviraime vandens telkinyje daugeliu požymių yra toks pat:

1. Garavimo procesas ir transpiracija esant vienodoms aplinkos sąlygoms sunaudoja vienodą energijos kiekį 1 kg vandens išgarinti.

2. Augalo lapo žiotelė tiesiogiai susisiekia su požiotelinio tarpulauščio dujine ertme (dujų sudėtis priklauso nuo biologinių procesų) ir lapo dujine sistema. Tačiau lapo dujinės sistemos ir lapo aplinkos slėgis yra vienodas (tai priklauso nuo aplinkos slėgio kitimo greičio 330 m/s). Vandens garavimas augalo lapo žiotelėje ir atviraime vandens telkinyje vyksta į dujinę, vandens garų neprisotintą aplinką.

3. Transpiracijos kaip ir garavimo procese, iš laisvo vandens paviršiaus ar kito vandenį garinančio objekto išgarinant 1 kg vandens dalyvauja vienodas minimalus oro kiekis G_{min} , kuris gali absorbuoti 1 kg išgarintos drėgmės tam tikromis dujinės aplinkos sąlygomis.

Panagrinėkime termodinaminius procesus ir energijų virsmus, vykstančius augalo lapo žiotelėje. Natūraliomis aplinkos sąlygomis egzistuoja labai didelė energinių procesų, vykstančių tarp augalo ir jo ap-

linkos, įvairovė. Saulėtu paros metu augalo lapo temperatūra ir temperatūros gradientas tarp lapo ir jo aplinkos yra nuolat kintantis (5.5 skyrius). Augalo lapo temperatūros kitimas yra augalo energijų balanso rezultatas. Jame atsispindi augalo lapo energijų ir medžiagų apykaita, taip pat augalo aplinkos termodinaminių parametrų pokyčiai. Kintant augalo lapo temperatūrai jo požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse analogiškai vyksta temperatūros kaitos procesai. Nagrinėdami laikome, kad lapo požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse temperatūra kinta $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ribose. Termodinaminius procesus ir termodinaminių parametrų pokyčius lapo požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse nagrinėsime $20\text{--}19\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrų ribose. Taigi temperatūros kaitos intervalas lapo požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse yra $19,5 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pirmiausia panagrinėkime procesus, vykstančius požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse temperatūros mažėjimo periodu.

1. Augalo lapai, kaip ir kiti kūnai, paklūsta gamtos dėsniams. Mažėjant augalo lapo audinių temperatūrai mažėja jų tūris. Žiedinių augalų lapuose, kuriuose vyksta fotosintezė, kvėpavimas, organinių junginių metabolizmas, biosintezė, vandens dalis sudaro $79\text{--}95\%$ visos jų masės (Šlapakauskas, 2006). Laikome, kad augalo lapo audinių tūrinis plėtimosi koeficientas lygus vandens tūrinio plėtimosi koeficientui ($\beta_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0,000138\text{ }1/\text{K}$). Vadinasi, augalo lapo temperatūrai sumažėjus $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dėl lapo audinių susitraukimo lapo dujinės erdmės tūris sumažėja dydžiu $\Delta V_{pl} = -0,000138\text{ }1/\text{K}$.

2. Sumažėjus augalo lapo temperatūrai $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, turi sumažėti ir oro, esančio požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse, tūris dydžiu ΔV . Termodinaminiu požiūriu lapo žiotelės erdmėje vyks sudėtingas politropinis procesas. Siekdami išsiaiškinti maksimalias galimas tūrio sumažėjimo reikšmes laikome, kad procesas vyks esant pastoviam slėgiui $p = \text{const}$. Tuomet oro, esančio žiotelės erdmėje, tūrio sumažėjimas bus skaičiuojamas pagal lygtį:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{R}{p}(T_1 - T_2), \quad (5.59)$$

čia ΔV – oro, esančio požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse, tūrio sumažėjimas mažėjant augalo lapo temperatūrai, kai $p = \text{const}$, m^3/kg ;

V_1 , V_2 – atitinkamai pradinis ir galinis oro tūris požiūtelinių tarpuląsčių erdmėse, kai $p = \text{const}$, m^3/kg ;

R – oro konstanta $R_{\text{oro}} = 287,04 \text{ J/(kg K)}$;
 p – atmosferos oro slėgis (esant normalioms sąlygoms $p = 101325$), Pa;
 T_1, T_2 – atitinkamai pradinė ir galinė oro temperatūros, K.

Skaičiavimai rodo, kad sumažėjus augalo lapo temperatūrai $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (kai $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), oro, esančio žiotelės ertmėje, tūris sumažėja dydžiu:

$$\Delta V_0 = \Delta V \cdot V_1 = 0,003425 \text{ l/K.} \quad (5.60)$$

3. Dujos, esančios požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, yra visiškai prisotintos drėgmės. Remiantis drėgnojo oro termodinamikos dėsniais galima teigti, kad augalo lapo audinių temperatūrai mažėjant, požiotelinių tarpuląsčių ertmėse sienelių paviršiuje vyks drėgmės, esančios dujose, kondensacijos procesas. Išskris kondensatas. Požiotelinių tarpuląsčių ertmių sienelių paviršius sudrėks. Sumažėjus augalo lapo audinių temperatūrai $1 \text{ }^\circ\text{C}$, sumažės vandens garų parcialinis slėgis požiotelinių tarpuląsčių ertmėse dydžiu Δp_g . Vandens garų parcialinis slėgis visiško prisotinimo būsenoje, esant $20 \text{ }^\circ\text{C}$, yra $0,02383 \text{ kg/cm}^2$, o parcialinis slėgis, esant $19 \text{ }^\circ\text{C}$, yra $0,02239 \text{ kg/cm}^2$. Pakitus augalo lapo temperatūrai požiotelinių tarpuląsčių ertmėse parcialinis vandens garų slėgis pakinta dydžiu $\Delta p_g = p_{20 \text{ }^\circ\text{C}} - p_{19 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,02383 - 0,02239 = 0,00144 \text{ kg/cm}^2 = 141 \text{ Pa}$ (N/m^2). Matome, kad garų kondensacijos procesas lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse sukėlė slėgio sumažėjimą joje 141 Pa . Šis slėgio sumažėjimas žiotelės ertmėje sukėlė joje esančio oro tūrio sumažėjimą dydžiu ΔV_g . Tai atsitiko todėl, kad slėgis požiotelinių tarpuląsčių ertmėse liko toks pat, lygus aplinkos oro slėgiui $p = \text{const}$ (esant normalioms sąlygoms $p = 101325 \text{ Pa}$). Remdamiesi termodinamikos dėsniais, oro tūrio, esančio lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, sumažėjimą esant atmosferos oro slėgiui (pakitus slėgiui 141 Pa), galime paskaičiuoti naudodamiesi dujinės aplinkos mišinių sudarymo teorija ir lygtimi:

$$\Delta V_g = \frac{v \cdot \Delta p_g}{p_b} = \frac{R \cdot T \cdot \Delta p_g}{p_b \cdot p_b} = 0,001155 \frac{1}{\text{K}}, \quad (5.61)$$

čia ΔV_g – požiutolinių tarpuląsčių ertmėse esančių dujų tūrio sumažėjimas esant pastoviam slėgiui ($p = const$), sukeltas garų kondensacijos proceso, 1/K;

v – 1 kg dujų, esančių požiutolinių tarpuląsčių ertmėse, savitasis tūris, m³/kg;

Δp_g – slėgio sumažėjimas lapo požiutolinių tarpuląsčių ertmėse, sukeltas garų kondensacijos proceso, Pa;

p_b – aplinkos oro slėgis normaliomis sąlygomis $p_b = 101325$ Pa.

Taigi augalo žiotelėje pakitus lapo audinių temperatūrai 1 °C, pastovaus slėgio aplinkoje (normaliomis sąlygomis $p = 101325$ Pa), požiutolinių tarpuląsčių ertmėse esančio oro tūris pakis dydžiu ΔV_e , kuris yra lygus tūrio pokyčių ΔV_o , ΔV_g , ΔV_{pl} , aritmetinei sumai:

$$\Delta V_e = \Delta V_o + \Delta V_g - \Delta V_{pl}. \quad (5.62)$$

$$\Delta V_e = 0,003425 + 0,001155 - 0,000138 = 0,004441/\text{K}.$$

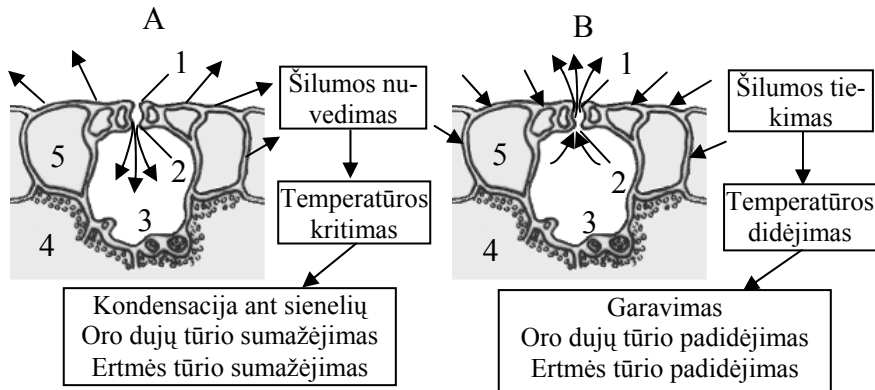
Matome, kad sumažėjus augalo lapo temperatūrai 1 °C (nuo 20 iki 19 °C) požiutolinių tarpuląsčių ertmėse esantis dujų tūris V_e sumažėja dydžiu 0,00444 1/K.

Pasinaudodami termodinaminių procesų, vykstančių lapo požiutolinių tarpuląsčių ertmėse, dėsniais, nustatysime galimą maksimalų slėgio pokytį požiutolinių tarpuląsčių ertmėse atveju, kai žiotelė sąlyginai užkimšta, pakitus lapo temperatūrai 1 °C. Šiomis sąlygomis procesas žiotelės ertmėje vyks esant pastoviam požiutolinių tarpuląsčių ertmės tūriui ($v = const$), tai izochorinis procesas. Slėgio pokytį augalo lapo žiotelėje rasime naudodamiesi lygtimi:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2}. \quad (5.63)$$

Skaičiavimai rodo, kad mažėjant augalo lapo temperatūrai 1 °C, žiotelės ertmėje susidarys vakuumas, o didėjant temperatūrai – slėgis – 347 Pa/°C (35,4 mm H₂O stulpelio). Saulėtu paros metu, kintant augalo lapo temperatūrai, temperatūros svyravimų reikšmėms didėjant, proporcingai didėja slėgio svyravimai lapo požiutolinių tarpuląsčių ertmėse.

