

INDUSTRIĀLĀS SILTUMNĪCAS ENERGO-EKOLOĢISKĀS MODELĒŠANAS PIEEJA ENERGY-ECOLOGICAL APPROACH OF INDUSTRIAL GREENHOUSE ENVIRONMENT MODELING

Sergej Rakutko¹, Ansis Avotiņš², Ina Alsiņa³, Māra Dūma⁴

¹Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP), Russia

²Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts, Rīgas Tehniskā universitāte

³Augsnes un augu zinātņu institūts, Latvijas Lauksaimniecības universitāte

⁴Ķīmijas katedra, Latvijas Lauksaimniecības universitāte

sergej1964@yandex.ru

Abstract. The concept of Artificial Bio-Energetic System (ABES) of greenhouse as a synergy of power apparatus, technological processes and biological objects is considered. The comparative experiment was carried out in a light-isolated laboratory room. An index of the spectral composition of the radiation of sources K_{LW} is proposed, which characterizes the fraction of the energy of long-wave radiation in the total flux of PAR radiation. Empirical models of the basic biometric parameters of tomato plants are obtained. The results of experimental studies are presented, which confirm the applicability of the theoretical positions in the justification of the choice of light sources for indoor plant lighting.

Key words: greenhouse, plant lighting, artificial bio-energetic system, energy-ecological performance, best available technologies.

Ievads

Valstīs un reģionos, kur ir nelabvēlīgi klimata apstākļi, industriālās siltumnīcas tiek plaši izmantotas, lai audzētu augus visu gadu garumā. Tajās tiek izmantotas dažādas tehnoloģijas, un visi vides faktori tiek stingri kontrolēti, turklāt līdztekus saules enerģijai tiek izmantoti arī mākslīgie apgaismojuma avoti, kuru parametru (daudzums, ilgums, periodiskums, gaismas kvalitāte) variācija arī dažādi ietekmē augu augšanu un attīstību (Smith, 1982).

Augu apgaismojumā spektrs tiek raksturots kā enerģijas daļa no kopējā fotosintētiski aktīvā starojuma (PAR) konkrētos viļņa diapazonos, kur "zilais" (B) ir 400–500 nm, "zaļais" (G) ir 500–600 nm, "sarkanais" (R) 600–700 nm un "tālu-sarkanais" (FR) 700–800 nm. Galvenās novērotās sakarības ir tādas, ka augs lapas absorbē gaismu B un R, bet atstaro G diapazonos, savukārt FR diapazonā – daļu gan absorbē, gan atstaro (Larcher, 2000). Vairākos eksperimentos tika noteikti dažādi spektra diapazonu ietekmes efekti uz augiem, secinot, ka zilais spektrs ir būtiski svarīgs (Wheeler *et al.*, 1991). Tas ietekmē piparu stumbra un lapu morfoloģiju (Schuerger *et al.*, 1997) un izraisa variācijas hloroplastu sastāvā (augstāka "Chl a" attiecība pret "Chl b"), kas uzlabo fotosintēzes efektivitāti (Hoffmann *et al.*, 2015). G starojumam ir pozitīva ietekme uz tomātu un saldo piparu attīstību (Samuolienė *et al.*, 2012).

R un FR starojuma ietekme uz augu attīstību ir detalizēti pētīta (Rajapaske *et al.*, 1992). FR starojums palielina saldā pipara stādu augstumu un stumbra masu (Brown *et al.*, 1995). Enerģijas attiecība iepriekš minētajās joslās ir svarīga arī dažādu augu normālai fotomorfoģenēzei (Kim *et al.*, 2006).

Apkopojot līdz šim pieejamo eksperimentu rezultātus, var secināt, ka palielināta zilā starojuma daļa veicina šūnu dalīšanos, pirmo asnu veidošanos un novērš augu stīdzēšanu. Jaunajām siltumnīcu tehnoloģijām jābūt energoefektīvām un ar zemu ietekmi uz vidi, tādēļ mākslīgais apgaismojums ir viens no nozīmīgākajiem instrumentiem kopējās energoefektivitātes uzlabošanā (Rakutko, Patsukov, 2013). Augu apgaismojuma energo-ekoloģija ir jauns termins, kas saista gan augu fizioloģiju, gan fiziku (apgaismojuma inženierija) un ekoloģiju. Pieejas īpatnība ir tāda, ka tā ņem vērā vielas un enerģijas plūsmas likumsakarības augu apgaismojuma mākslīgajā bioenerģijas sistēmā (ABES), ko var noteikt ar apgaismojuma fotonu plūsmu un ABES fotosintēzes produktu plūsmu sakarībām.

