

**Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Tehniskā fakultāte
Mehānikas institūts**

**Latvia University of Agriculture
Faculty of Engineering
Institute of Mechanics**

Mg.sc.ing. Liene Kanceviča

**KONSTRUKCIJAS PAMATOJUMS SAULES
ENERĢIJAS KOLEKTORAM AR
ATSTAROTĀJIEM**

**SUBSTANTIATION OF THE CONSTRUCTION OF
SOLAR ENERGY COLLECTOR WITH
REFLECTORS**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS
Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

PROMOTION PAPER SUMMARY
for acquiring the scientific degree Dr.sc.ing.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



Promocijas darba izstrāde līdzfinansēta
no Eiropas Savienības Sociālā fonda

_____ (L.Kanceviča)

**Jelgava
2014**

Darbs izpildīts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskajā fakultātē un Lauksaimniecības tehnikas zinātniskā institūta laboratorijās.

Darba zinātniskais vadītājs: profesors, Dr.sc.ing. Imants Ziemelis.

Darba konsultants: vadošais pētnieks, Dr.sc.ing. Aivars Āboltniņš.

Oficiālie recenzenti:

Dr.sc.ing. Gints Birzietis – Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes, Spēkratu institūta profesors.

Dr.habil.sc.ing. Pēteris Šipkovs – LZA Fizikālās Enerģētikas Institūta profesors.

Dr.sc.ing. Algirdas Jasinskas – Aleksandras Stulginskis universitātes asoc.prof., Lietuva.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības nozares Inženierzinātņu apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2014. gada 6. jūnijā plkst. 10:00, Jelgavā, J. Čakstes bulv. 5, Tehniskajā fakultātē, 429. auditorijā.

Ar promocijas darbu, pielikumu un kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Lauksaimniecības universitātes fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā ielā 2.

Atsaukmes sūtīt promocijas padomes sekretāram, prof., Dr.sc.ing. Imantam Ziemelim, LLU, Tehniskā fakultāte, J. Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV-3001.

Padomes priekšsēdētājs: prof., Dr.sc.ing. Juris Priekulis.

The research is carried out at the Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering and the agency of LUA Research institute of Agricultural Machinery.

The scientific advisor of the research: professor, Dr.sc.ing. Imants Ziemelis.

Consultant: leading researcher, Dr.sc.ing. Aivars Aboltins.

The official reviewers:

Dr.sc.ing. Gints Birzietis – Professor of the the Latvia University of Agriculture, Institute of Motor Vehicle of the Faculty of Engineering.

Dr.habil.sc.ing. Peteris Sipkovs – Professor of the Institute of Physical Energetics.

Dr.sc.ing. Algirdas Jasinskas – Aleksandras Stulginskis University asoc.prof., Lithuania.

The promotion paper will be defended in an open meeting of the Promotion Council of the sub-branch of Engineering Sciences of the branch of Agriculture, at the Latvia University of Agriculture on 6th June, 2014 at 10 a.m. Venue – Jelgava, 5 J. Čakstes Blvd., Faculty of Engineering, room 429.

The promotion paper, the annex and summary are available at the Fundamental library of the Latvia University of Agriculture located at 2 Lielā street, Jelgava.

References should be sent to the secretary of the Promotion Council, professor, Dr.sc.ing. Imants Ziemelis. Address – Faculty of Engineering, Latvia University of Agriculture, 5 J. Čakstes Blvd., Jelgava, LV-3001.

Head of the Council: professor, Dr.sc.ing. Juris Priekulis.

SATURS

Darba aktualitāte.....	4
Pētījumu objekts, hipotēze, mērķis un uzdevumi.....	5
Pētījumu metodes	6
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.....	6
Promocijas darba aprobācija	7
Darba zinātniskā novitāte un praktiskās izmantošanas iespējas	12
1. Teorētiskie pētījumi	13
1.1. Konstrukcijas izstrādes pamatojums saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem	14
1.2. Saules enerģijas kolektoru pagriešanas sistēmas, kas nodrošina to sekošanu Saulei.....	17
1.3. Kolektora matemātiskā un simulācijas modeļu izstrāde	18
2. Eksperimentālie pētījumi	21
2.1. Mobilā meteoroloģisko datu reģistrēšanas ierīce.....	22
2.2. Abpusēji apstarojamā saules enerģijas kolektora eksperimentālie pētījumi.....	22
2.3. Konstrukcijas izstrāde saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem	24
3. Ekonomiskais izvērtējums	26
Secinājumi	29
Kopsavilkuma norādēs izmantotie informācijas avoti	49

TABLE OF CONTENTS

Topicality of the research	30
The object, hypothesis, aim and tasks of the research.....	31
Research methods	32
Theses for defence	32
Approbation of the research.....	33
Scientific novelty and practical application of the research	38
1. Theoretical research	39
1.1. Substantiation of the construction of a solar collector with reflectors	39
1.2. Analysis of the sun tracking systems for solar collectors	41
1.3. Mathematical model for the collector.....	42
2. Experimental research.....	43
2.1. Mobil meteorological data registration device.....	44
2.2. Experimental researches of the solar collector irradiated from both sides... ..	44
2.3. Designing of the solar collector with reflectors	45
3. Economic evaluation.....	46
Conclusions	48
References used in summary	49

DARBA AKTUALITĀTE

Rietumeiropai raksturīgais augstais dzīves līmenis pēdējo gadsimtu laikā ir patstāvīgi kontrastējies ar savulaik jaunapgūto energoģenerāciju (naftas, dabas gāzes, kodoldegvielas) trūcīgajiem resursiem un nepieciešamību būt lielā mērā atkarīgi no importa piegādēm. Lai šo atkarību un ar to saistītos negatīvos efektus gan individuālam gala lietotājam, gan tautsaimniecībai kopumā iespējami mazinātu, tiek izdoti enerģētikas nozari veicinoši un regulējoši likumi, normas utt. (Nersesian, 2007; Siegel et al., 2008).

Pieaugošais pieprasījums pēc enerģijas, ierobežotie fosilā kurināmā krājumi, kā arī vides piesārņojums un globālās klimata pārmaiņas pēdējos gados pasaulē radījuši pastiprinātu interesi par atjaunojamiem resursiem. Jau sen ir izgudroti ūdeņraža dzinēji, videi draudzīgas saules baterijas, saules enerģijas kolektori, vēja ģeneratori un citas atjaunojamo enerģijas avotu iekārtas (Kaltschmitt et al., 2007). Atbalsts atjaunojamo resursu izmantošanai ir kļuvis par nozīmīgu Eiropas Savienības politikas sastāvdaļu.

Galvenais stratēģiskais mērķis attiecībā uz atjaunojamiem energoresursiem ir optimāla Latvijas atjaunojamo energoresursu potenciāla izmantošana, ņemot vērā ekonomiskās, ģeogrāfiskās un tehniskās iespējas, kā arī vadoties no ekonomiskajiem, vides un enerģētikas attīstības aspektiem, vienlaikus ņemot vērā starptautiskos un Eiropas Savienības politikas mērķus un prasības attiecībā uz atjaunojamiem energoresursiem (Lauber, 2005; Frass-Ehrfeld, 2009).

No literatūras datu analīzes (Trittin, 2003), pēc 1990. gada, saules enerģijas izmantošana siltumenerģijas ieguvei tirgū katru gadu pieauga apmēram par 13.6%. Kopš 2000. gada, Eiropas Savienībā papildus ik gadu tiek uzstādīts vairāk nekā 1 miljons m² saules enerģijas kolektoru platības. Saules enerģijas kolektori karstā ūdens sagatavošanai veido lielāko daļu no kopējā Eiropas saules enerģijas iekārtu tirgus. To cena ir relatīvi zema, un to montāža uz jumta ir vienkārša. Valstīs, kur jumti ir tradicionāli slīpi, ierīkot sistēmas ar dabisko cirkulāciju, kurās ietilpst smaga un liela ūdens tvertne, ir zināmas grūtības. Ziemeļeiropā sistēmas ar dabisko cirkulāciju netiek izmantotas klimatisko apstākļu dēļ, jo ziemā ir ļoti zemas temperatūras. Galvenokārt tiek izmantotas tehniski progresīvas saules kolektoru iekārtas karstā ūdens sagatavošanai, kuras ir prasmīgi jāuzstāda, un kuras var apvienot ar papildus karstā ūdens un apkures katlu. Saules enerģijas izmantošana siltumapgādes sistēmās it īpaši ir attīstījusies Dānijā un Zviedrijā. Tā kā abās valstīs siltumapgādes un karstā ūdens apgādes sistēmas ir jau izveidotas, tad saules enerģijas iekārtas tajās ir relatīvi viegli integrējamas. Ja sistēmas, kurās kā enerģijas avotu izmanto Sauli, ir projektētas, lai nosegtu tikai daļu no vasaras slodzes, tad tās var strādāt ar maksimālu jaudu arī bez lielas siltuma akumulācijas tvertnes (EREC, 2010).