Taigi augalo lapo temperatūros svyravimai sukelia slėgio svyravimus augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse. Slėgis – tai mechaninė jėga, kuri sukelia priverstinį dujų judėjimą lapo ventiliacijos sistemoje. Lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse vykstančio priverstinio dujų judėjimo ir termoenergiųjų procesų, kintant lapo temperatūrai, schema pateikta 5.26 pav.



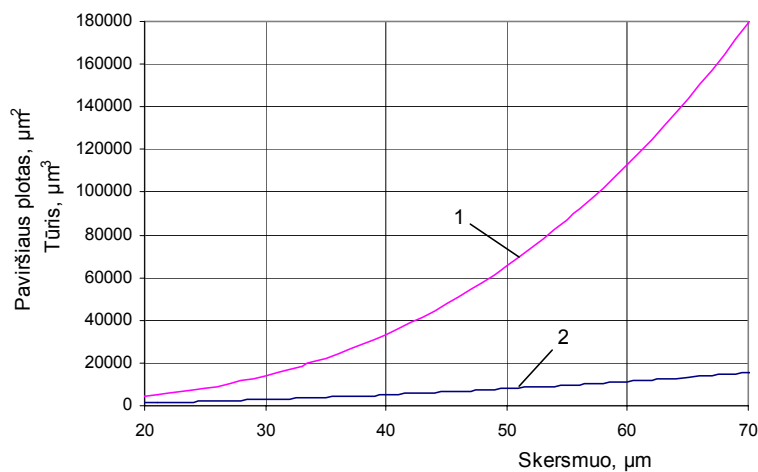
5.26 pav. Lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse vykstančių termoenergiųjų procesų, kintant lapo temperatūrai, schema: A – temperatūros mažėjimo periodas lapo audiniuose; B – temperatūros didėjimo periodas lapo audiniuose; 1 – priekinis žiotelės prieangis; 2 – užpakalinis žiotelės prieangis; 3 – požiotelinis tarpuląstis; 4 – purioji parenchima; 5 – epiderma

Priverstinis augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmių ventiliavimo procesas vyksta esant mažesniems slėgio svyravimams nei teoriškai apskaičiuota pagal (5.62) ir (5.63) lygtis. Teoriniai skaičiavimai atlikti kintant lapo temperatūrai esant sąlyginai užaklintai žiotelei. Mažėjant augalo lapo temperatūrai, nuosekliai mažės slėgis (didės vakuumas), požiotelinių tarpuląsčių ertmėse vyks vandens garų kondensacija. Atsiradus vakuumui žiotelėje aplinkos oras pro žiotelės angą veršis į požiotelinių tarpuląsčių ertmę joje mažindamas vakuumą. Vakuumo gylis žiotelėje priklausys nuo augalo lapo audinių temperatūros pokyčio, hidraulinių pasipriešinimų oro judėjimui pro žiotelę, žiotelės formos, jos atidarymo laipsnio ir daugelio kitų žiotelės ir jos aplinkos termohidromechaninių rodiklių.

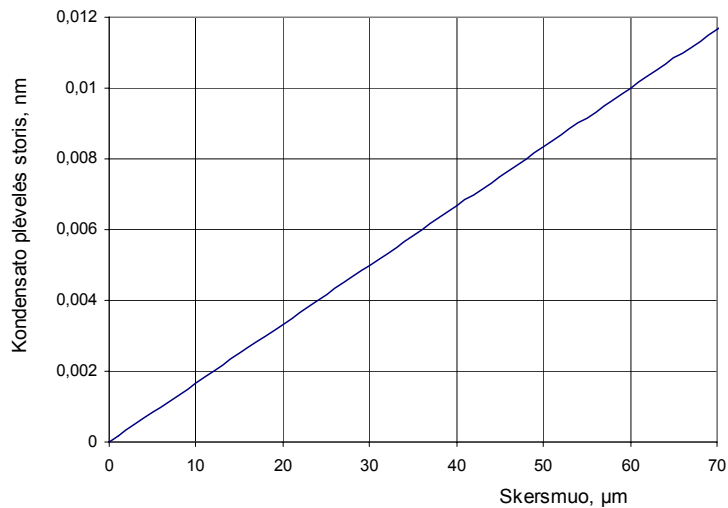
Augalo lapo temperatūros didėjimo periodu didėja slėgis požiotelinių tarpuląsčių ertmėse. Procesai augalo lapo žiotelėje bus analogiški nagrinėtam temperatūros mažėjimo periodui, tik priešingos krypties. Didėjant slėgiui augalo žiotelėje vyks oro dujų iš požiotelinių tarpuląsčių ertmės priverstinis išmetimas į aplinką. Didėjant lapo temperatūrai, mažės santykinis oro drėgnis požiotelinių tarpuląsčių dujinėse ertmėse, vyks drėgmės garavimas (pirmiausia kondensato garavimas tarpuląsčių sienelių paviršiuje). Garavimo procesas naudoja lapo audinių tiekiamą šilumą ir mažina augalo lapo audinių temperatūros didėjimo greitį.

Kintant augalo lapo audinių temperatūrai vyks požiotelinių tarpuląsčių ertmės sienelių paviršiuje esančios drėgmės kondensacijos arba garavimo procesas. Iškritęs kondensatas sudrėkins požiotelinių tarpuląsčių ertmės sienelių paviršius, padengdamas jas kondensato plėvele.

Panagrinėkime vandens garų kondensacijos arba garavimo procesą požiotelinių tarpuląsčių ertmėse kintant augalo lapo temperatūrai. Garo kondensacijos proceso skaičiavimai rodo, kad pakitus augalo lapo temperatūrai $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, iš 1 m^3 oro požiotelinių tarpuląsčių ertmės sienelių paviršiuje iškris 1 g kondensato. Pirmiausia išsiaiškinkime požiotelinių tarpuląsčių paviršiaus plotą, kuriame vyksta vandens garų kondensacija, priklausomybę nuo ertmės tūrio. Kad būtų paprasčiau laikome, kad požiotelinių tarpuląsčių ertmė yra rutulio formos.



5.27 pav. Požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūrio (1 kreivė) ir jos paviršiaus ploto (2 kreivė), turinčio sąlytį su dujine ertme, priklausomybė nuo skersmens



5.28 pav. Kondensato plėvelės storio požiotelinių tarpuląsčių ertmės paviršiuose priklausomybė nuo ertmės skersmens

Skaičiavimo duomenys, pateikti 5.27 paveiksle, rodo, kad požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūris (1 kreivė) didėja greičiau nei jų paviršiaus plotas (2 kreivė). Taigi didėjant augalo lapo požiotelinės ertmės tūriui, turėtų didėti požiotelinių tarpuląsčių ertmės paviršiuose susidariusio kondensato plėvelės storis δ .

Požiotelinių tarpuląsčių ertmėse susidariusio kondensato plėvelės storio δ priklausomybę nuo žiotelės ertmės dydžio lengviausia nustatyti naudojantis žiotelės ertmės tūrio V ir jos paviršiaus ploto S santykiu, kuris išreiškiamas lygtimi:

$$\delta = \frac{V}{S} = \frac{0,1666 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot d^3}{\pi \cdot d^2} = 0,1666 \cdot 10^{-6} d, \quad (5.64)$$

čia δ – kondensato plėvelės storis požiotelinių tarpuląsčių ertmės paviršiuose, μm ;

V – požiotelinės tarpuląsčių ertmės tūris, μm^3 ;

S – požiotelinių tarpuląsčių ertmės paviršiaus plotas, μm^2 ;

d – požiotelinių tarpuląsčių ertmės skersmuo, μm .

Kaip matome iš lygties (5.64), požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūrio ir jos paviršiaus santykis V/S priklauso nuo ertmės skersmens d (5.28 pav.). Todėl požiotelinių tarpuląsčių sienelių paviršiuje susidariusios kondensato plėvelės storis priklauso nuo jos dydžio, kuriam didėjant jis didėja. Kondensato plėvelės storis augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių sienelių paviršiuje priklauso nuo jos dydžio ir temperatūrų pokyčio augalo lapo audiniuose.

Pateiktas termodinaminių procesų, vykstančių lapo žiotelės ertmėje, nagrinėjimas yra labai schematizuotas, naudojant fenomenologinį metodą, visiškai nesigilinant į biologinius procesus ir priežastis, nulėmusias šių procesų vyksmą. Neįvertinta CO_2 , O_2 , Q (šilumos), H_2O garų priešingų krypčių srautai, įvairių (temperatūros, drėgnio, dujų koncentracijų) gradientų vaidmuo, energijų apykaita ir kiti fiziniai ir biologiniai veiksniai. Suprantama, visų minėtų veiksnių įvertinti neįmanoma dėl problemos sudėtingumo.

Procesų, vykstančių lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse nagrinėjimas atskleidė, kad saulėtu paros metu svyruojant lapo temperatūrai, augalo lape sukuriama mechaninė jėga, kuri atlieka lapo žiotelių priverstinę ventiliaciją. Čia šilumos energija žioteliniame lapo variklyje paverčiama mechanine. Energijų virsmą sukelia augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse vykstantys slėgio svyravimai ir jose esančios drėgmės garavimo arba kondensacijos procesų kaita. Vandens garo kondensacijos arba garavimo proceso išaiškinimas požiotelinių tarpuląsčių ertmėse verčia keisti požiūrį į fiziologinius procesus, vykstančius augalo lapo žiotelėje ir požiotelinių tarpuląsčių ertmėse.

Augalo lapo „laboratorija“ ilgame savo vystymosi kelyje be abejonės maksimaliai prisitaikė prie aplinkos sąlygų, panaudodama visas augalo aplinkos galimybes. Išaiškinus, kad augalo lapo žiotelėse ir požiotelinių tarpuląsčių ertmėse vyksta šilumos energijos virtimas mechanine energija, matyti, kad reikia ieškoti termodinaminio ciklo, kuriame augalo lapo žemo potencialo šilumos energija paverčiama mechanine energija.