Augu apgaismojuma enerģijas un ekoloģiskās savietojamības jēdziens tiek interpretēts kā ABES augošo augu tehnoloģiskā procesa īpašība, lai atbilstu energoefektivitātes un vides ietekmes prasībām, kas tiek novērtētas pēc šobrīd labākajām pieejamajām tehnoloģijām (BAT). Svarīgākais

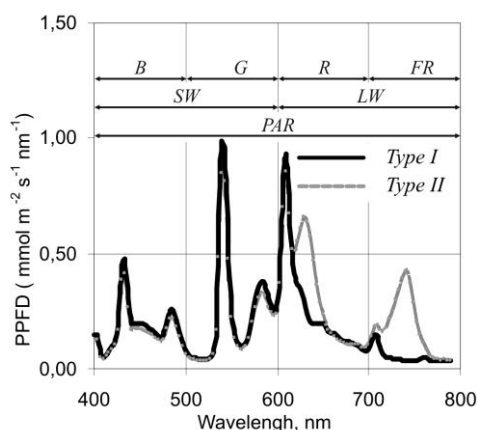
augu apgaismojuma efektivitātes indikators ir auga augšanas dinamika, kuru nosaka vairāki biometriski parametri. Nosakot šo parametru dinamikas matemātisko modeli, varēs izstrādāt augu apgaismojuma vadības teoriju un atbilstošus algoritmus. Šī pētījuma mērķis ir skaitliski novērtēt enerģijas un ekoloģijas savietojamību, audzējot tomātu dēstus pie dažādiem apgaismojuma tiptiem un to kvalitātes parametriem.

Materiāli un metodes

Eksperimentu pētījuma objekts bija tomātu stādu (*Solanum Lycopersicum* L.) šķirne 'Polonaise' F1, kas audzēta kūdras substrātā. Kopumā 220 sēklas tika iestādītas augsnes substrāta tvertnē 11.05.2018., tvertne tika pārklāta ar plēvi un ievietota telpā, kur gaisa temperatūra bija +27 °C un mitruma līmenis 72%. Pirmais dīgsts izdīga 14.05.2018., un pēc masveida asnu parādīšanās 15.05.2018. augi tika apgaismoti cauru diennakti ar nātrija augstspiediena lampu (DNaz 400W). No šī brīža tika uzskaitīts augu vecums (DAE – diena pēc asnu parādīšanās). 18.05.2018. fotoperiods tika nomainīts uz 16 stundām. 24.05.2018. (10 dienas pēc sadīgšanas), pie otrās īstās lapas parādīšanās, augi tika pārstādīti viena litra podos ar jauktu kūdras un augsnes maisījumu attiecībā 2:1. Podi ar augiem tika novietoti eksperimentālajās apgaismojuma vietās 28.05.2018. Augi tika laistīti un baroti pēc nepieciešamības. 03.06.2018. parādījās trešā īstā lapa. Pēc tam pirmie mērījumi tika veikti 05.06.2018. (22. diena), otrie – 13.06.2018. (30. diena), trešie – 21.06.2018. (38. diena) un ceturšie – 29.06.2018. (46. diena).

Salīdzinošais eksperiments tika veikts gaismas izolētā laboratorijas telpā ar speciālu aprīkojumu, kas nodrošina augu augšanas nosacījumus: gaisa kondicionēšanas sistēma, elektriskie ventilatori, gaisa mitrinātājs, kombinēta mikroklimata sensoru sistēma, vadības panelis un laistīšanas iekārta. Telpu sadalīja divās zonās, izmantojot baltas plastmasas plēves, tādējādi aizsargājot augus no apgaismojuma no blakus esošās sekcijas un no dabiskās gaismas, bet neierobežojot gaisa plūsmu sekciju iekšienē. Eksperimentu laikā tika uzturēts identisks PAR ($140 \mu\text{mol s}^{-2} \text{m}^{-2}$) līmenis katrā zonā, ko regulēja, mainot gaismekļu augstumu. Apgaismojuma nevienmērība ($z = E_{\text{max}}/E_{\text{av}}$) nepārsniedza 10%.