Mūsdienu saules enerģijas kolektoru iekārtas galvenokārt tiek lietotas karstā ūdens sagatavošanai (mājas vajadzībām), telpu apsildei, izmantojot apsildāmās grīdās, peldbaseinu ūdens sildīšanai, kaltēšanai un dzesēšanai.

Kā Eiropā, jo īpaši Vācijā, tā arī citviet tehnoloģiski attīstītajā pasaules daļā, deviņdesmitajos gados radušās daudzas jaunas, nelielas kompānijas, kuras ne tikai ražo attiecīgās iekārtas, bet arī veic pētniecības darbu šajā nozarē (Zauers, 2004; Clement, 2005).

Latvijā saules starojumam ir samērā zema intensitāte. Kopējais saules enerģijas daudzums ir ap 1109 kWh m⁻² gadā, kas ir nedaudz vairāk nekā Skandināvijas valstīs. Saules siltuma enerģijas izmantošanas periods ir no aprīļa pēdējās dekādes, kad starojuma intensitāte ir ap 120 kWh m⁻², līdz septembra pirmajai dekādei. Šajā periodā, aptuveni 1800 stundas iespējams izmantot saules enerģiju siltā ūdens ražošanai, uzstādot saules enerģijas kolektorus (EA, 2006). Esošo tehnoloģiju izmaksas pakāpeniski samazinās, jo tās aizvieto jaunas, modernākas un pilnīgākas.

Promocijas darbā pētījumu virziens tiek vērsts saules starojuma enerģijas pārveidošanai siltumenerģijā, lai uzsildītu ūdeni dažādām saimnieciskām vajadzībām. Tāpat iegūto siltuma daudzumu var izmantot lauksaimniecības vajadzībām, piemēram, grīdu apsildei sivēnu atpūtas vietās. Saules iekārtu uzstādīšana, karstā ūdens sagatavošanai vai telpu apsildei, ir ekonomiski izdevīga īpaši tad, kad ir nepieciešama esošās siltumapgādes sistēmas atjaunošana. Plānotā saules iekārtas slodzes daļa, attiecībā pret papildus apsildes sistēmu, ir mainīga atkarībā no gadalaika. Papildus siltuma avota slodzes daļa parasti tiek nosepta, darbinot apkures katlu, kā kurināmo izmantojot gāzi, koksni, šķidro kurināmo vai elektrību.

PĒTĪJUMU OBJEKTS, HIPOTĒZE, MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Pētījumu objekts – saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem, tā ģeometrisko un tehnisko parametru pamatošana iespējami lielāka siltuma daudzuma ieguvei.

Pētījumu hipotēze – aprīkojot plakano saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem un Saulei sekošanas sistēmu, var iegūt ievērojami lielāku siltumenerģijas daudzumu.

Pētījumu mērķis – pamatot, izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt saules enerģijas kolektora konstrukciju, kurā izmantoti atstarotāji, lai paaugstinātu uz absorberi krītošā saules starojuma intensitāti un nodrošināta tā sekošana saules virzienam.

Pētījumu uzdevumi

1. Izstrādāt teorētisko pamatojumu pilnveidotam saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem.
2. Izvērtēt saules enerģijas kolektoru konstruktīvus risinājumus un ģeometriskos parametrus, kuri nodrošina to darba maksimālu efektivitāti.

3. Izpētīt un analizēt saules enerģijas kolektoru pagriešanas mehānismus, kuri nodrošina sekošanu Saulei, un izvēlēties ekonomiski izdevīgāko variantu.
4. Izstrādāt pilnveidotā saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem matemātisko modeli, ar kuru var aprēķināt šī kolektora saražotā siltuma daudzumu, izmantojot *Matlab-Simulink* datorprogrammu, veikt kolektora galveno konstruktīvo un siltumtehnisko lielumu skaitlisko vērtību aprēķinus.
5. Izgatavot pilnveidoto saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem, izstrādāt tā eksperimentālo pētījumu metodiku un veikt kolektora eksperimentālās pārbaudes laboratorijas un lauka apstākļos.
6. Noteikt pilnveidota saules enerģijas kolektora ekonomisko efektivitāti salīdzinājumā ar citu veidu kolektoriem un siltuma avotiem.

PĒTĪJUMU METODES

Promocijas darba mērķa sasniegšanai izmantotas analīzes, sintēzes, diferenciālvienādojumu risināšanas, eksperimentēšanas (laboratorijas un lauka apstākļos), statistiskās un ekonomiskās novērtēšanas **pētījumu metodes**, kā arī matemātiskā modelēšana datorprogrammā *Matlab-Simulink*.

Eksperimentos izmantotas Latvijas Lauksaimniecības universitātes aģentūras Lauksaimniecības tehnikas zinātniskā institūta (LIZI) laboratorijas, tehniskā bāze un laboratorijas iekārtas. Mērīšanai tika izmantoti licencēti mērinstrumenti. Tika veikts nepieciešamo mērījumu atkārtojumu skaits, lai nodrošinātu pietiekošu mērījumu rezultātu precizitāti un ticamību. Rezultātu novērtēšanai tika izmantota statistiskās datu apstrādes programma *MS Excel*.

AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES

1. Saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem ir efektīvāks par cita veida saules enerģijas kolektoriem.
2. Iekārtas saulei sekošanas mehānismam nav nepieciešama nepārtraukta darbība.
3. Izstrādātais matemātiskais modelis dod iespēju prognozēt no saules enerģijas kolektora iegūstamo siltuma daudzumu.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Publikācijas vispāratzītos recenzējamos izdevumos

1. Kancevica, Liene, Putans, Henriks, Ziemelis, Imants. The tracking system for solar collectors with reflectors, **In:** Rivza, Peteris (eds). *Proceedings of the Third International Scientific Conference: RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY*. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2012. p. 189-195. ISBN 978-9984-48-070-1.
2. Kancevica L., Aboltins A. Substantiation for construction of solar collector with reflectors. **In:** Osadcuks, Vitalijs (eds). *10th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2011. - Vol.10, p. 326-329. ISSN 1691-5976.
3. Kancevica, Liene, Aboltins, Aivars. ANALYTICAL ASPECTS FOR CONSTRUCTION OF SOLAR COLLECTOR WITH REFLECTORS. **In:** Dr. Goran, Topisirovic (eds). *Scientific journal: AGRICULTURAL ENGINEERING. No. 4*. Belgrade, Zemun: University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Institute of Agricultural Engineering, December, 2011. p. 21-27. ISSN 0554-5587.
4. Kanceviča L., Putans H. Energy produced by solar battery and perspectives of it's usage in Latvia. *Vide. Tehnoloģija. Resursi: VIII starptautiskās zinātniski praktiskās konferences materiāli*, Rēzekne: Rēzeknes Augstskola, Inženieru fakultāte, 2011. - 1.sēj., 205.-212.lpp. ISSN 1691-5402, ISBN 978-9984-44-070-5.
5. Pelece, Ilze, Putans, Henriks, Zagorska, Viktorija, Kancevica, Liene, Ziemelis, Imants. PECULIARITIES OF DOMESTIC WATER HEATING BY SOLAR COLLECTORS. **In:** Osadcuks, Vitalijs (eds). *9th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2010. p. 205-210. ISSN 1691-5976.
6. Ziemelis, I., Putans, H. and Kancevica, L. INVESTIGATION OF SOLAR COLLECTOR IRRADIATED FROM BOTH SIDES. *Agronomy Research: BIOSYSTEMS ENGINEERING*. Volume 8. Estonia: Tartu, 2010. p. 280-286. ISSN 1406-894X.
7. Ziemelis I., Kanceviča L., Putans H. Efficiency of energy produced by different types of solar collectors. *6th Research and Development Conference of CEE AGENG*. Lithuania: Raundondvaris, 2009. p.191-197. ISBN 978-9986-732-50-1.
8. Ziemelis, Imants, Kancevica, Liene, Jesko, Zanis, Putans, Henriks. CALCULATION OF ENERGY PRODUCED BY SOLAR COLLECTORS. **In:** Nulle, Imants (eds). *8th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2009. p. 212-218. ISSN 1691-5739.
9. Ziemelis, Imants, Jesko, Zanis, Kancevica, Liene, Iljins, Uldis. Development of Solar Collectors with Reflectors. **In:** Deltuvas, Romualdas