5.7. Energijos virsmų augalo lapuose termodinaminis ciklas

Augalo lapo žiotelė ir požiotelinių tarpuląsčių ertmės, esant temperatūrų svyravimams (5.6 skyrius), šilumos energiją gali paversti mechanine energija. Sąlygas, kurioms esant šilumos energija gali virsti mechanine energija, nusako antrasis termodinamikos dėsnis. Šiam energijų virsmui reikia turėti:

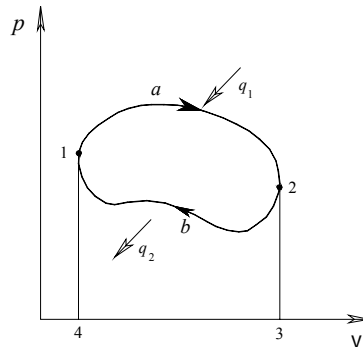
1. Du skirtingų temperatūrų šilumos šaltinius. Ši sąlyga nagrinėjamoju atveju yra įvykdyta. Augalo lapo aplinkoje yra du skirtingų temperatūrų šilumos šaltiniai. Tai augalo lapo ir jo aplinkos temperatūros. Kaip matėme, šios temperatūros visada yra skirtingos, išskyrus trumpalaikius pereinamuosius procesus iš teigiamo į neigiamą (ir atvirkščiai) temperatūros gradientą.

2. Energijų virsmo procesui būtinas ciklinis, periodiškai kintantis procesų pobūdis. Ši sąlyga nagrinėjamoju atveju yra įvykdyta. Analizuodami energinius procesus, vykstančius augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse (5.6 skyrius) matėme, kad saulėtu paros metu šie procesai yra kintančio ciklinio pobūdžio. Augalo lapo temperatūra ir slėgis lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse patiria pokyčius. Vyksta temperatūros, slėgio ir tūrio svyravimai. Kinta vandens būseną (vyksta garo kondensacija ↔ garavimas) požiotelinių tarpuląsčių ertmėse.

Saulėtu paros metu, vykstant temperatūros svyravimams augalo lape, antrojo termodinamikos dėsnio reikalavimai šilumos energijai paversti mechanine energija įvykdyti. Vadinasi, augalo lape egzistuoja žiotelinis variklis, sukuriantis mechaninę energiją. Jis dirba tiksliai saulėtu paros metu, kai augalo lape vyksta temperatūros svyravimai.

Panagrinėkime lape veikiančio žiotelinio variklio darbo ciklą. Mažėjant augalo lapo temperatūrai vyksta aušimo ir šilumos q_2 nuvedimo procesas, kurio metu mažėja dujų tūris lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, vyksta aplinkos oro priverstinis įsiurbimas. Šį procesą pV (slėgis – tūris) koordinacių sistemoje vaizduoja kreivė 1a2 (5.29 pav.). Didėjant augalo lapo temperatūrai vyksta šildymo ir garinimo procesas, suteikiama šiluma q_1 , didėja slėgis požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, vyksta plėtimosi procesas, išmetama į aplinką dalis dujų, esančių požiotelinių tarpuląsčių ertmėse. Šį procesą pV (slėgis – tūris) koordinacių sistemoje vaizduoja kreivė 2b1 (5.29 pav.). Gauname uždara kreivę 1a2b1, kuri termodinamikoje vadinama ciklu. Uždaro ciklo plotas pV (slėgis – tūris),

koordinatinių sistemoje apribotas kreivės 1a2b1, vaizduoja mechaninį darbą, sukurtą verčiant šilumos energiją mechanine energija. Augalo lape sukurta mechaninė energija sunaudojama priverstinei lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmių ventilacijai. Tuo termodinamiškai įrodyta, kad saulėtu paros metu lape galimas energijų virsmas. Augalo lape egzistuoja variklis, šilumą paverčiantis mechanine energija, kurią augalas panaudoja biologiniams procesams intensyvinti.



5.29 pav. Energijos virsmų augalo lapo žiotelėje termodinaminis ciklas: q_1 , q_2 – atitinkamai teikiama ir nuvedama šiluma kintant augalo lapo temperatūrai

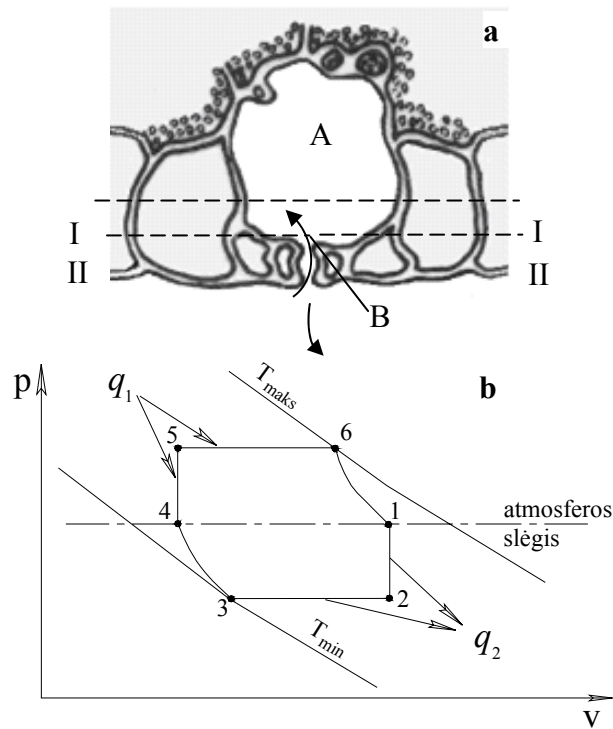
Kai kalbama apie šilumos energijos pavertimą mechanine energija, paprastai suprantame, kad tam reikalingas mechaninis variklis. Tačiau yra variklių, kuriuose mechaninę energiją sukuria dujų srautas. Slėgio potencinė energija (augalo lapo žiotelėse ir požiotelinių tarpuląsčių ertmėse) verčiama srauto kinetine, o ši – mechaniniu darbu, neverčiant jos veleno sukimo energija. Toks potencinės energijos virsmas kinetine energija technikoje vyksta specialiuose kanaluose. Augalijoje tokių kanalų vaidmenį atlieka lapo žiotelės. Augalo lapo žiotelės savo forma primena sudėtinių kanalų (Lavalio kanalų), naudojamų šiluminiuose varikliuose, formą. Varikliuose energijų virsmo kanalų forma nekinta. Augalo lapas gali keisti ne tik žiotelės formą, bet ir srauto pralaidumą. Be to, energetinių įrenginių energijų virsmo kanaluose srautas juda viena kryptimi. Augalo lapo žiotelėse srautas juda abiem kryptimis. Taigi žiotelės yra daug tobulesnės nei analogiškos paskirties kanalai (potencinei slėgio energijai paversti kinetine srauto energija), sukurti geriausiems šiuolaikinės energetikos įrenginiams.

Suprantama, kad augalo lape mechanine energija paverčiami labai maži šilumos energijos kiekiai. Ši energija gali sukurti mažas mechanines jėgas (slėgio jėgas) požiotelinių tarpuląsčių ertmėse ir augalo lapo žiotelėje. Sukurta mechaninė jėga požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, augalo lapo žiotelėje dujų srauto pavidalu verčiama judančio srauto kinetine energija. Dujų srautas, išleistas pro lapo žiotelę, ardo lapo paviršiuje esantį lapo apykaitos su aplinka sluoksnį ir taip suaktyvina dujinę augalo lapo apykaitą. Šis priverstinis dujų judėjimas, veikiamas mechaninės jėgos, sukurtos augalo lape, suaktyvina CO₂ ir visų metabolitų judėjimą augalo lapo apykaitos su aplinka sluoksniuose.

Energijų virsmai augalo lapo žiotelėje ir požiotelinių tarpuląsčių ertmėse galimi tiksliai esant augalo lapo temperatūros svyravimams. Augalo lape šilumos virsmo mechanine energija termodinaminiam ciklui sudaryti ir apibūdinti atskirus jo termodinامينius procesus yra problemiška. Todėl juos tenka schematizuoti, kaip tai daroma termodinamikoje. Įvertinus augalo lapo žiotelių kanalų, kuriais vyksta priverstinis požiotelinių tarpuląsčių ertmės turinio ir aplinkos oro abipusis tekėjimas, anatominės formos įvairumą, energijų virsmą žiotelėje galime palyginti su raketos (reaktyvinio) variklio darbo principu. Augalo lapo žiotelių ir raketos variklio konstrukcijos požiūriu ir veikimo principu analogiški.

Lapo žiotelių variklio termodinaminei analizei 5.30a pav. pateikiame žiotelės ir požiotelinių tarpuląsčių ertmės schemą, su kurios pagalba nagrinėsime termodinامينius procesus ir šilumos energijos virsmo mechanine energija ciklą.

Termodinamiškai nagrinėjant variklių ciklus yra laikoma, kad cikle dalyvauja vienodas, šiuo atveju absoliučiai sauso oro kiekis požiotelinių tarpuląsčių ertmėse. Todėl analizei panaudosime tariamą membraną, atskiriančią požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūrį A nuo oro B, patenkančio iš aplinkos (5.30a pav.). Pastovios augalo lapo energijų apykaitos atveju, esant maksimaliai augalo lapo temperatūrai, A ertmėje (5.30a pav.) bus maksimalus oro kiekis, o žiotelės ertmės B dalyje – minimalus (ertmė B = 0). Slėgis augalo lapo žiotelėje lygus aplinkos oro slėgiui. Tariamoji membrana bus padėtyje II–II. Oro, esančio žiotelės A ertmėje, termodinaminę būklę pv (slėgis – tūris) koordinatių sistemoje vaizduoja 1 taškas (5.30 b pav.). 1 taške A ertmės tūris maksimalus, slėgis p lygus atmosferos slėgiui.