Pirmajā zonā tika izmantoti astoņi fluorescentā tipa gaismekļi "OSRAM L58W / 840 LUMILUX Cool White" un astoņi "OSRAM L58W / 77 FLUORA" gaismekļi, kur 8 no katra veida tika uzstādīti uz viena rāmja, jauktā secībā. Otrajā zonā tika izvietoti 40 gab. LED diožu gaismas avoti (PCB Star LED) ar viļņa garumu no 630 nm līdz 735 nm, kas iebūvēti līdzīgu fluorescento gaismekļu korpusos (vienāda optika). Fotosintētiskās fotonu plūsmas blīvums (PPFD) tika mērīts ar "TKA VD/04" instrumentu, iegūtie rezultāti atspoguļoti 1. attēlā.



1. att. Fotosintētiskās fotonu plūsmas blīvums.

Fig. 1. Photosynthetic photon flux density.



2. att. Tomātu stādi: pa kreisi audzēti īso viļņu garuma joslā (SM), pa labi – garo viļņu garuma joslā (LW).

Fig. 2. Tomato plants: left- grown at the short wavelength (SW), right- grown at the long wavelength (LW).

Metodoloģiskais izaicinājums, meklējot augu reakciju uz gaismas starojuma kvalitāti, ir grūtības aprakstīt šo sastāvu ar vienu rādītāju. Šajā pētījumā apgaismojuma plūsmas zilajās un zaļajās joslās tika summētas un uzskatītas par starojumu PAR īsā viļņa garuma joslā (SW). Radiācijas plūsmas sarkanajās un tālu sarkanajās joslās tika summētas un uzskatītas par starojumu PAR garo viļņu joslā (LW). Šī pieeja ļāva ieviest koeficientu, kas raksturo garās viļņu starojuma enerģijas īpatsvaru kopējā starojuma plūsmā (1. formula):

$$K_{LW} = \frac{\Phi_{LW}}{\Phi_{SW} + \Phi_{LW}}. \quad (1)$$

Šis koeficients tiek izmantots, lai aprakstītu spektra tipu eksperimenta variantos: I tips – spektrs ar mazāku daļu no garo viļņu starojuma enerģijas ($K_{LW} = 0.37$); II tips – spektrs ar lielāku garās viļņu starojuma enerģijas daļu ($K_{LW} = 0.5$). Lai mainītu starojuma kvalitatīvo sastāvu, tika izmantota papildu plūsma no LED diodēm, kas palielināja K_{LW} vērtību. Lai saglabātu tādu pašu PPFD līmeni, gaismekļu augstums virs augu galotnēm bija atšķirīgs (0.38 m I tipa spektram un 0.71 m II tipa spektram). Vairākos mērījumos pēc kārtas, dažādās dienās pēc asnu parādīšanās (DAE) tika pierakstīti tomātu stādu galvenie biometriskie parametri: auga stumbra diametrs D , lapu skaits N , hipokotila augstums H , auga svaigā masa M , lapu laukums S un auga sausnas saturs ν . Variāciju dinamika stumbra diametram D un lapu skaitam N tika aproksimēta ar logaritmiskām līknēm (2. formula):

$$Y = Y_m(1 - e^{-B(T-T_m)}). \quad (2)$$

Variāciju dinamika hipokotila augstumam H , svaigajai masai M un lapu virsmai S tika aproksimēta ar „Gompertz” līkni (3. formula):

$$Y = Y_0 + Y_m e^{-e^{-B(T-T_m)}}. \quad (3)$$

Sausnas saturu ν aproksimēja ar polinomu (4. formula):

$$Y = AT^2 + BT + C. \quad (4)$$

Formulām (2)–(4) tika noteiktas arī koeficientu kopas katram spektra tipam. Augu apgaismojuma enerģijas un vides savietojamība tika novērtēta ar koeficientu K_{EE} , kas parāda, cik tuvu ir izvēlēta audzēšanas tehnoloģija salīdzinājumā ar labākajām pieejamajām apgaismojuma tehnoloģijām (BAT). Tuvuma pakāpe tika novērtēta pēc normalizētā Eiklīda attāluma starp abām trajektorijām salīdzināmajos apstākļos (P) un optimālajiem BAT nosacījumiem (O) augu biometrisku parametru n -dimensiju faktoru telpā (5. formula):

$$K_{EE} = \begin{cases} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \delta_i^{R-O} \\ O \in BAT \end{cases}. \quad (5)$$