- (eds). *Proceedings of the Third International Conference: RURAL DEVELOPMENT 2007*. Kaunas: Lithuanian University of Agriculture, 2007. p. 322-327. ISSN 1822-3230.
10. Ziemelis I., Kancevica L., Ziemelis E., Jesko Z. Comparative studies of varied flat plate solar collector structures. **In:** Kucinskas, Vytautas (eds). *Proceedings of the International Conference: TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PROGRESS IN AGRICULTURE. No. 12*. Lithuania: Raundondvaris, 2007. p. 174-177. ISSN 1822-2706.
 11. Kancevica L., Ziemelis I., Kristapsons M. POSSIBILITIES OF WATER HEATING BY SOLAR ENERGY IN LATVIA. **In:** Melnychuk D.A. (eds). *Proceedings of 5th Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering*. Kiev: National Agricultural University of Ukraine, 2007. p. 96-102. ISBN 966-8302-16-08.
 12. Kancevica, Liene, Navickas, Juozas, Ziemelis, Imants, Putans, Aldis. ANALYZE OF METERELOGICAL DATA FOR DEVELOPMENT OF SOLAR COLLECTORS. **In:** Smigins, Ruslans (eds). *6th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2007. p. 24-28. ISSN 1691-3043.
 13. Jesko, Zanis, Kancevica, Liene, Ziemelis, Imants. COMPRISON OF SOLAR COLLECTORS AND CONVENTIONAL TECHNOLOGIES USED FOR WATER HEATING IN LATVIA. **In:** Smigins, Ruslans (eds). *6th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2007. p. 35-40. ISSN 1691-3043.
 14. Канцевича Л.А., Зиемелис И.Ф., Кристапсонс М.Ж. К развитию плоских солнечных коллекторов. **В кн.:** Лачуга Ю.Ф. (сост.). *5-я международная научно-практическая конференция: Экология и сельскохозяйственная техника. Том 3*. Россия, Санкт-Петербург: ГНУ СЗНИИМЭСХ, 2007. С. 281-286. ISBN 978-5-88890-042-0.
 15. Kanceviča, Liene. Investigation on water heating by solar radiation. Pētījums par ūdens sildīšanu ar saules radiāciju. **Grām.:** Vīksna, Artūrs (proj. vad.). *International conference: EcoBalt' 2007*. Rīga: Intego Plus, 2007. p. 26-29. ISSN 1691-4112.
 16. Kancevica, Liene¹, Navickas, Juozas², Ziemelis, Eriks¹, Ziemelis, Imants¹. Increase of the Efficiency of Solar Collectors (¹Latvia University of Agriculture, ²Lithuanian University of Agriculture). **In:** Savilionis, Aleksandras (eds). *Proceedings of the Second International Scientific Conference: BIOMETRICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE: RESEARCH AND DEVELOPMENT*. Lithuania: Kaunas, 2006. p. 89-92. ISSN 1822-5977.
 17. Kancevica L., Jesko Z., Ziemelis I. Power of Solar Radiation on Different Orientated Surfaces. **In:** Gailums, Aleksandrs (eds). *Proceedings of the International Scientific Conference: Information Technologies for Rural Development*. Jelgava: LUA, 2006. p. 76-84. ISBN 9984-784-13-4.

18. Kancevica L., Ziemelis E., Ziemelis I., Skele A. Development of solar collectors. Усовершенствование солнечных коллекторов. **In:** Kucinskas V. (eds). *Proceedings of the International Conference: DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS IN ECOLOGICAL AND ENERGETIC ASPECTS. No. 11.* Lithuania: Raudondvaris, 2006. p. 287-291. ISSN 1822-2706.
19. Асп. Канцевича Л., д.т.н. Зиемелис И.Ф., д.б.н. Кристапсонс М.Ж. СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР С ОТРАЖАТЕЛЕМ. **В кн.:** Молоснов Н.Ф. (сост.). *5-я Международная научно – техническая конференция: ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ.* Москва: ГНУ ВИЭХ, 2006. С. 155-161. ISSN 0131-5277.
20. Kanceviča, Liene. Acquisition of Some Meteorological Parameters for The Development of Solar Collectors. **In:** Markevica, Ausma (eds). *Proceedings of the International Scientific Conference: RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT 2006.* – Latvia, Jelgava, 2006. p. 31-36. ISBN 9984-784-14-2.
21. Kancevica, Liene, Putans, Henriks, Putans, Aldis, Ziemelis, Imants. ANALYSIS OF METEREOLOGICAL PARAMETERS FOR DEVELOPMENT OF SOLAR COLLECTORS. **In:** Palabinskis, Janis (eds). *5th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.* Jelgava: Faculty of Engineering, 2006. p. 177-181. ISSN 1691-3043.
22. Kancevica, Liene, Putans, Henriks, Ziemelis, Imants. MIRROR-COLLECTOR FOR SOLAR WATER HEATING. **In:** Palabinskis, Janis (eds). *5th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.* Jelgava: Faculty of Engineering, 2006. p. 181-186. ISSN 1691-3043.
23. Kanceviča, Liene, Ziemelis, Imants. Saules starojums – ekoloģiski tīrs enerģijas avots. **Grām.:** Vīksna, Artūrs (proj. vad.). *International conference: EcoBalt' 2006.* Rīga: Intego Plus, 2006. 151.-152. lpp.
24. Ziemelis I., Kancevica L., Putans H. Rational water heating by solar energy. **In:** Deltuvas R. (eds). *The second international scientific conference: RURAL DEVELOPMENT 2005: Globalisation and integration challenges to the rural of east and central Europe.* Lithuania: Kaunas, 2005. p. 51-53. ISSN 1822-3230.

Patenti

1. Putāns H., Ziemelis I., Zagorska V., Kanceviča L.. Saules enerģijas kolektora vadības ierīce, kas nodrošina tā sekošanu saulei. Latvijas patents LV 14611 B. F24J2/00, 20.11.2012. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 11, 2012.
2. Putāns H., Zagorska V., Ziemelis I., Kanceviča L., Jesko Ž. Mobilā meteoroloģisko datu reģistrēšanas ierīce. Latvijas patents LV 14312 B.

- G01W1/00, 20.04.2011. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 1, 2011.
3. Ziemeļis I., Kanceviča L., Ziemeļis Ē., Jesko Ž. Saules enerģijas plakanais kolektors ar šūnveida polikarbonāta absorberi. Latvijas patents LV 13696 B. F24J2/42, 20.09.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 9, 2008.
 4. Putāns H., Ziemeļis I., Kanceviča L. Saules enerģijas kolektors ar divdaļīgu absorberi. Latvijas patents LV 13711 B. F24J2/42, 20.06.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 6, 2008.
 5. Putāns H., Ziemeļis I., Kanceviča L., Putāns A. Saulei sekojoša enerģijas kolektorierīce ar atstarotājiem. Latvijas patents LV 13713 B. F24J2/42, 20.06.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 6, 2008.
 6. Kanceviča L., Putāns H., Ziemeļis I., Putāns A., Jesko Ž. Saules enerģijas kolektorierīce ar atstarotājiem. Latvijas patents LV 13549 B. F24J2/42, 20.05.2007. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 5, 2007.
 7. Ziemeļis I., Kanceviča L., Jesko Ž., Ziemeļis Ē., Putāns A. Saules enerģijas plakanā kolektora absorbers ar kanāliem. Latvijas patents LV 13516 B. F24J2/04, 20.03.2007. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 3, 2007.
 8. Putāns H., Ziemeļis I., Viesturs D., Kanceviča L., Putāns A., Ziemeļis Ē. Plakana saules enerģijas kolektorierīce. Latvijas patents LV 13371 B. F24J2/02, 20.01.2006. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 1, 2006.