5.30 pav. Augalo lapo žiotelinio variklio schema a ir termodinaminis ciklas b $p-v$ (slėgis p , tūris v) koordinatinių sistemoje: A – požiotelinių tarpuląsčių ertmė; B – augalo lapo aplinka; I–I, II–II – kraštinės tariamos membranos padėtytys; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – būdingi termodinaminių būsenų taškai, apibūdinantys augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmių parametrus (paaiškinimas tekste)

Mažėjant augalo lapo temperatūrai, A ertmėje krenta slėgis, susidaro vakuumas. Aplinkos slėgis padidėja. Susidarius minimaliam slėgių skirtumui $p_1 - p_2$ aplinkos oras pro žiotelę patenka į požiotelinių tarpuląsčių B ertmės dalį. Aplinkos orui patenkant į B ertmę, vakuumas A ertmėje nepasiekia maksimalios reikšmės, bet palaikomas tam tikrame $p_2 = const$ lygyje, kuris didele dalimi priklauso nuo žiotelės atvirumo ir žiotelių kanalo formos. Todėl mažėjant temperatūrai A ertmėje (vykstant aušinimo procesui), slėgių skirtumas tarp A ertmės ir aplinkos išlieka pastovus $p_1 - p_2 = const$, nepaisant to, kad A ertmės tūris mažėja. A ertmėje pasiekus minimalią temperatūrą (3 taškas), didesnio aplinkos slėgio dėka A ertmėje toliau vyksta požiotelinių tarpuląsčių suslėgimo proce-

sas. Tai adiabatinis procesas, vykstantis tol, kol susilygina slėgiai iki aplinkos slėgio (4 taškas).

Adiabatinio (be šilumos mainų su aplinka 3–4 procese) spaudimo pabaigoje 4 taške požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūris pasiekia minimalią reikšmę. Tariamoji membrana pasiekia kraštinę minimalaus tūrio padėtį I–I.

Didėjant augalo lapo temperatūrai (tiekiant šilumą iš aplinkos), slėgis požiotelinių tarpuląsčių A ertmėje didėja, pasiekia 5 tašką. Todėl didėjant temperatūrai A ertmėje (vykstant šildymo procesui), slėgių skirtumas tarp A ertmės ir aplinkos išlieka pastovus $p_5 - p_4 = const$, nors A ertmės tūris mažėja. Pasiekus maksimalią temperatūrą (6 taškas), toliau didesnio slėgio dėka požiotelinių tarpuląsčių A ertmėje vyksta adiabatinis slėgio mažėjimas, kol susilygina slėgiai, t. y. iki aplinkos slėgio (1 taškas).

Adiabatinio (be šilumos mainų su aplinka 6–1 procese) plėtimosi pabaigoje 1 taške požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūris pasiekia maksimalią reikšmę. Tariamoji membrana pasiekia kraštinę, maksimalaus tūrio padėtį II–II.

Ciklas įvykdytas, grįžome į pradinę padėtį. Nauja augalo lapo temperatūros kitimo banga pakartos aptartą ciklą požiotelinių tarpuląsčių ertmėje.

Saulėtu paros metu požiotelinių tarpuląsčių ertmėse vykstantys procesai schematizuoti. Tai palengvina nagrinėjimą siekiant įrodyti, kad augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėje egzistuoja šiluminio variklio ciklas, gaminantis mechaninę energiją. Realūs procesai, vykstantys šio ciklo metu, nukrypsta nuo aptartų teorinių procesų, tačiau faktas, kad toks variklis augalo lape egzistuoja ir augalas jį panaudoja biologiniams procesams intensyvinti, įrodytas.

Pasinaudoję termodinamikos dėsniais teigiame, kad mechaninį darbą, kurį sukuria augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmės aparatas, pV (slėgis – tūris) koordinačių sistemoje rodo ciklo plotas 1–2–3–4–5–6–1 (5.30 pav.).

Remdamiesi termodinaminiu požiotelinių tarpuląsčių ertmės aparato ciklu galime aptarti ir jo terminį naudingumo koeficientą. Visi šiluminiai varikliai turi palyginti mažą terminį naudingumo koeficientą. Realių žiotelinio aparato ciklo procesų nustatyti negalime, todėl tenka aptarti galimą maksimalų terminį naudingumo koeficientą, panaudojus S. Karno ciklą. Augalo lapo temperatūrai kintant 1 °C, terminis požiotelinių

tarpuląsčių ertmės aparato naudingumo koeficientas visuomet bus mažesnis už 0,0034. Didėjant temperatūrų skirtumui, šis koeficientas didėja. Kintant augalo lapo temperatūrai 3 °C, jis (pagal S. Karno ciklą) siekia 0,01. Terminis požiotelinių tarpuląsčių ertmės aparato naudingumo koeficientas yra 30–50 kartų mažesnis už žinomų šiluminių variklių naudingumo koeficientą. Priežastis – augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmės aparatas dirba esant labai mažam temperatūrų skirtumui. Esant 1 °C temperatūrų skirtumui inžinerinio šiluminio variklio sukurti negalima. Matome, kad gamtoje tokie varikliai, kurie paverčia bet kokio temperatūrų skirtumo šilumą mechanine energija, egzistuoja tikrai augalo lape. Tai patys mažiausi varikliai pasaulyje, nes 1 mm² jų yra tiek (iki 400 vienetų), kiek yra žiotelių.

Apibendrinimas

Gyvybė Žemėje tiesiogiai priklauso nuo augalijoje vykstančio asimiliacijos proceso. Antrapogeniniai procesai gamtoje, sukelti besaikio žemės turtų naudojimo, yra disbalanso, atsiradusio tarp technologinių ir biologinių procesų, pasekmė. Pirminis energijos šaltinis augalijai yra Saulė, kuri teikia Žemei vieną iš geriausių formos energijų – spindulių pavidalo energiją. Termodinaminiu požiūriu augalas yra prastas Saulės spindulių energijos transformatorius į organinius junginius. Kitu požiūriu žaliasis Žemės apdaras yra unikali ir pigi laboratorija. Augalas sugeba panaudoti nekoncentruotą Saulės spindulių energiją (tai technologijos moksluose kol kas nepriimtina) ir sukurti didžiausią Žemės turtą – organinę medžiagą, sunaudoti didžiąją dalį šiuolaikinio technologinio Žmogaus į aplinką išmetamų teršalų, tiekti deguonį ir taip sukurti sąlygas gyvybei Žemėje.

Nustatyta, kad augalas su aplinka sudaro vientisą nedalomą sistemą. Aplinkoje gyvybiniai procesai tiesiogiai susieti su augalų energine apykaita. Aplinkos poveikio augalui numatymo ir vertinimo pagrindiniai veiksniai yra šviesa (saulės energija), temperatūra (šiluma) ir drėgmė (vanduo). Nustatyta, kad šiuos tris aplinkos veiksnius, lemiančius augalo produktyvumo, minimalios egzistencijos ir žūties sąlygas, galima nagrinėti kaip augalų energinės apykaitos procesus taikant termodinamikos dėsnius ir augalo energijų balanso metodą.

Išnagrinėjus augalų energinės apykaitos su aplinka procesus nustatyta, kad natūralioje aplinkoje augalai gali patirti be galo daug energinės apykaitos atvejų. Augalų energinės apykaitos su aplinka požiūriu, augalas teoriškai gali patirti 11 būdingų energinės apykaitos atvejų. Natūralioje aplinkoje jis realiai patiria 7 būdingus energinės apykaitos su aplinka atvejus. Visus galimus augalo energinės apykaitos procesus su aplinka atskleidžia šių procesų termodinaminė analizė $h-x$ diagramoje. Ji apibūdina augalo energinės apykaitos procesus įvairiomis vegetacijos periodo sąlygomis. Ypač sudėtingi augalo energinės apykaitos procesai su

aplinka vyksta dieną, natūralios aplinkos sąlygomis, nuolat kintančių veiksmų aplinkoje.

Pasirodo, kad augale vykstantys biologiniai procesai ir jo energijų ir masės apykaitos procesai sudaro vientisą augalo apykaitos su aplinka procesų grandinę. Augalo lape vykstančių biologinių, energijų ir masės (esant dujinei būsenai) apykaitos su aplinka procesų dalyvavimas biomasės kūrimo procese yra lygiavertis ir nė vienas iš jų negali būti užmirštas. Augalo energijų ir masės (dujinės mitybos ir metabolitų) apykaitos procesai fiziniame augalo aplinkoje vyksta pagal tam tikrus dėsnius ribotame augalo sąlyčio su aplinka sluoksnyje – augalo apykaitos su aplinka sluoksnyje. Be fizinių procesų šiame sluoksnyje biologiniai procesai augalo lape negalimi. Augalo energijų ir masės apykaitos su aplinka procesai, vykstantys augalo paviršiaus apykaitos su aplinka sluoksnyje, gali skatinti arba slopinti augale vykstančius biologinius procesus.

Nustatyta, kad saulėtu paros metu augalų lapuose ir aplinkoje vyksta energinės apykaitos svyravimai. Jie sukelia augalo lapo energijų balanso svyravimus, dėl to atsiranda temperatūros svyravimai augalo lape ir jo apykaitos su aplinka sluoksnyje. Temperatūros svyravimai augalo lape sukelia transpiracijos skaičiaus S_k ir energijos srautų tarp transpiracijos ir konvekcinių šilumos mainų kitimą.

Lokali augalo lapo temperatūra priklauso nuo lapo energijų balanso. Temperatūros kitimo dinamiką augalo lape nusako tam tikro momento energijų balansas, kuris saulėtu paros metu yra nuolatinėje dinaminėje pusiausvyroje. Augalo lapo temperatūros kitimas, kaip dinaminio energijų balanso išraiška, pasireiškia per augalo lapo termoakumuliacijos procesą, kuris sukelia konvekcinių šilumos mainų su aplinka pokyčius.

Augalo lapų anatominė sandara sukelia lapo plokštelės storio kaitą. Kaip rodo tyrimų duomenys, saulėtu paros metu, priklausomai nuo augalo lapo plokštelės storio kitimo, gauname analogišką augalo lapo audinių temperatūrinę mozaiką. Saulės energijos svyravimai augalo lapo plokštelės audiniuose sukelia lokalią temperatūros kitimą, tai augalo lapo plokštelėje sukuria šilumos srautus, veikiančius temperatūros gradientą. Šilumos srauto kryptis augalo lapo audiniuose yra nukreipta temperatūros išsilyginimo kryptimi.