Tā kā augu biometrisku parametru funkcionālās atkarības ir norādītas analītiskā formā (vienādojumi (2)–(4)), tad enerģijas koeficienta un ekoloģiskās savietojamības izteiksme ir šāda (6. formula):

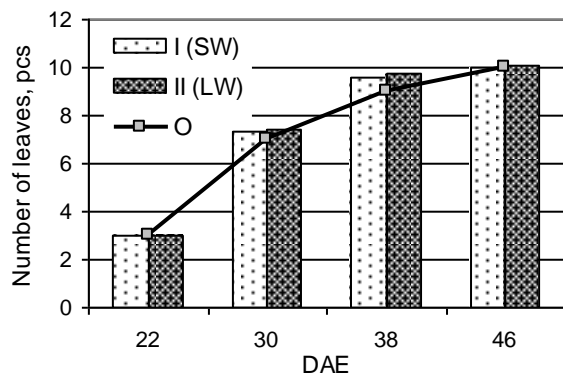
$$K_{EE} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{f_i^R(t) - f_i^O(t)}{f_i^O(t)} \right)^2} dt, \quad (6)$$

kur T ir noteiktais laika periods, $f_i^R(t)$ un $f_i^O(t)$ ir funkcionālās sakarības i -tajam parametram laikā starp reālo (R) un optimālo (O) tehnoloģiju, respektīvi, w_i ir svara koeficients i -tajam parametram. Iegūtie dati tika apstrādāti ar matemātiskās statistikas metodēm ($p < 0.05$), izmantojot „MS Excel 2003” un „Statistica 6.0” programmas.

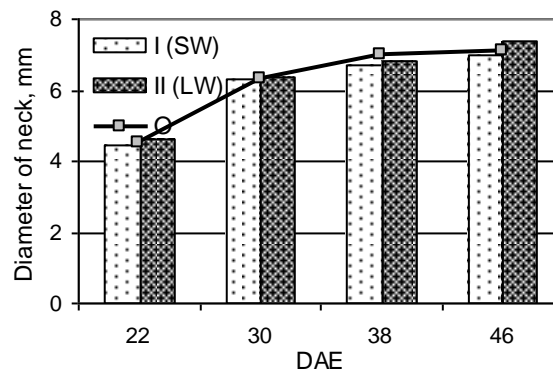
Rezultāti un diskusijas

Saskaņā ar izvirzītajām hipotēzēm I tipa spektrs ar mazāku LW starojuma īpatsvaru ir atzīts par labvēlīgāku augiem (skat. 2. att.). Augi ar šādu apgaismojumu bija spēcīgāki un labāk atbilda stādu kvalitātes standartiem. Attiecīgi 3. un 4. attēlā norādīta sakarība starp auga lapu skaitu un laiku, kā arī sakarība starp stumbra diametru un laiku. Augiem, kas atradās zem starojuma spektra ar lielāku K_{LW} vērtību, bija lielāks augstums un svaigā masa, bet mazāks lapu laukums. Statistiski nozīmīgas šo parametru atšķirības augiem, kas audzēti ar dažādu starojuma spektru, netika konstatētas.

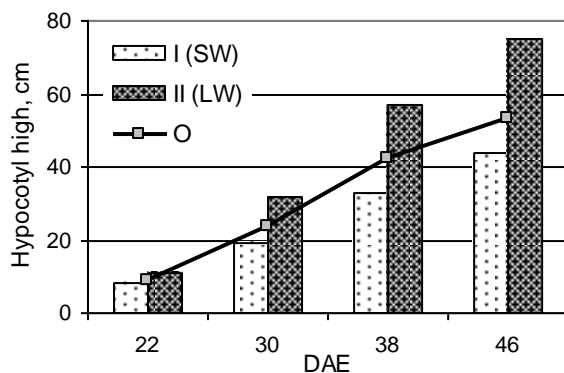
5., 6. un 7. attēlā parādīta sakarība starp hipokotila augstumu, tā svaigo masu un lapu laukumu un laiku, savukārt 8. attēlā parādīta sakarība starp augu sausnas saturu un laiku. Eksperimenta beigās augstāks sausnas saturs tika novērots augiem, kas bija pakļauti starojumam ar zemāku K_{LW} . Biezā līnija 3. līdz 8. attēlā atspoguļo konkrētu biometrisko parametru attīstības ceļu, kas ir ieskicēts saskaņā ar ekspertu aplēsēm, pamatojoties uz šo parametru vēlamajām vērtībām jebkurā brīdī.