Uzstāšanās starptautiskās zinātniskās konferencēs ar ziņojumiem

1. The tracking system for solar collectors with reflectors. *Third International Scientific Conference: RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY*. Jelgava: Latvia University of Agriculture, May 28th-30th, 2012.
2. Substantiation for construction of solar collector with reflectors. *10th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Jelgava, Latvia University of Agriculture, May 26th - 27th, 2011.
3. Energy produced by solar battery and perspectives of it's usage in Latvia. *Vide. Tehnoloģija. Resursi: VIII starptautiskās zinātniski praktiskās konference*, Rēzekne, Rēzeknes Augstskola. Inženieru fakultāte, Latvijas ilgtspējīgās attīstības pētnieciskais institūts, 2011.gada 20.-22. jūnijs.
4. Investigation of Solar Collector Irradiated from Both Sides, Biosystems Engineering 2010. Tartu, Estonia, 13th -24th May 2010.
5. Analyze of Meteorological Data for Development of Solar Collectors. *6th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL*

- DEVELOPMENT*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 24th -25th, 2007.
6. К развитию плоских солнечных коллекторов. 5-я международная научно-практическая конференция *Экология и сельскохозяйственная техника*. Россия, Санкт-Петербург. 15-16 мая, 2007.
 7. Investigation on water heating by solar radiation. Pētījums par ūdens sildīšanu ar saules radiāciju. International conference *ECOBALT 2007*. Latvia, Riga. May 10th -11th, 2007.
 8. Increase of the Efficiency of Solar Collectors. Second International Scientific Conference *BIOMETRICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE: RESEARCH AND DEVELOPMENT*. Lithuania, Kaunas, Lithuanian University of Agriculture. November 24th -25th, 2006.
 9. Development of solar collectors. Усовершенствование солнечных коллекторов. International Conference *DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS IN ECOLOGICAL AND ENERGETIC ASPECTS. No. 11*. Lithuania, Raudondvaris. September 14th -15th, 2006.
 10. Acquisition of some meteorological parameters for the development of solar collectors. International Scientific Conference *RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT 2006*. Latvia University of Agriculture, Department of Post – Graduate Studies. May 19th -22th, 2006.
 11. Analyze of meteorological parameters for development of solar collectors. 5th International Scientific Conference *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 18th -19th, 2006.
 12. Mirror-collector for solar water heating. 5th International Scientific Conference *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 18th -19th, 2006.
 13. Солнечный коллектор с отражателем. Труды 5-ой Международной научно-технической конференции *Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве*. Москва, ГНУ ВИЭСХБ. 16-17 мая, 2006.
 14. Saules starojums – ekoloģiski tīrs enerģijas avots. International conference *ECOBALT 2006*. Latvia, Riga. May 11th -12th, 2006.
 15. Rational water heating by solar energy. The Second International Scientific Conference *Rural Development 2005*. Lithuania, Kaunas, Lithuanian University of Agriculture. November 17th -19th, 2005.

Dalība ar promocijas darbu saistītos projektos

1. 2011.-2013.g. – asistente LZP projektā Nr. 09.1049 „Laukopības tehnikas atbilstības pētījumi un efektīvas izmantošanas metožu un funkcionēšanas modeļu izstrāde konvencionālajai un ekoloģiskajai saimniekošanai”.

2. 2009.-2012.g. – pētniece ESF projektā „Cilvēkresursu piesaiste atjaunojamo enerģijas avotu pētījumiem”.
Līguma Nr. 2009/0225/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/129.
3. 2007.g. – eksperts ESF projektā „Inženierzinātņu studiju satura modernizācija Latvijas Lauksaimniecības universitātē”. Līguma Nr. 2005/0124/VPD/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2./0066/00.7.

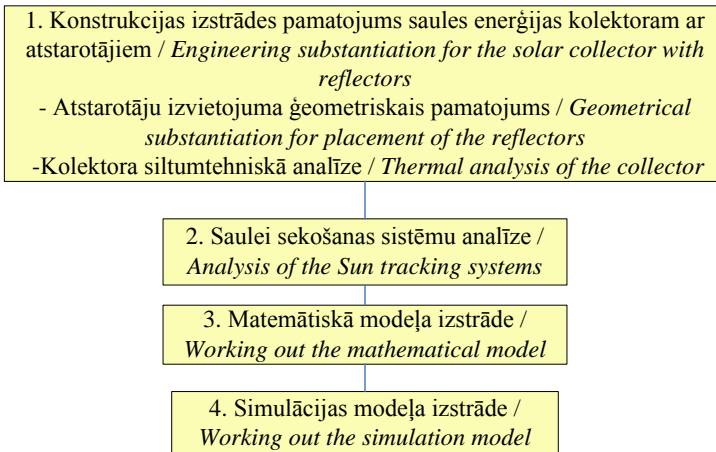
DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN PRAKTISKĀS IZMANTOŠANAS IESPĒJAS

1. Izveidots oriģināls matemātiskais modelis, kas piemērots no saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem iegūstamā siltuma daudzuma noteikšanai.
2. Izstrādāta eksperimentālo pētījumu metodika saules enerģijas kolektoru parametru noteikšanai uz kolektoru izmēģināšanas stenda. Metodikas ietvaros veikta kolektora iekārtas aprobācija.
3. Teorētiski un eksperimentāli pamatota konstrukcija saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem.
4. Noteiktas kolektora siltumnesēja ieejošās un izejošās temperatūru starpības izmaiņas atkarībā no apstarojuma intensitātes un apstarošanas laika.
5. Teorētiski un eksperimentāli noteiktas iegūstamā siltuma daudzuma izmaiņas atkarībā no āra gaisa temperatūras un uztvertā saules starojuma.
6. Eksperimentos pierādīts, ka ar saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem iespējams iegūt lielāku siltuma daudzumu, salīdzinot ar cita veida kolektoriem.
7. Izveidoti matemātiskie modeļi, kas ļauj novērtēt saules enerģijas kolektoru ekspluatācijas izmaksas un ieguldījumu atmaksāšanās laiku, aprēķināt kolektoru izgatavošanas pašizmaksu un noteikt 1 kWh izmaksas.

1. TEORĒTISKIE PĒTĪJUMI

Darba teorētiskie pētījumi izriet no promocijas darba pirmajā nodaļā noteiktajiem uzdevumiem, ticis izstrādāts teorētiskais pamatojums saulei sekojošam saules enerģijas kolektoram, kuram uz absorberi krītošā saules starojuma intensitātes paaugstināšanai tiek izmantoti atstarotāji, izvērtēti saules enerģijas kolektoru ģeometriskie parametri, kas nodrošina to darba maksimālu efektivitāti, pētīti un analizēti saules enerģijas kolektoru saulei sekošanas sistēmu veidi, izvēloties ekonomiski izdevīgāko variantu, kā arī izstrādāts saulei sekojoša saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem matemātiskais modelis šā kolektora saražotā siltuma daudzuma aprēķinam.

Darba gaitā risinātie teorētiskie pētījumi iedalīti četrās apakšnodaļās, kā parādīts 1.1. attēlā.



1.1. att. Teorētisko pētījumu iedalījums

Fig. 1.1. Classification of the theoretical research

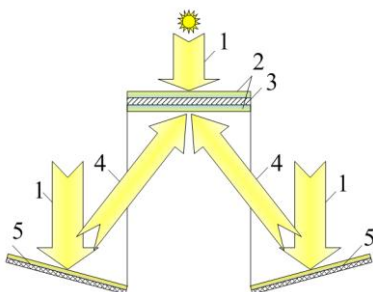
Pirmajā apakšnodaļā tiek pamatota saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem izstrāde, noteikts atstarotāju novietojums, pagriešanas leņķis, ņemot vērā absorbera un atstarotāju izmērus, kā arī analizēti parametri, kurus šie lielumi ietekmē. Tiek veikta siltumtehnikā analīze, teorētiski nosakot pētāmā saules enerģijas kolektora pārseguma parametru atkarību no staru krišanas leņķa, saules enerģijas kolektora absorbēto saules enerģiju, noteikti siltuma zudumi, kas rodas pētāmā iekārtai. Otrā apakšnodaļā satur saules enerģijas iekārtu sekošanas veidu analīzi, nosakot teorētiski iespējamo uztverto saules starojuma intensitāti izskatāmajiem veidiem. Un trešajā apakšnodaļā izstrādāts matemātiskais modelis saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem, kā arī matemātiskais modelis abpusēji apstarojamam saules enerģijas kolektoram. Balstoties uz iegūtajiem matemātiskiem modeļiem, ceturtajā apakšnodaļā tiek izstrādāti simulācijas

modeļi saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem un abpusēji apstarojamam saules enerģijas kolektoram programmā *Matlab-Simulink*.