Kintant augalo lapo temperatūrai, jo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse analogiškai vyksta dinamiški temperatūros kitimo procesai. Procesų, vykstančių lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, nagrinėjimas atskleidė, kad saulėtu paros metu svyruojant lapo temperatūrai, augalo lape

sukurama mechaninė energija, kuri atlieka lapo požiotelinių tarpuląsčių priverstinę ventiliaciją. Žioteliniame lapo aparate šilumos energija transformuojama į mechaninę. Energijų transformaciją augalo lape sukelia temperatūros ir slėgio kitimai (teoriškai $347 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$) augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse. Vyksta drėgmės garavimo ir jos kondensacijos procesų kaita. Duomenys rodo, kad požiotelinių tarpuląsčių ertmės tūris didėja greičiau nei jų paviršiaus plotas. Taigi augalo lape didėjant požiotelinei ertmei, didėja susidariusio kondensato sluoksnio storis požiotelinių tarpuląsčių ertmės paviršiuose. Vandens garo kondensacijos ir garavimo proceso kaitos nustatymas požiotelinių tarpuląsčių ertmėse skatina keisti požiūrį į fiziologinius procesus, vykstančius augalo lapo žiotelėje ir požiotelinių tarpuląsčių ertmėse.

Procesų, vykstančių augalo lapo požiotelinių tarpuląsčių ertmėse, termodinaminė analizė leido pateikti augalo lapo žiotelinio variklio, transformuojančio šilumos energiją į mechaninę, veikimo principą ir termodinaminį ciklą. Tai mažiausio pasaulyje variklio (iki 400 vnt./mm^2), gaminančio mechaninę energiją, ciklas.

Augalų energinės apykaitos teorinių pagrindų sukūrimas sudaro prielaidas pagrįsti ir panaudoti augalų energinės apykaitos dėsningumus praktiniams tikslams. Augalo energijų balansas leidžia išryškinti pagrindinius veiksnius, turinčius įtakos nagrinėjamo proceso vyksmui, nurodo būdus ir galimybes augalo apykaitą su aplinka pakreipti norima linkme, pvz., reguliuoti augalo audinių temperatūrą, energinės apykaitos procesų intensyvumą, siekti maksimalaus terminio efekto piktžolių terminio naikinimo technologijoje ir kt. Todėl išnagrinėjus augalo energinę apykaitą, išryškėja kai kurių augale vykstančių fiziologinių procesų kryptingo energinio valdymo galimybės.

Augalų energijų ir masės apykaitos procesų, vykstančių augalo lape ir augalo apykaitos su aplinka sluoksnyje, nagrinėjimas leido mums gauti naujos mokslinės informacijos apie procesus, vykstančius tarp augalo ir jį supančios aplinkos. Šioje monografijoje stengėmės tai pateikti. Kaip tai mums pavyko, galite spręsti Jūs, gerbiamieji Skaitytojai.

Literatūra

Monografijoje apibendrinti autorių darbai

1. **СИРВИДАС, А.** Об измерении температуры листьев растений. *LŽŪA mokslo darbai*. 1959, T.6, p. 48–63.
2. **СИРВИДАС, А.** О температурных колебаниях листьев растений. *LŽŪA mokslo darbai*. 1959, T.6, p. 64–71.
3. **СИРВИДАС, А.** Зависимость температуры некоторых органов растений от их геометрической формы. *LŽŪA mokslo darbai*. 1960, T.7, p. 175–185.
4. **СИРВИДАС, А.** О температуре некоторых органов растений в естественных условиях. *LŽŪA mokslo darbai*. 1960, T.7, p. 185–206.
5. **СИРВИДАС, А. П.** К вопросу о температуре и теплообмене растений. Диссертация кандидата биологических наук. Вильнюсский Гос. университет, 1961. 202 с.
6. **SIRVYDAS, A.** Augalų lapų temperatūros matavimo klausimu. *LŽŪA mokslo darbai*. 1963, T.10, Sąs.3, p. 109–117.
7. **SIRVYDAS, A.** Mikroklimato stebėjimai polietilene plėvele dengtuose šiltnamiuose. Vienuoliktosios LŽŪA dėstytojų mokslinės konferencijos su trumpintų pranešimų rinkinys. Vilnius, 1965, p. 74–75.
8. **СИРВИДАС, А.; ПЕТКЕВИЧЕНЕ, Л.; БРИЗАГАЛОВ, Б. А.** Изменение микроклимата в тоннелях, покрытых полиэтиленовой пленкой. *Записки Ленинградского СХИ*. 1965, т.100, с.126–132.
9. **ПЕТКЕВИČIENĖ, L.; SIRVYDAS, A.** Polietilėninės plėvelės priedangų įtaka mikroklimatui ir daržovių derliui. *Polimerinių medžiagų tyrimai ir panaudojimas. VI respublikinės mokslinės konferencijos medžiaga*. Vilnius, 1965, p. 36–43.
10. **СИРВИДАС, А.; ПЕТКЕВИЧЕНЕ, Л.** Влияние пленочных укрытий на микроклимат и урожай овощных культур. *LŽŪA mokslo darbai*. 1966, T.13, p. 85–92.

11. PETKEVIČIENĖ, L.; **SIRVYDAS, A.** Polietileninės plėvelės priedangų įtaka temperatūriniam režimui ir daržovių derliui. *Keturioliktosios dėstytojų mokslinės konferencijos medžiaga*. LŽŪA. Kaunas, 1968, p.188.
12. PETKEVIČIENĖ, L.; **SIRVYDAS, A.** Temperatūros režimas polietilene plėvele dengtuose šiltnamiuose šalnos metu. *Sodai ir daržai tyrėjų akimis*. Vilnius, 1972, p. 58–62.
13. **SIRVYDAS, A.** Augalų šilumos mainų ir transpiracijos procesų energinės teorijos klausimu. *Aštuonioliktosios dėstytojų mokslinės konferencijos medžiaga*. LŽŪA. Kaunas, 1972.
14. **СИРВИДАС, А.**; ЮШКА, В. Измерение температуры растений в микроклиматических и физиологических исследованиях. *Лит. НИИ лесного хоз-ва*. Каунас, 1973. 34 с.
15. **СИРВИДАС, А.** Энергетический обмен растений в защищенном грунте. В сб. „Дополнительное освещение растений в защищенном грунте“. Рига. 1974, с.87-97.
16. **СИРВИДАС, А.** Графическое изображение и анализ процесса энергетического обмена растений *LŽŪA mokslo darbai*. 1974, T.20, Nr.3, p. 147–159.
17. **СИРВИДАС, А.**; ЮШКА, В. Регулирование искусственного тумана. *Lietuvos miškų ūkio MTI darbai*. 1985, T.25, p. 180–186.
18. **SIRVYDAS, P. A.** Termoenerginiai procesai augaluose ir jų aplinkoje. Habilitacinis darbas. LŽUA. Kaunas-Akademija, 1993. 296 p
19. **SIRVYDAS, A.**; STEPANAS, A. Dirvos aušinimo fazės tyrimai. *Žemės ūkio inžinerija*, 1997, T.29(2), p.33–42.
20. **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P.; ČĖSNA, J. Physical Changes in the Weed Plant in Thermal, Weed Control. *3 rd EWRS Workshop on Physical Weed Control Wye College*. University of London, UK. 23-25 March, 1998. 17 S.
21. **SIRVYDAS, A.**; ČĖSNA, J. Energetinių procesų piktžolių audiniuose modeliavimas jas termiškai naikinant. *Žemės ūkio inžinerija*. 2000, T. 32 (1), p. 53–72.
22. **SIRVYDAS, A.**; ČĖSNA, J.; **KERPAUSKAS, P.**; VASINAUSKIENĖ, R. Piktžolių terminio naikinimo aukštatemperatūroje aplinkoje tyrimai. *Aplinkos inžinerija*. 2000, T.8(1), p. 28–37.
23. **SIRVYDAS, A.**; ČĖSNA, J.; **KERPAUSKAS, P.**; STEPANAS, A. Šiluminė energijos procesų, vykstančių terminiam peilyje ir jo aplinkoje, naikinant piktžolės tyrimas. *Aplinkos inžinerija*. 2000, T.8(1), p. 3–7.

24. **KERPAUSKAS, P.** Šilumos mainų ypatumai augalo (piktžolės) pasienio sluoksnyje naikinant vandens garu. Šilumos energetika ir technologijos. KTU. 2001. p.401–406
25. LAZAUSKAS, P.; **SIRVYDAS, A.** Weed control with water steam in barley. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. Stuttgart, Hohenheim, Bd.XVIII, 2002, s. 633–638.
26. **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P., VASINAUSKIENĖ, R.; **KERPAUSKAS, P.** Innovative weed control in organic agriculture. (Informacinis biuletenis) LŽŪU, 2002. p. 1–2.
27. **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; **KERPAUSKAS, P.** Thermal weed control by water steam. 5th. European Weed Research Society. Workshop on Physical Weed control Pisa, Italy, 11-13 March 2002. p. 253–262.
28. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; STEPANAS, A. Aplinkos piktžolių terminiam naikinimui formavimo teoriniai pagrindai. *Vagos: mokslo darbai*. LŽŪU, 2002, Nr. 54(7), p. 86–95.
29. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; VASINAUSKIENĖ, R.; ČEKANAUSKAS, S. Lokaluotas aukštatemperatūrinės aplinkos formavimas ir energetinis balansas termiškai naikinant piktžoles. *Konkurencingų žemės ūkio produktų gamybos problemas integruojantis Lietuvai į Europos sąjungą*. LŽŪU, 2002, p. 65–66.
30. **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; **KERPAUSKAS, P.** Thermal weed control by water steam. *Plant protection in the Baltic region in the context of integration to EU. Proceeding of the Scientific international conference*. Kaunas, Akademija, 2002, p.111–113.
31. **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; **KERPAUSKAS, P.** 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.
32. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; VASINAUSKIENĖ, R.; JANULEVIČIUS, A. Terminio piktžolių naikinimo įrenginių naudojančių drėgnąjį vandens garą energetinis įvertinimas. *Vagos: mokslo darbai*. LŽŪU, 2003, Nr. 60(13), p.59–65.
33. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; VASINAUSKIENĖ, R. Piktžolių terminio naikinimo proceso drėgnuoju vandens garu tyrimas. Šilumos energetika ir technologijos. KTU, 2003, p. 341–346.
34. GYLYS, J.; JAKUBCIONIS, M.; SINKUNAS, S.; **SIRVYDAS, A.** Heat transfer of tube bank in upward foam flow. Hefat 2nd International Confe-