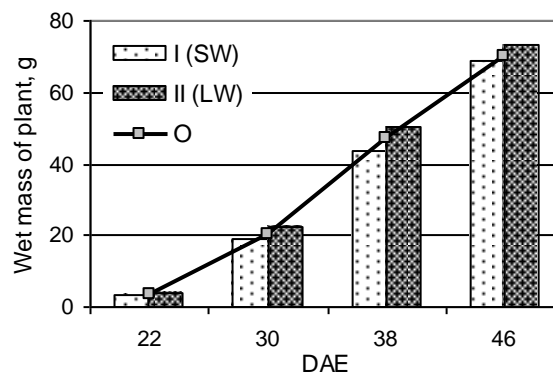
3. att. Lapu skaits, gabali.
Fig. 3. Number of leaves, pieces.



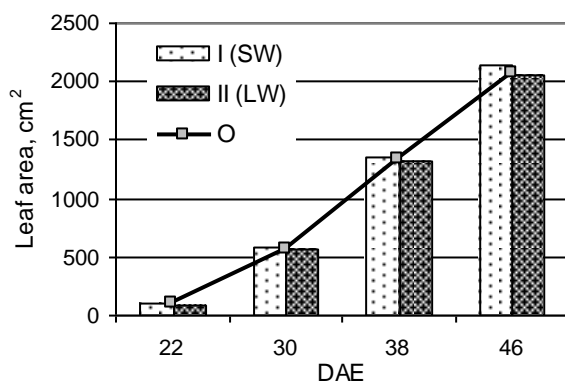
4. att. Stāda stumbra diametrs, mm.
Fig. 4. Neck diameter, mm.



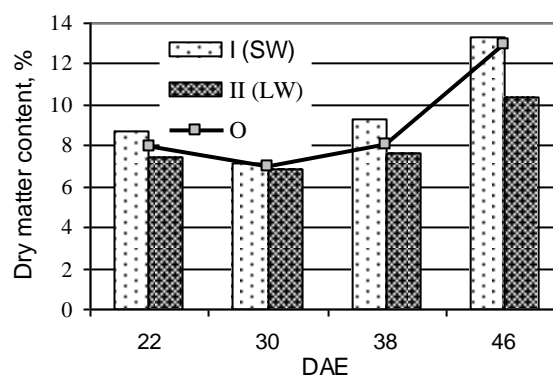
5. att. Hipokotila augstums, cm.
Fig. 5. Hypocotyl height, cm.



6. att. Augu svaigā masa, g.
Fig. 6. Plant fresh mass, g.



7. att. Lapu laukums, cm².
Fig. 7. Leaf area, cm².



8. att. Sausnas saturs, %.
Fig. 8. Dry matter content, %

Tabulā iekļautas koeficientu vērtības aproksimācijas funkcijām – attiecībā pret noteiktu biometrisko parametru dinamiku abiem spektra veidiem, kā arī optimālam attīstības ceļam. Enerģijas un ekoloģiskās savietojamības koeficienta vērtības, kas aprēķinātas ar 6. formulu, ir

$K_{EE} = 0.22$ rel. vienības I tipa spektram un $K_{EE} = 0.38$ rel. vienības II tipa spektram. Koeficienta vērtība pieaug, palielinoties arī garo viļņu daļas īpatsvaram. Ir zināms, ka īso viļņu (zilajam) starojumam ir labvēlīga ietekme uz stādu attīstību agrīnā stadijā. Empīriskās pieejas rezultātā, pamatojoties uz eksperimentāliem datiem, tika izvēlētas diezgan vienkāršas augu galveno biometrisko parametru formulas. Tika konstatēts, ka garo viļņu frekvenču joslas nobīde no 37% uz 50% (par 13%) izraisa ievērojamu atšķirību gandrīz visos augu biometriskajos parametros to audzēšanas procesā, un enerģijas koeficienta un ekoloģiskās savietojamības vērtības izmaiņu no 22% uz 38% (par 16%).