1.1. Konstruktijas izstrādes pamatojums saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem

Viens no pētījumu uzdevumiem ir radīt pietiekoši efektīvu ūdens solārās sildīšanas kolektora konstrukciju, risinājums saules enerģijas kolektora lietderības paaugstināšanai – apstarot absorbera plāksni no abām pusēm, tas ir konstruēt saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem. Tādā gadījumā nav vajadzīga siltuma izolācija, bet saules enerģijas kolektoru veido no korpusa (kastes), kurā ievietots kārbveida absorbers ar siltummaini, un kuru no abām pusēm noslēdz ar caurspīdīga materiāla plāksni, piemēram, stiklu.

Abpusēji apstarojamam saules enerģijas kolektoram saules starojuma enerģiju var pievadīt koncentrētā veidā, piemēram, apstarojot kārbveida absorbera abas puses: frontālo ar tiešo starojumu, bet absorbera apstarošanai no tā otras puses izmantojot saules enerģijas kolektora aizmugurē novietotos atstarotājus (spoguļus). Iekārtas principiālā shēma redzama 1.2. attēlā.



1.2. att. **Principiālā shēma saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem**

Fig. 1.2. Principal scheme of solar collector with reflectors:

- 1 – krītošie saules stari / falling sun rays;
- 2 – stiklojums / collector cover (glass);
- 3 – kārbveida absorbers / box type absorber;
- 4 – atstarotie saules stari / reflected sun rays;
- 5 – atstarotāji / reflectors

Nolūkā pamatot saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem konstrukcijas izveidošanu, tika izvērtēts atstarotāju un kolektora ģeometriskais izvietojums, noteikti atstarotāju pagriešanas leņķi:

$$\beta_{a1} = \arcsin \frac{a}{2d}, \quad (1.1)$$

un

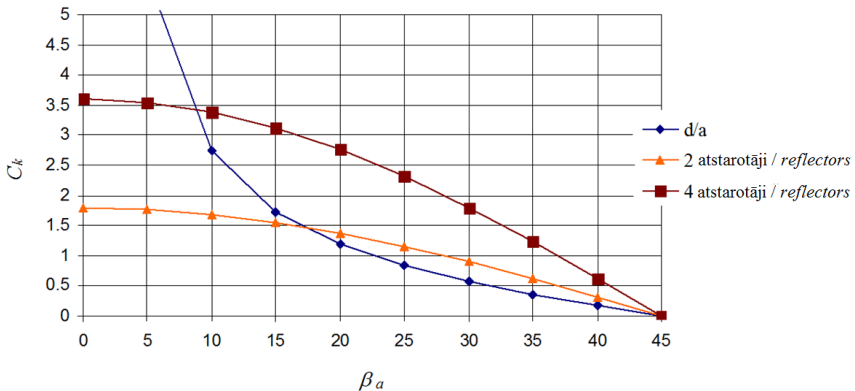
$$\beta_{a2} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{a}{d}. \quad (1.2)$$

No atrastajām sakarībām (1.1) un (1.2) izriet, ka labās un kreisās puses atstarotāju novietošanas leņķa lielumi ir atkarīgi no kolektora absorbera platuma a un novietošanas attāluma d . Lielumi a un d ir nosacītie absorbera un atstarotāja platumus un attālums. Ja abi ir vienādi, pagriešanas leņķis labajam atstarotājam $\beta_{a2}=22.5^\circ$ un kreisajam atstarotājam $\beta_{a1}=30^\circ$. Kā redzams labās un kreisās puses atstarotāju pagriešanas leņķi nav vienādi. Tas izskaidrojams ar to, ka β_{a1} – maksimālais iespējamais pagriešanās leņķis un β_{a2} – minimālais pieļaujamais pagriešanas leņķis. Gadījumam, kad abi atstarotāji pagriezti pret abpusēji apstarojamo saules enerģijas kolektoru vienādā leņķī (skat. 1.2.att.), apzīmējot enerģijas kolektora absorbera platumu ar a_k , un atstarotāju platumus ar $a_{a1}=a_{a2}=a_a$, bet atstarotāju pagriešanas leņķi – ar β_a , izmantojot ģeometriskās sakarības, izteikta viena atstarotāja platuma attiecība pret absorbera platumu:

$$\frac{a_a}{a_k} = \frac{\cos 2\beta_a}{\cos \beta_a}. \quad (1.3)$$

Svarīgs nosacījums vienādojumam (1.3), lai atstarojošās virsmas garums nekad nepārsniedz lineāro uztvērēja (absorbera) platumu, tas ir $a_a \cdot a_k^{-1} \leq 1$. Tas nodrošina efektīvāko atstarojošo virsmu laukumu izmantošanu.

Darbā izteikta koncentrācijas pakāpe. Tās noteikšanai tiek ņemts vērā koncentratoru vai atstarotāju atstarošanās koeficients – ρ_{at} , kas ir atkarīgs no atstarotāju spektrālās atstarošanās spējas (Стребков, Тверьянович, 2007; Chaves, 2008). Aprēķinu rezultāti apkopoti vienotā grafikā (1.3.att.), kur redzama koncentrācijas pakāpes atkarība no atstarotāju skaita, atbilstoši 2 atstarotājiem un 4 atstarotājiem. Aprēķinos pieņemts, ka $\rho_{at}=0.9$.



1.3. att. Raksturlielumi saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem

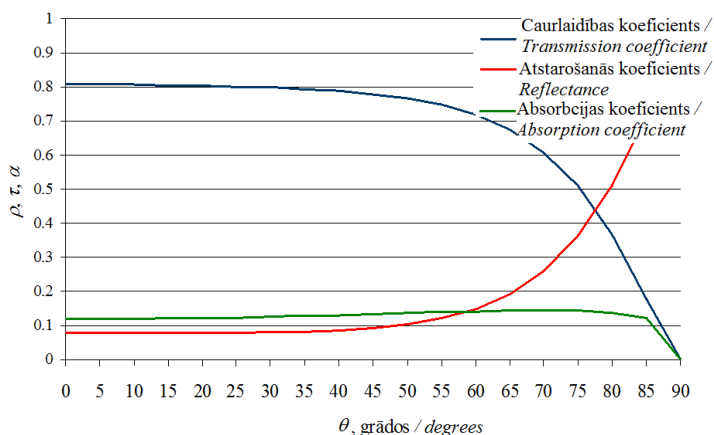
Fig. 1.3. The characteristics of the solar collector with reflectors:

C_k – atstarotāju koncentrācijas pakāpe / concentration ratio of reflectors; β_a – atstarotāju pagriešanas leņķis / rotation angle of the reflectors; d/a – atstarotāju novietošanas attāluma un saules enerģijas kolektora platuma attiecība / the ratio between the distance of the reflector and the width of the solar collector

1.3. attēlā parādīta arī attāluma d atkarība no atstarotāju pagriešanas leņķa. No tā seko, ka dotajā gadījumā optimālais atstarotāju pagriešanas leņķis $\beta_a \approx 10-17^\circ$, kas nodrošina koncentrācijas pakāpi no 1.5 līdz 3.

Pamatojoties uz veiktajiem pētījumiem un inženiertehniskiem aprēķiniem, tika saņemts Latvijas Republikas patents LV 13711 B, iekārtas izgudrojumam saules enerģijas kolektors ar divdaļīgu absorberi (Putāns u.c., 2008). Dotā saules enerģijas kolektora absorbers izveidots no divām daļām, kuras viena attiecībā pret otru novietotas zem noteikta leņķa un to darba virsmas vērstas uz atstarotāju (spoguļu) pusi. Leņķis starp absorbera daļām izvēlēts tā, lai no spoguļiem atstarotie stari uz šo lokšņu virsmām kristu zem iespējami mazāka leņķa. Piemēram, ja uz katru pusi rindā novietoti trīs atstarotāji (spoguļi), tad leņķis izvēlēts tā, lai no otrā spoguļa stari atstarotos perpendikulāri uz attiecīgā absorbera loksnes virsmas. Gadījumā, kad atstarojošie elementi tiek stiprināti uz parabolas tipa pamatni, tādējādi tuvināti veidojot parabolocilindrisku virsmu, var tikt sasniegta daudz lielāka koncentrācijas pakāpe (Welford, Winston, 1989; O'Gallagher, 2008; Chaves, 2008).