- rence on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics 24-26 June 2003, Victoria Falls, Zambia Paper number: GJ1. 2003.
35. **KERPAUSKAS, P.** Lokalizuotos aplinkos terminiam piktžolių naikinimui formavimas ir tyrimas. Dakaro disertacija. Mokslinis vadovas doc. dr. A. Stepanas. LŽŪU, Akademija, 2003. 119 p.
 36. **SIRVYDAS, A.; STEPANAS, A.;; KERPAUSKAS, P.** Thermal disinfection of soil by water steam. 6th EWRS on Physical and Cultural Weed Control. Lillehammer, Norway. 2004, p.174–178.
 37. **SIRVYDAS, A.; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; KERPAUSKAS, P.** Weed control in onions by steam. *Zeitschrift für Pflanzkrankheit und Pflanzenschutz*. 2004 Sonderheft XIX, p. 581–587
 38. **SIRVYDAS, A.; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; STEPANAS, A.; KERPAUSKAS, P.** Thermal weed control by water steam in bulb onions. *European Weed Research Society. Proceedings of 6th EWRS on Physical and Cultural Weed Control*. Lillehammer, Norway. 2004, p.170-173
 39. **СИРВИДАС, А.; ЛАЗАУСКАС, П.; КУСТА, А.; КЕРПАУСКАС, П.** Влажный водяной пар как средство борьбы с сорной растительностью. *Проблемы сорной растительности и методы борьбы с ней*. БГСХА, Горки, 2004, с. 88-90.
 40. **SIRVYDAS, A.; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; ČEKANAUSKAS, S.;; KERPAUSKAS, P.** Thermal weed control by water steam in bulb onions. *European Weed Research Society. Abstract 6 th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control* Lillehammer, Norway, 8-10 March 2004. p. 48.
 41. **KERPAUSKAS, P.; SIRVYDAS, A.; STEPANAS, A.; VASINAUSKIENĖ, R.; ČEKANAUSKAS, S.** Procesų, vykstančių piktžolių terminio naikinimo įrenginyje, termodinaminė analizė. *Žemės ūkio inžinerija: mokslo darbai*. 2005, Nr. 37 (1), p. 49-59.
 42. **KERPAUSKAS, P.; SIRVYDAS, A.** Transpiracijos proceso termoenerginiai aspektai. *Vandens ūkio inžinerija*. 2005 Nr. (48)1, p. 38-46.
 43. **SIRVYDAS, A.; VASINAUSKIENĖ, R.; ČEKANAUSKAS, S.; VIRBICKAITĖ, R.** Drėgnojo vandens garo poveikio augalui tyrimai. *Šilumos energetika ir technologijos*. Konferencijos pranešimų medžiaga. KTU. Kaunas, 2005, p. 93-96.
 44. **SIRVYDAS, A.; KERPAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.; NADZEIKIENĖ, J.; ČEKANAUSKAS, S.** Analysis of the thermal weed extermination processes: devices and their theoretical validation. *Proceedings of the international conference Development of agricultural technolo-*

- gies and technical means in ecological and energetic aspects.* Raudondvaris, 2006, No.11, p. 332-344.
45. NADZEIKIENĖ, J.; MILAŠIUS, R.; DEIKUS, J.; EIČINAS, J.; **KERPAUSKAS, P.** Evaluating thermal insulation properties of garment packet air interlayer. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2006, Vol.14, No 1(55). p. 52-55.
 46. **SIRVYDAS, A.**; NADZEIKIENĖ, J.; MILAŠIUS, R.; EIČINAS, J.; **KERPAUSKAS, P.** The role of the textile layer in the garment package in suppressing transient heat exchange processes. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2006, Vol.14, No 2(56). p. 55-58.
 47. **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P.; STEPANAS, A.; NADZEIKIENĖ, J.; **KERPAUSKAS, P.** Plant temperature variation in the thermal weed control process. *Zeitschrift für Pflanzkrankheit und Pflanzenschutz*. Sonderheft XX, 2006, p. 355-361.
 48. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; NADZEIKIENĖ, J.; STEPANAS, A.; TEREŠČIUK, V.S. Temperature measurements in research of thermal weed extermination. *Proceedings of the international conference Development of agricultural technologies and technical means in ecological and energetic aspects*. Lithuania. Raudondvaris. 2006, No.11, p. 321-331.
 49. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.** Energinių procesų agrofito aplinkoje aspektai. *Energetika: Lietuvos MA leidykla*. 2006, Nr.4, p. 9-15.
 50. VIRBICKAITĖ, R.; **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; VASINAUSKIENĖ, R. The comparison of thermal and mechanical ways of weed control. *Agronomy research*. 2006, 4(Special issue), p.451-455.
 51. **KERPAUSKAS, P.**; **SIRVYDAS, A.**; LAZAUSKAS, P.; VASINAUSKIENE, R.; TAMOSIUNAS, A. Possibilities of Weed control by water steam. *Agronomy research: 4 (Special issue)*, 2006, p. 221-255.
 52. ŠINKUNAS, S.; GYLYS, J.; **SIRVYDAS, A.** Study of thermohydro-mechanical processes in gravitational liquid film flow. *Proceedings of international conference on energy and environment 2006*. University Tenaga nasional, Kajang, Selangor, Malaysia. p. 68-72.
 53. **KERPAUSKAS, P.**; **SIRVYDAS, A.** Agrofito aplinkoje vykstančių energinių procesų termodinaminė analizė. *Žemės ūkio mokslai*. 2006 Nr. 1. p. 39-46.
 54. **KERPAUSKAS, P.**; **SIRVYDAS, A.** Transpiracijos proceso saulėtu paros metu termoenerginė analizė. *Vandens ūkio inžinerija*. 2006 Nr. (49)29, p. 75-82.
 55. **KERPAUSKAS, P.**; VASINAUSKIENĖ, R.; **SIRVYDAS, A.**; ČEKANAUSKAS, S. Piktžolių terminis naikinimas morkų pasėlyje drėgnuoju

- vandens garu. *Sodininkystė ir daržininkystė*: LSDI ir LŽŪU mokslo darbai. 2007, Nr. 26(1), p.127-135.
56. **KERPAUSKAS, P.** Šiluminiai procesai piktžolių terminio naikinimo technologijose. Habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga. KTU, Kaunas, 2007. 24 p.
 57. **KERPAUSKAS, P.**; STANIULIENĖ, R.; ČINGIENĖ, R. Piktžolių terminės kontrolės karštomis dujomis ir drėgnuoju vandens garu metodų efektyvumo palyginimas. *Žmogaus ir gamtos sauga* 2008. LŽŪU, P. 76-79.
 58. ČINGIENĖ, R.; **SIRVYDAS, A.**; VASINAUSKIENĖ, R. Statiškai stabilių putų taikymas ekologinėje žemdirbystėje. *Žmogaus ir gamtos sauga* 2008. LŽŪU, P. 67-68.
 59. **SIRVYDAS, A.**; VASINAUSKIENĖ, R.; **KERPAUSKAS, P.**; ČINGIENĖ, R.; SINKEVIČIENĖ, J.; STANIULIENĖ, R. Skrotelinių piktžolių terminės kontrolės ypatumai. *Vagos*: LŽŪU mokslo darbai. 2008. Nr. 79(32). p. 153-157.
 60. DABKEVIČIUS, Z.; SINKEVIČIENĖ, J.; SEMAŠKIENĖ, R.; **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.** The effect of thermal treatment on spring barley seed infection and germination. *Žemdirbystė-Agriculture*. 2008; T.95, Nr.4. p.172-181.
 61. **KERPAUSKAS, P.**; SINKEVIČIENĖ, J.; **SIRVYDAS, A.**; VASINAUSKIENĖ, R. Terminio impulso įtaka vasarinių miežių sėklos daigumui ir užterštumui mikromicetais. *Žemės ūkio inžinerija*. 2008, 40(2), 52–65.
 62. BALTUŠNIKAITĖ, J.; **KERPAUSKAS, P.**; MILAŠIUS, R., **SIRVYDAS, A.**; STANYS, S. Comparison of the burning process of multilayer fabric packets with the heat conduction process. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2008, Vol. 16, No. 1(66). p. 68-71.
 63. **KERPAUSKAS, P.**; SINKEVIČIENĖ, J.; **SIRVYDAS, A.** Vandens garo terminis poveikis grūdo mikrobiotai. *Šilumos energetika ir technologijos*. Kaunas, KTU. LEI, 2008, p. 179-182.
 64. **SIRVYDAS, A.**; VASINAUSKIENĖ, R.; ČINGIENĖ, R.; **KERPAUSKAS, P.** Terminio ir mechaninio piktžolių naikinimo būdų palyginimas. *Šilumos energetika ir technologijos*. Kaunas, KTU. LEI, 2008, p. 259-262.
 65. DABKEVIČIUS, Z.; **SIRVYDAS, A.**; SINKEVIČIENĖ, J.; ŠALUCHAITĖ, A.; VASILIAUSKAITĖ, I. Fizinių veiksnių ir cheminių priemonių svarba išvengiant vasarinių miežių ligų. *Žemės ūkio mokslai*. 2008. T. 15 Nr. 4. p. 28-34.
 66. **SIRVYDAS, A.**; **KERPAUSKAS, P.**; STEPANAS, A.; ČEKANAUSKAS, S. Mobilus piktžolių terminio naikinimo įrenginys TPK ind.: A01M 21/00. LT 5532 B. 2008-12-29. *Valstybinio patentų biuro oficialus biuletenis*. 2008, Nr.12.