1. tabula Table 1

Koeficientu vērtības aproksimāciju sakarībām.
The values of coefficients of approximation dependences

Parametrs / Parameter	Vērtība / Values			Parametrs / Parameter	Vērtība / Values		
	I (SW)	II (LW)	O		I (SW)	II (LW)	O
Lapu skaits / Model of the number of leaves $N=f(T)$, gab.				Stumbra diametra modelis / Model of the stem neck diameter $D=f(T)$, mm			
Y_m	10.686	10.806	11.000	Y_m	6.984	7.594	7.213
B	0.110	0.110	0.087	B	0.161	0.098	0.143
T_m	19.027	19.034	18.325	T_m	15.724	12.355	15.175
Auga augstuma modelis / Model of the plant height $H=f(T)$, sm				Auga svaigās masas modelis / Model of the plant fresh mass $M=f(T)$, g			
Y_0	5.296	5.008	6.941	Y_0	-0.674	-0.311	0.716
Y_m	50.345	89.360	54.019	Y_m	117.90	101.137	97.802
B	0.098	0.100	0.126	B	0.077	0.096	0.097
T_m	32.684	31.865	31.366	T_m	37.71	34.126	35.004
Lapu laukuma modelis / Model of the leaf area $S=f(T)$, cm ²				Sausnas satura modelis / Model of the dry matter content $V=f(T)$, %			
Y_0	-28.304	-37.546	-27.950	A	0.022	0.013	0.023
Y_m	3772.17	3366.178	3386.076	B	-1.287	-0.755	-1.345
B	0.075	0.080	0.081	C	26.337	17.823	26.592
T_m	38.072	36.783	36.788				

Secinājumi

Augu augšanas modeļu nozīme augu apgaismojuma vadības teorijā tika pamatota praktiski. Izveidoti jauni indikatori K_{LW} , kas ļauj izteikt gaismas kvalitāti vienā skaitlī, un K_{EE} , kas parāda, cik tuvu ir izvēlēta audzēšanas tehnoloģija pret BAT, izmantojot Eiklīda distanci starp divām mainīgām biometrisko parametru augšanas trajektorijām. Atklāta nozīmīga atšķirība starp tomātu biometriskajiem parametriem, kas auguši zem dažādu apgaismojumu K_{LW} vērtībām. Izveidoti matemātiskie modeļi tomātu stādu galvenajiem biometriskajiem parametriem. Iegūta sakarība starp enerģiju un ekoloģisko savietojamību tomātu stāda apgaismojumam un apgaismojuma kvalitātei.

Atzinība

Raksts ir sagatavots ar ERAF projekta „Jaunu vadības metožu izstrāde siltumnīcu augu apgaismojuma sistēmām to enerģētisko un ekoloģisko parametru uzlabošanai (uMol)”, līguma Nr. 1.1.1.1/16/A/261 atbalstu.

Izmantotā literatūra

1. Brown C., Shuerger A.C. and Sager J.C. (1995). Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. Am. SocHortic Sci.* 120, p. 808–813.
2. Hoffmann A.M., Noga G. and Hunsche M. (2015). Acclimations to light quality on plant and leaf level affect the vulnerability of pepper (*Capsicum annuum* L.) to water deficit. *Journal of Plant Research*, 128(2), p. 295–306.
3. Larcher W. (2000). *Physiological Plant Ecology*. Springer, p. 513.
4. Rajapaske N.C., Pollock R.K., McMahon M.J., Kelly J.W. and Young R.W. (1992). Interpretation of light quality measurements and plant response in spectral filter research. *HortScience*, 27, p. 1208–1211.

5. Rakutko S. and Patsukov A. (2013). Comparative application efficiency of optical flux delivered from led and gas-discharge sources in indoor plant cultivation. *In: Engineering for Rural Development. The 12-th International Scientific Conference*. Latvia University of Agriculture, Latvia, p. 137–141.
6. Samuolienė G., Brazaitytė A., Duchovskis P., Viršilė A., Jankauskienė J., Sirtautas R., Novičkovas A., Sakalauskienė S. and Sakalauskaitė J. (2012). Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses. *Acta Hort.* 952, p. 885–892.
7. Schuerger A.C., Brown C.S. and Stryjewski E.C. (1997). Anatomical Features of Pepper Plants (*Capsicum annuum* L.) Grown under Red Light-emitting Diodes Supplemented with Blue or Far-red Light. *Annals of Botany*, 79, p. 273–282.