Siltumtehnikā analīze balstīta uz saules enerģijas kolektora parametru izmaiņas pētījumiem atkarībā no staru krišanas leņķa. Aprēķināti atstarošanās ρ_p , absorbcijas α_p un caurlaidības τ_p koeficienti saules enerģijas kolektora pārsegumam (stiklam). No veiktajiem aprēķiniem izriet, ka stikla caurlaidības koeficients samazināsies, ja staru krišanas leņķis pret saules enerģijas kolektoru būs lielāks par 50° , arī atstarošanās koeficients pie šī leņķa strauji pieaugs. Bet, tā kā apskatāmajam saules enerģijas kolektoram tiks paredzēta sekošanas sistēma, tad, kā redzams no grafika (1.4.att.), apskatāmo lielumu izmaiņa ir nenozīmīga – līdz pat 10° .



1.4. att. Atstarošanās ρ_p absorbcijas α_p un caurlaidības τ_p koeficientu aprēķinu rezultāti

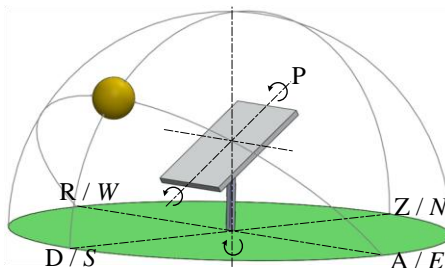
Fig. 1.4. The results of the calculations of reflectance ρ_p , absorption α_p and transmission τ_p coefficients

Lai precizētu caurlaidības koeficientu stiklam, kas tiks izmantots konkrētai iekārtai, tika veikti aprēķini atkarībā no staru krišanas leņķa ar soli 0.5° un noteikti vidējie lielumi.

Novērtēta saules enerģija, ko absorbē saules enerģijas kolektora absorbers. Saules starojuma enerģijai nokļūstot uz saules enerģijas kolektora darba virsmas, lielākā tās daļa tiek absorbēta kolektorā un tālāk tiek nodota saules enerģijas kolektorā plūstošam šķidrumam, ko arī sauc par izmantojamo enerģiju. Termālajās iekārtās jāņem vērā siltuma zudumi, kas atkarīgi no to individuālās uzbūves. Veicot šo zudumu analīzi, ņemta vērā siltumapmaiņa starp konstrukcijas elementiem, aprēķinātās siltuma zudumu koeficientu vērtības pie dažādām āra gaisa temperatūrām un vēja ātrumiem.

1.2. Saules enerģijas kolektoru pagriešanas sistēmas, kas nodrošina to sekošanu Saulei

Lai saules enerģijas kolektors dienas laikā saražotu pēc iespējas vairāk enerģijas, tam jābūt orientētam uz Sauli tā, lai saules stari kristu perpendikulāri uz tā darba virsmu, jo tad pie vienādiem pārējiem nosacījumiem, iekārtas lietderības koeficientam būs maksimālā vērtība. Uztveršanas sistēmas tiek iedalītas pēc to sekošanas veida – ap vienu asi (vienasu) un ap divām (divasu), kā parādīts 1.5. attēlā. Vienasu sekošanas sistēmas izmanto pie horizontāla novietojuma, izskatītas promocijas darbā – austrumu-rietumu (turpmāk AR_H), dienvidu-ziemeļu (turpmāk DZ_H), un paralēli zemeslodes asij, jeb polārai asij (turpmāk AR_P) (Duffie, Beckman, 2006; Стребков, Тверьянович, 2007; Kalogirou, 2009).



1.5. att. Divasu sekošanas sistēmas darbības principiālā shēma
Fig. 1.5. Principal scheme for full tracking system

Lai izvērtētu enerģijas daudzumu, ko uztver saulei sekojoša virsma, visos minētajos gadījumos tika izmantotas dažādas sakarības. Sekošanas sistēmu novērtēšanai, aprēķinu rezultāti doti 1.1. tabulā. Divasu sekošanas sistēma dienas laikā uztver maksimāli iespējamo saules starojuma enerģiju vasaras saulgriežu un ekvinokcijas laikā. AR_P sekošanas sistēma dod iespēju ekvinokcijas laikā uztvert maksimālo saules starojuma enerģiju, kas ir vienāda ar divasu sekošanas sistēmas uztverto, un vasaras saulgriežu laikā aptuveni par 8% mazāku starojuma enerģijas daudzumu salīdzinājumā ar divasu sekošanas sistēmu. Tas skaidrojams

ar to, ka saules enerģijas kolektora slīpums ir vienāds ar polāro asi, kas savukārt dotajā gadījumā ir vienāds ar vietas platuma grādu, un ekvinokcijas laikā, kad $\delta=0^\circ$, staru krišanas leņķis $\theta=0^\circ$.

1.1. tabula / Table 1.1

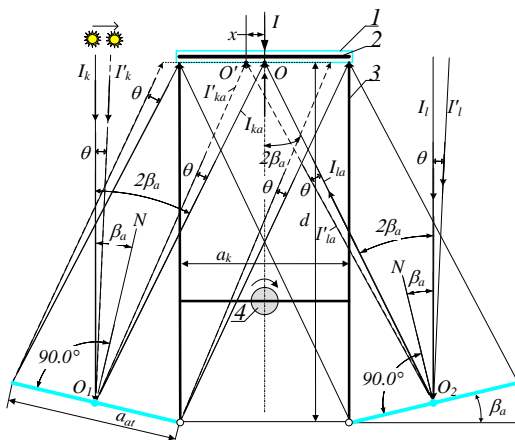
Sekošanas sistēmu uztvertā saules starojuma intensitāte
Comparison of solar energy received by various modes of tracking

Sekošanas sistēmas veids / Tracking mode	Procentuālais vērtējums attiecībā pret divasu sekošanas sistēmu / Percentage comparison to full tracking system	
	VS / SS	E / E
Divasu / Full tracking	100	100
AR_p / E-W polar	92	100
DZ_H / N-S horizontal	74	82
AR_H / E-W horizontal	91	68
VS – vasaras saulgrieži / SS – summer solstice; E – ekvinokcija / E - equinoxes		

Analizējot apkopotos rezultātus, priekšroku varētu dot AR_p vienasu sekošanas sistēmai, jo iegūtie rezultāti procentuāli ir tuvāki divasu sekošanas sistēmai salīdzinājumā ar pārējām vienasu sekošanas sistēmām.

1.3. Kolektora matemātiskā un simulācijas modeļu izstrāde

Lai pamatotu saules enerģijas kolektora lietderīgumu, veikti aprēķini plānotajam siltuma daudzumam, ko spēs saražot šī iekārta. Pieņemot, ka saules enerģijas kolektora pagriešanas mehānisms 4 (1.6.att.) darbosies ar pārtraukumiem, analizēti saules stara krišanas leņķi.



1.6. att. Darbības principiālā shēma saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem

Fig. 1.6. Principal scheme of the operations for solar collector with reflectors:
 1 – abpusēji apstarojams saules enerģijas kolektors / solar energy collector irradiated from both sides; 2 – absorbers / absorber; 3 – iekārtas rāmis / frame; 4 – pagriešanas mehānisms / the rotation mechanism

Gadījumā, kad saules enerģijas kolektora absorbers ir perpendikulārs saules stariem un $\theta=0^\circ$, saules starojums, kas nonāk uz atstarojošo virsmu kā lielums I_k (kreisās puses atstarotājam) un I_l (labās) punktos O_1 un O_2 , atstarojas un nonāk līdz saules enerģijas kolektoram kā lielumi I_{ka} un I_{la} punktā O . Saule, pēc kāda laika nonākot otrā pozīcijā, kad I'_k kļūst kā lielums I'_{ka} un I'_l kā I'_{la} punktā O' , saules staru krišanas leņķis mainīsies, tādējādi attēlā tiek parādīts leņķis θ .