67. **SIRVYDAS, A.; ČEKANAUSKAS, S.; RUTKAUSKAS, G.; NADZEIKIENĖ, J.; KUČINSKAS, V.** Piktžolių terminio naikinimo karštomis dujomis proceso poveikis dirvai. *Žemės ūkio inžinerija*. 2008, 40(1), 30-41.
68. **SIRVYDAS, A.; ČEKANAUSKAS, S.; KERPAUSKAS, P.; NADZEIKIENĖ, J.; STEPANAS, A.; ČINGIENĖ, R.** Vandens garo kondensacijos dirvos paviršiuje tyrimai. *Žemės ūkio inžinerija*. 2009 Nr. 41(1-2). p. 7-18.
69. **KERPAUSKAS, P.; SIRVYDAS, A.; VASINAUSKIENE, R.; TAMOSIUNAS, A.** Influence of thermal effect duration on onion yield. *Agronomy Research*. 2009, Vol. 7, p. 323-327.
70. **NADZEIKIENĖ, J.; SIRVYDAS, P. A.; ČINGIENĖ, R.; VASINAUSKIENĖ, R.; KERPAUSKAS, P.** Plant protection by foam in the thermal control process. *Agronomy Research*. 2009, Vol. 7, p. 425-429.
71. **KERPAUSKAS, P.; SIRVYDAS, A.; VASINAUSKIENĖ, R.; NADZEIKIENĖ, J.** Technological Aspects of Thermal Weed Control. *Proceedings of the fourth international scientific conference Rural development*. Lithuania. Akademija. 2009 Vol. 4, b. 2 p. 344-350
72. **KERPAUSKAS, P.; KUČINSKAS, V.; SIRVYDAS, A.** Augalų energinės apykaitos procesų diagrama ir jos analizė *Šilumos energetika ir technologijos*. Kaunas, KTU. LEI, 2009, p. 193-198
73. **SIRVYDAS, A.; KERPAUSKAS, P.; ČINGIENĖ, R.; SABIENĖ, N.; VASINAUSKIENĖ, R.; VIRBICKAITĖ, R.** Terminis piktžolių naikinimo būdas ir įrenginys. TPK ind.: A01M 21/00, A01M 21/04, B 05 B 3/00. LT 5620 B. 2009-12-28. *Valstybinio patentų biuro oficialus biuletenis*. 2009, Nr.12
74. **KERPAUSKAS, P.; KUČINSKAS, V.** Augalo lapo energinės apykaitos kitimas dėl aplinkos temperatūros. *Žemės ūkio mokslai*. 2010. T. 17. Nr. 1-2. P. 41-46.
75. **KERPAUSKAS, P.; ČEKANAUSKAS, S.; ŪKSAS, T.** *Šilumos energetika ir technologijos*. Kaunas, KTU. LEI, 2010, p. 249-254.
76. **KERPAUSKAS, P.; STANIULIENĖ, R.; VASINAUSKIENĖ, R.; ŪKSAS, T.** Sunkiai termiškai sunaikinamų (skrotelinių) piktžolių terminė kontrolė. *Žmogaus ir gamtos sauga*. 2010. D.1, P. 93-95.
77. **ČINGIENĖ, R.; KERPAUSKAS, P.; ŪKSAS, T.** Putų taikymas žemės ūkio augalų apsaugai. *Žmogaus ir gamtos sauga*. 2010. D.1, P. 76-78.
78. **NADZEIKIENĖ, J.; KERPAUSKAS, P.** Influence of thermal weed control on topsoil temperature variation. *Современные технологии сельскохозяйственного производства: XIII международная научно-практическая конференция: материалы конференции*. Т. 1. Гродно, 2010. p. 241-243.
79. **KERPAUSKAS, P.; VASINAUSKIENĖ, R.** Influence of weed biological factors in thermal weed control process. *Современные технологии сельскохозяйственного производства: XIII международная научно-*

- практическая конференция: материалы конференции. Т. 1. Гродно, 2010. p. 239-241.
80. **KERPAUSKAS, P.; SIRVYDAS, A.; ČEKANAUSKAS, S.; ŪKSAS, T.** Temperatūros matavimas augalo stiebe termiškai naikinant piktžoles. *Žemės ūkio inžinerija*. 2010. Nr. 42(1). p. 37-47.
 81. ČIUKAS, R.; ABRAMAVIČIŪTĖ, J.; **KERPAUSKAS, P.** Investigation of the Thermal Properties of Socks Knitted from Yarns with Peculiar Properties. Part I. Thermal Conductivity Coefficient of Socks Knitted from Natural and Synthetic Textured Yarns. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2010, Vol. 18, No. 3(80), p. 89-93.
 82. **SIRVYDAS, A.; KUČINSKAS, V.; KERPAUSKAS, P.; NADZEIKIENĖ, J.; KUSTA, A.** Solar radiation energy pulsations in a plant leaf. *Journal of Environmental Engineering and landscape management*. 2010. Vol. 18, No. 3. P. 188-195.

Monografijoje cituoti kitų autorių darbai

1. ASCARD, J. Flame weeding: effects of open and covered flammers. *Termal Weed control by Flaming Dissertation Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering*. Report 200. Alnarp, 1995, p. 1–37.
2. ASKENASY, E. Uber die Temperatur, welche Pflanzen im Sonnenlicht aufnehmen. *Botanische Zeitung*, 1875. No.27, S 440 – 444.
3. BALTRĖNAS, P.; BUTKUS, D.; OŠKINIS, V.; VASAREVIČIUS, S.; ZIGMONTIENĖ, A. *Aplinkos apsauga*. Vilnius: Technika, 2008, 564 p.
4. BARANOVA, T. A.; ZHDANOV, B. И.; ZHUKOVA, YU. V.; ISAEV S. A. Reduction of Resistance and Heat Transfer Enhancement in Flow past a Cylinder with Jet and Vortex Generators. *Heat Transfer Research*, 2010, Vol. 41, N 4. P. 401-411.
5. BERTRAM, A. Geräte und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Weihenstephan, 1996. – 196 S.
6. BRAZAUSKIENĖ, D.M. Agroekologija ir chemija. Kaunas, 2004. 207 p.
7. 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.
8. CHEN, C.K.; LIN, Y.T. Laminar film condensation from a downward-flowing steam-air mixture onto horizontal circular tube. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, v.33, p.1944-1956.
9. ČĖSNA, B. Heat transfer and hydrodynamics in gas - cooled fuel rod assemblies. Begell house, LEI, 2005. 238 p.

10. DAGYS, J; BLUZMANAS, P.; BORUSAS, S.; ŠLAPAKAUSKAS, V. 1974. *Augalų fiziologija*. Vilnius, 389 p.
11. DANIELL, J.W.; CHAPELL, W.E.; COUCH, H.B. Effect of sublethal and lethal temperatures on plant cells. *Plant Physiology*. 1969, N 44, p. 1684-1689.
12. DENGLIANG, Z.; HONG, X.; YAN, S.; BAOJIN, Q. Numerical heat transfer analysis of laminar film condensation on a vertical fluted tube. *Applied Thermal Engineering*, 2010, v.30, p.1159-1163.
13. ELLWAGNER, T.; BINGHAM, Jr.; CHAPELL, S. We and Tolin SA. Cytological effects of ultra-high temperatures on Corn. *Weed Science*, 1973, N 21 (4), p. 299-303.
14. FITTER, A.; HAY, R. Environmental physiology of Plants. S.D., S.F., N.Y., B., L., S., T., *Academic press*, 2002, 367 s.
15. GUO YU QIU, BEN-ASHER, J.; YANO T.; MOMII, K. Estimation of Soil Evaporation Using the Differential Temperature Method. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 1999. Vol. 63, p. 1608 – 1614.
16. GUO YU QIU; KOICHI MIYAMOTO; SADANORI SASE; YONG GAO; PEIJUN SHI; TOMOHISA YANO. Comparison of the three-Temperature Model and Conventional Models for Estimating Transpiration. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 2002. 36 (2), p. 73-82.
17. Hayashi, H. 2001. Plant temperature stress. *Encyklopedia of life sciences*. John Wiley & Sons, Ltd. All rights reserved. DOI:10.1038/npg.els.0001320.
18. HEGE, H. Thermische Unkrautbekämpfung. *Gemüse*. 1990, S. 344-347.
19. HERVE COCHARD; LLUIS COLL; XAVIER LE ROUX; THIERRY AMEGLIO. Unraveling the Effects of Plant Hydraulics on Stomatal Closure during Water Stress in Walnut. *Plant Physiology*. 2002, Vol. 128, p. 282-290.
20. INCROPERA, F. P.; DEWITT D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edition. Hardcover, 2001. 1008 p.
21. INCROPERA, F.P.; DEWITT D. P. Fundamentals of Heat Transfer. - New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1981. 819 p.
22. ЛЬКУН, Г.М. Энергетичний баланс рослин. Київ, 1967. 234 с.
23. KAJALAVIČIUS, A. *Medienos hidroterminis apdirbimas ir konsevimas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla. 1992. 323 p.
24. KAJALAVIČIUS, A.; ALBREKTAS, D. *Medienos hidroterminio apdirbimo teorija ir įranga*. Technologija. 2010. 163 p.
25. KAJALAVIČIUS, A.; ALBREKTAS, D. *Pjautinės medienos kamerinis konvekcinis džiovinimas*. Technologija. 2010. 212 p.
26. KITAYA, Y.; KAVAI M, TSUYAMA, J.; TAKAHASHI, H.; TANI, A.; GOTO, E.; SAITO, T.; KIYOTA, M. The effect of gravity on surface

- temperatures of plant leaves. *Plant, Cell and Environment*, 2003. Vol. 26, p.497-503.
27. KLESCHNIN, A F. Die Pflanze und das Licht. Akademie-Verlag, Berlin, 1960. 620 p.
 28. KURFESS, W. *Untersuchungen zum Einsatz von Heißwasser zur thermischen Unkrautregulierung*. Stuttgart, 2000. 126 S.
 29. LAFTA, A.M.; LORENZEN, J.H. 1995. Effect of high temperature on plant growth and carbohydrate metabolism in potato. *Plant physiol.* 109(2): 637-643.
 30. LAMBERS, H. *Plant physiological ecology*. New York. Springer, 2006. 540 p.
 31. LARCHER, W. *Physiological Plant Ecology*. Springer, 1995. 506 S.
 32. LESKAUSKAS, BALANDIS, A.; ŠINKŪNAS, S.; VAICKELIONIS, G.; VALANČIUS, Z. Chemijos inžinerija. II knyga. Technologija. 2007. 536 p.
 33. LEVITT, J. Response of plants on environmental stresses. *Academic Press*. New York, 1980. Bd 1.
 34. LIUTIKAS, N.; GUDZINSKAS, J. *Termohidromechanika*. Kaunas: Technologija, 2001. 377 p.
 35. MAKAREVIČIUS, V. Šilumos pernešimo procesų esant faziniams virsmams stilizatoriuose tyrimas. *Energetika*. 2001, Nr. 1, p. 54-65.
 36. MAKAREVIČIUS, V. Self-similarity of differential equations and heat transfer patterns of a turbulent near-wall layer. *Heat transfer research*. 2009, Vol. 40, No. 5, p. 485-504.
 37. MARTYNENKO, O. G.; ŽUKAUSKAS, A. A. *Heat Transfer*. London, 1989, vol. 1, 569 p.
 38. MILIAUSKAS, G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Oxford : Pergamon-Elsevier Science Ltd. 2001, Vol. 44, no. 4, p. 785-798.
 39. MILIAUSKAS, G.; ŠABANAS, V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Oxford : Pergamon-Elsevier Science Ltd. 2006, Vol. 49, no. 11-12, p. 1790-1803.
 40. MILIAUSKAS, G.; ŠINKŪNAS, S.; MILIAUSKAS, G. Evaporation and condensing augmentation of water droplets in flue gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Oxford : Pergamon-Elsevier Science Ltd. 2010, Vol. 53, iss. 5-6, p. 1220-1230.
 41. MILIAUSKAS, G.; ŠINKŪNAS, S. Interaction of the transient heat and mass transfer processes through evaporation of sprayed liquid droplets. *Heat transfer research*. 2009. Vol. 40, No. 5, p. 473-483.
 42. NOBEL, P. S. Physicochemical and Environmental Plant physiology. *Academic press*, 2005. 567p.

43. NOBEL, P. S. *Physiological and Environmental Plant physiology*. Academic press, 1991. 635 p.
44. PANDAY, P.K. Two-dimensional turbulent film condensation of vapours flowing inside a vertical tube and between parallel plates: a numerical approach. *Int. J. of Refrigeration*, 2003, v.26, p. 492-503.
45. PEDISIUS, A.; ŠLANČIAUSKAS, A. *Heat transfer augmentation in turbulent flows*. New York-Kaunas, Begell house, 1995. 266 p.
46. PETRUŠEVIČIUS, V.; RAILA, A. *Augalininkystės produktų džiovinimas storame nejudančiame sluoksnyje*. Akademija, 2009. 262 p.
47. RAILA, A. J. Termoenerginiai procesai sandėliuojamų augalininkystės produktų sluoksnyje. Lietuvos žemės ūkio akademija, 1995. 74 p.
48. RASCHKE, K. Über die physikalischen Beziehungen zwischen Wärmeübergangszahl, Strahlungsaustausch, Temperatur und Transpiration eines Blattes. *Planta*. 1965, Nr. 48. p. 200-238.
49. REVANKAR, S.T.; POLLOCK, D. Laminar film condensation in a vertical tube in the presence of noncondensable gas. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, v.29, p. 341-359.
50. RUSECKAS, J. *Miško ir drėgmės sąveika*. Kaunas: Lututė. 2002. 200 p.
51. SCHLICHTING H., GERSTEN K. *Boundary Layer Theory*. 8th, Ed. Berlin, Springer Verlag, 2000. 799 p.
52. SCHOPFER, P. *Pflanzenphysiologie*. Munchen, 2006. Elsevier. 700 S.
53. SKRINSKA, A. *Heat transfer*. Vilnius: Technika, 2006. 237 p.
54. STAŠAUSKAITĖ, S. *Augalų fiziologijos laboratoriniai ir lauko bandymai*. Vilnius: Aldorija. 1999. 415 p.
55. STAŠAUSKAITĖ, S. *Augalų vystymosi fiziologija*. Vilnius, 1995. 226 p.
56. ŠINKŪNAS, S.; KIELA. Heat transfer for film condensation of vapour. *Mechanika*. Kaunas: Technologija, 2011, Nr.1, p.8-13.
57. ŠLAPAKAUSKAS, V.A. *Augalų ekofiziologija*. Kaunas: Lututė, 2006. 413 p.
58. VAITIEKŪNAS, P. *Konvekcinio pernešimo skaitinis modeliavimas*. LEI, 1998. 263 p.
59. VENSCLAUSKAS, M. *Biofizika*. Kaunas, 1996. 207 p.
60. WEEVERS T. H. *Fifty years of plant physiology*. Amsterdam, 1949.
61. ŽUKAUSKAS, A. *High - performance single-phase heat exchangers*. N.Y. London, 1989. 515 p.
62. АЛЕКСИНА, Н. Д. *Физиология растений*. Москва, 2007. Академия, 634 с.
63. ВЕРЕТЕННИКОВ, А. В. *Физиология растений*. Москва, 2006. 479 с.
64. ДЗЮБЕНКО, Б. В. АШМОНТАС, Л. В. МЯКОЧИН, А. С. *Термодинамика*. Вильнюс, 2006. 302 с.
65. ДРАГАНОВ, Б. Х. *Теплотехника*. М., Энергоатомиздат, 2006. 432 с.

66. ДРАГАНОВ, Б. Х., КУЗНЕЦОВ, А.В., РУДОБАШТА, С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. Москва Агропромиздат, 1990. – 464 с.
67. ЖУКАУСКАС, А. Конвективный перенос в теплообменниках. – Москва: Наука, 1982. 472 с.
68. ЖУКАУСКАС, А.; МАРТИНЕНКО, О. Успехи теплопередачи. – Вильнюс, 1988. 187 с.
69. ЖУКАУСКАС, А., ЖЮГЖДА, И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости. Вильнюс, 1979. – 238 с.
70. ЖУКАУСКАС, А., МАКАРЯВИЧЮС, В., ШЛАНЧЯНСКАС, А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. – Вильнюс, 1968. – 190 с.
71. ЗОТИН, А. И. Термодинамический подход к проблемам развития, роста и старения. Наука, 1974. – 184с.
72. ИЛЬКУН, Г. М. Энергетический обмен растений со средней и его физиологическая роль. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. д-ра. биол. наук. – Киев, 1966. – 32 с.
73. КЛЕШНИН, А. Ф. Физиологические основы светокультуры растений: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. д-ра. биол. наук. Ленинград, 1960. – 32 с.
74. ЛЫКОВ, А.В. Теория сушки. Москва, 1968. Энергия – 471с
75. РАДЧЕНКО С. И. Температурные градиенты среды и растения. Наука М – Л. 1966. – 386 с
76. СЛЕЙЧЕР Р. Водный режим растений. Москва. Наука, 1970. – 342 с.
77. СОКОЛОВСКАЯ А. П. К вопросу о влиянии солнечной радиации на температуру некоторых растений песчаной пустыни Кара-Кумы. *Труды по прикладной ботанике генетике и селекции*. 1933, Сер 1, Nr. 1, с. 209 – 229.
78. ШУЛГИН, И. А. *Солнечная радиация и фотоморфогенез зеленого растения*: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. д-ра. биол. наук. Ленинград, 1970. 40 с.

Turinys

	ĮVADAS	6
	SIMBOLINIAI ŽYMENYS	9
1.	AUGALO ENERGIJŲ BALANSAS	11
1.1.	Energija ir jos svarba augalijai	11
1.2.	Augalo energijų balansas	16
1.3.	Augalo energijų balanso narių apibūdinimas	22
2.	AUGALŲ ENERGINĖS APYKAITOS PROCESŲ DĖSNINGUMAI	27
2.1.	Augalų energinės apykaitos balansai	29
2.2.	Augalų energinės apykaitos procesai	40
2.3.	Augalų energinė apykaita, kai augalo temperatūra didesnė už jo aplinkos temperatūrą	47
2.4.	Augalų energinė apykaita, kai augalo temperatūra mažesnė už jo aplinkos temperatūrą	58
2.5.	Augalų energinė apykaita, kai augalo ir jo aplinkos temperatūros vienodos	69
2.6.	Augalų energinė apykaita esant tik vienam temperatūros gradientui	74
2.7.	Augalų energinė apykaita rasos iškritimo ir radiacinės šalnos metu	78
2.8.	Augalų energinė apykaita minimalios energinės apykaitos periodu	82
2.9.	Augalų energinės apykaitos srautų analizė	88
2.10.	Augalų energinės apykaitos procesų analizė	93
2.11.	Augalų energinės apykaitos procesų diagrama	101
3.	TRANSPIRACIJOS PROCESO ENERGETIKA	105
4.	AUGALŲ IR JŲ APLINKOS ENERGINĖS APYKAITOS PROCESŲ DĖSNINGUMAI	113
4.1.	Augalų aplinkos oro temperatūra	113
4.2.	Augalo dalių paviršiuje vykstančių energinės apykaitos procesų dėsniumai	117
4.3.	Augalo dalių geometrinės formos įtaka jų energinei apykaitai	128
4.4.	Augalo dalių temperatūros kitimo dėsniumai	136
5.	AUGALŲ ENERGINĖ APYKAITA KINTANČIO ENERGIJŲ BALANSO BŪSENOJE	142

5.1.	Augalo energinės apykaitos kitimas kintant augalo aplinkos temperatūrai	142
5.2.	Augalo lapo energinės apykaitos svyravimai kintant jo ekspozicijai saulės atžvilgiu	152
5.3.	Augalo lapo temperatūros svyravimai kintant jo ekspozicijai saulės atžvilgiu	162
5.4.	Augalo lapo temperatūros svyravimų poveikis jo energinei apykaitai su aplinka	180
5.5.	Augalo lapo temperatūros svyravimai	185
5.6.	Augalo lapo temperatūros svyravimų sukelti termodinaminiai procesai	192
5.7.	Energijos virsmų augalo lapuose termodinaminis ciklas	201
	APIBENDRINIMAS	207
	LITERATŪRA	210
	Monografijoje apibendrinti autorių darbai	210
	Monografijoje cituoti kitų autorių darbai	217

P. A. Sirvydas, P. Kerpauskas, V. Kučinskas
Augalų energinė apykaita. Monografija.
Lietuvos žemės ūkio universitetas. Akademija, 2011.
ISBN 978-9955-896-94-4

SL 399. 2011.01.04. Sp. l. 14,0. Aut. l. 15,5. Tiražas 250. Užsakymo##Nr. 54. Leido ir spausdino LŽŪU Leidybos centras – 2011. Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r.