Ņemot vērā sakarības, kas nosaka saules starojuma intensitāti, kura nonāk uz kolektora darba virsmu, kā arī aplūkotos siltumtehnikos parametrus un tos ietekmējošos faktorus, izveidotais matemātiskais modelis siltuma daudzuma noteikšanai saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem ir sekojošs:

$$Q_k = 3.6 \cdot S_k \left[\frac{24}{\pi} I_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \cos \theta \tau_A^{m_A} (1.01 \cdot \tau_{p1} \alpha_a + 1.01 \cdot \tau_{p2} \alpha_a 2\rho_{at} \cos 2\beta_a \cos 2\theta) - q_z (T_i - T_g) \right], \quad (1.4)$$

- kur Q_k – siltuma daudzums, ko uzkrāj saules enerģijas kolektors, J;
 S_k – saules enerģijas kolektora darba virsmas laukums, m²;
 τ_A – atmosfēras caurlaidības koeficients, relat.v.;
 θ – saules staru krišanas leņķis, grādos;
 I_{SC} – saules konstante, W m⁻²;
 n – gada dienas kārtas numurs, skaitot no 1. janvāra;
 τ_p – saules enerģijas kolektora pārseguma caurlaidības koef., relat. v.;
 q_z – enerģijas zudumu koeficients, W m⁻² K⁻¹;
 T_g – āra gaisa temperatūra, K;
 T_i – kolektorā ieklūstošā siltumnesēja temperatūra, K;
 m_A – atmosfēras masa, relat.v., kuras vērtība tiek noteikta atbilstoši gada dienai (ņemot vērā saulrieta un saullēkta laikus, jeb leņķus ω_{sr}):

$$m_A = \frac{1}{\frac{\omega_{sr} \pi}{180} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_{sr}}, \quad (1.5)$$

- kur ω_{sr} – saulrieta stundu leņķis, grādos;
 φ – vietas ģeogrāfiskais platums, grādos;
 δ – saules deklinācija, grādos vai radiānos.

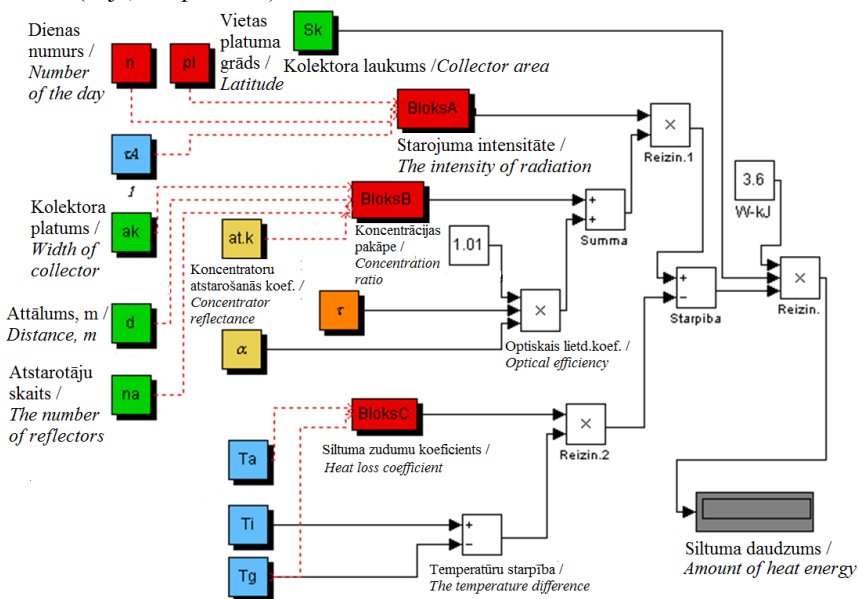
Abpusēji apstarojamā kolektora pētījumiem izmantojamais matemātiskais modelis:

$$Q_k = 3.6 \cdot S_k [2I_k \eta_{oT} - q_{zv} (T_{iv} - T_{gv})], \quad (1.6)$$

- kur η_o – kolektora optiskais lietderības koeficients, relat.v.,
kas izvērstā veidā izklāstīts promocijas darbā.

Teorētiskā siltuma daudzuma, ko iespējams iegūt no abpusēji apstarojamā saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem, noteikšanai tika izmantots simulācijas modelis. Modelis tika izstrādāts *Matlab-Simulink* programmā, izmantojot vienādojumu (1.4). Lai vienkāršotu simulācijas procesa aprakstu, simulācijas modelis tika sadalīts trijos blokos, kuri apzīmēti ar burtiem A, B un C.

1.7. attēlā parādīts bloku A, bloku B un bloku C apvienojums, tādējādi teorētiski parādot saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem iegūtā siltuma daudzuma noteikšanai simulācijas modeli, atbilstoši formulai (1.4). Simulācijas modeļa bloks A (skat. 1.7.att.) izvērtē koncentrācijas pakāpi, ievērojot atstarotāju pagriešanas leņķa atkarību no saules enerģijas kolektora parametriem. Par pamatu šim blokam tiek izmantotas sakarības β_a noteikšanai un C_k noteikšanai. Ievadot zināmos parametrus – vietas platumā grādu, dienas numuru, ar simulācijas bloka B palīdzību tiek noteikta saules starojuma intensitāte, ko dienas laikā uztver saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem. Simulācijas bloks C satur siltuma zuduma koeficienta noteikšanas shēmu, kurā izmantotas atrastās sakarības saules enerģijas kolektora korpusa siltuma zuduma koeficienta, kolektora absorbera virsmas pārklājuma siltuma zudumu un to ietekmējošo faktoru (vējš, temperatūra) koeficientu noteikšanai.



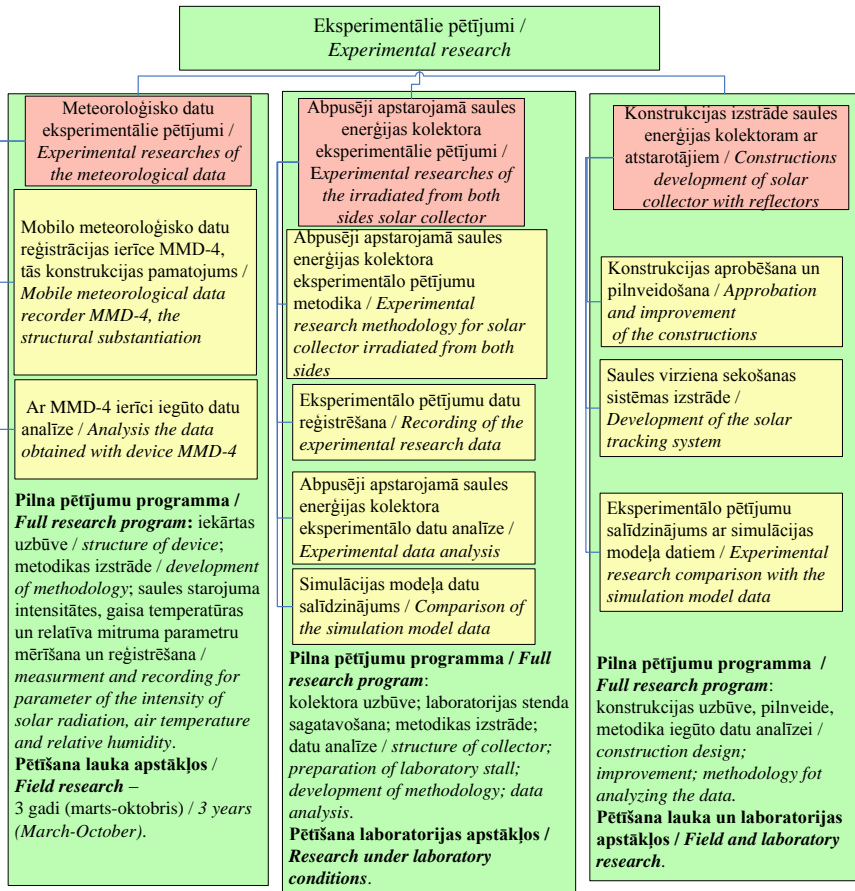
1.7. att. **Simulācijas modelis siltuma daudzuma noteikšanai**
 Fig. 1.7. **Simulation model for determination of the amount of heat**

No simulācijas modeļa iegūto datu apstrādes rezultātiem seko, ka ražīgākie mēneši ir, sākot no marta līdz oktobrim. Izmantojot iegūto sakarību (1.6) tika

izveidots simulācijas modelis abpusēji apstarotā saules enerģijas kolektora ražotā siltuma daudzuma aprēķinam.

2. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Eksperimentālo pētījumu mērķis ir noteikt saules starojuma intensitāti uz saulei sekojoša un stacionāri novietota kolektora darba virsmas, ar kuru palīdzību noteiksim atmosfēras caurlaidības koeficienta vidējās vērtības. Veikti eksperimentālie pētījumi abpusēji apstarojamam saules enerģijas kolektoram un iegūto datu analīze. Noteikti siltuma daudzumi pie dažādām starojuma intensitātēm. Iegūtie dati salīdzināti ar *Matlab-Simulink* programmā izstrādāto abpusēji apstarojamā saules enerģijas kolektora simulācijas modeļa datiem un aprēķināta relatīvā novirze.



2.1. att. Eksperimentālo pētījumu blokhēma
Fig. 2.1. Block diagram for experimental research

Eksperimentālo pētījumu nodaļa satur saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem konstrukcijas aprakstu. Konstrukcijas darbība pārbaudīta laboratorijas un lauka apstākļos. Iegūtie dati salīdzināti ar simulācijas modeļa datiem. Nodaļas uzbūve parādīta 2.1. attēlā.

2.1. Mobilā meteoroloģisko datu reģistrēšanas ierīce

Atmosfēras caurlaidības koeficientu un āra gaisa vidējo lielumu noteikšanai izmantota pārvietojama meteoroloģisko parametru reģistrēšanas ierīce MMD-4, kas paredzēta saules starojuma intensitātes, gaisa temperatūras un relatīva mitruma mērīšanai un reģistrēšanai. Izmantojot šo ierīci, ir iespējams noteikt saules enerģijas daudzumu, ko dienas laikā saņem saulei sekojošais un stacionāri novietotais saules enerģijas kolektors. Par šo ierīci kā izgudrojumu saņemts Latvijas Republikas patents LV 14312 B.

Trīs gadu laikā, no 2005.-2007. gadam no 1. marta līdz 1. novembrim (2005. gadā no 1. aprīļa līdz 1. novembrim), ar MMD-4 ierīci tika reģistrēti četri parametri: saules enerģijas intensitāte uz saulei sekojošas virsmas, saules enerģijas intensitāte stacionāri novietotai virsmai, āra gaisa temperatūra un relatīvais mitrums. No iegūto datu analīzes izriet, ka ar saulei sekojošu saules enerģijas kolektoru 8 mēnešu laikā (01.03.-31.10.) iespējams uztvert 1.4 reizes vairāk saules starojuma enerģijas salīdzinājumā ar stacionāri novietoto saules enerģijas kolektoru.

2.2. Abpusēji apstarojamā saules enerģijas kolektora eksperimentālie pētījumi

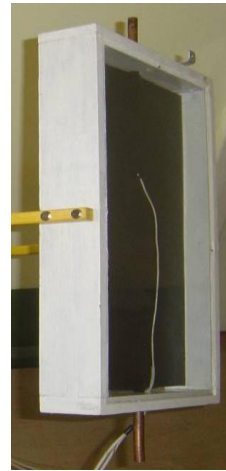
Eksperimentālo pētījumu veikšanai izstrādātā metodika paredzēta tāda saules enerģijas kolektora izmēģināšanai, kuram apstarojamas abas absorbera puses. Tā kā ar siltuma izolāciju pārklātai saules enerģijas kolektora pusei ir mazāki siltuma zudumi nekā pusei pārklātai ar stiklu, tad ir sagaidāms, ka sildot abpusēji apstarota kolektora abas puses ar vienādu starojuma intensitāti, netiks iegūts divas reizes vairāk enerģijas salīdzinot ar vienpusēju saules enerģijas kolektoru, kuram viena puse tiek sildīta ar divkārtu starojuma intensitāti, bet otra puse izolēta ar spoguļa plēvi, akmens vati un nosepta ar plāksni. Pētījuma mērķis ir noskaidrot, par cik vairāk enerģijas var iegūt no saules enerģijas kolektora absorbera virsmas, ja to apstaro no abām pusēm. Šie pētījumi tika veikti pie divām dažādām starojuma intensitātēm – 1000 W m^{-2} un 500 W m^{-2} (gadījumā ar siltuma izolāciju arī 2000 W m^{-2}). Vienlaicīgi paredzēts noskaidrot arī tādu saules enerģijas kolektora parametru, kā kolektora jaudas, absorbera vidējo temperatūru, saražotā siltuma enerģijas daudzuma, lietderības koeficienta u. c., dinamiku kolektora darbības laikā.

Kā pētījumu objektu paredzēts izmantot abpusēji apstarojamo saules enerģijas kolektoru (turpmāk – kolektors) (2.2.att). Kolektors sastāv no absorbera, kurš ievietots no koka dēļiem izgatavotā. kastē, kurai abas puses noseptas ar stikliem. Absorbers izgatavots no divām, pa perimetru saladētām

tērauda loksņēm, atstatumu starp kurām nodrošina vienā no loksņēm izveidotie distanceri, kas vienlaicīgi savieno un satur kopā abas loksnes.

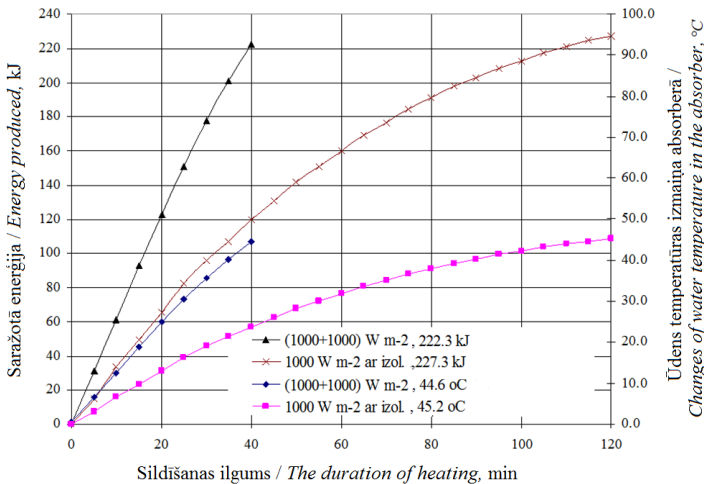
Eksperimentāli noteikti starojuma intensitātēm 500, 1000 un 2000 W m⁻² atbilstošie attālumi no sildītāja kvēldiega līdz absorbera virsmai. Lai iegūtu starojuma intensitātes sadalījumu pa absorbera virsmu vidēji 500 W m⁻² attālumam starp kvēldiegu un absorberi jābūt 550 mm, pie 1000 W m⁻² – 340 mm, bet pie 2000 W m⁻² – 345 mm.

Apstarošanas (sildīšanas) procesa gaitā, paaugstinoties siltumnesēja (ūdens) temperatūrai saules enerģijas kolektora kontūrā, palielinās temperatūra starp absorberi un apkārtējo gaisu ΔT_{ag} , un līdz ar to palielinās arī saules enerģijas kolektora siltuma zudumi, kā rezultātā samazinās laika vienībā saražotais kolektora siltuma daudzums, lietderības koeficients un jauda. Sildīšanas procesam turpinoties, ΔT_{ag} palielinās, līdz procesa beigās sasniedz savu stacionāro, dotam sildīšanas veidam un intensitātei atbilstošo maksimālo vērtību. Savukārt jaudas un lietderības koeficienta skaitliskās vērtības samazinās un procesa beigās, iestājoties stacionāram režīmam, to skaitliskām vērtībām jābūt vienādām ar 0.



2.2. att. **Abpusēji apstarojamā saules enerģijas kolektora kopskats**

Fig. 2.2 Overview of the solar collector irradiated from both sides



2.3. att. **Ūdens sasildīšanai par 45°C patērētais laiks un saražotā siltuma daudzuma izmaiņas, apstarojot saules enerģijas kolektoru ar 1000 W m⁻²**
Fig. 2.3. Time spent for the water heating by 45°C and changes of amount of heat, produced irradiating the solar collector with intensity 1000 W m⁻²

Darbā ir veikta datu analīze dažādu sildīšanas veidu īpatnībām, priekšrocībām un trūkumiem. Kā piemēru aplūkosim 2.3. attēlu. Dotajā gadījumā saules enerģijas kolektors tiek apstarots ar starojuma intensitāti 1000 W m^{-2} . Jāatzīmē, ka sildot saules enerģijas kolektora abas puses, salīdzinājumā ar variantu, kad tiek sildīta saules enerģijas kolektora viena puse (otrā pusē siltuma izolācija), ievērojami straujāk palielinās temperatūru starpība ΔT_{ag} . No abām pusēm apstarojamā saules enerģijas kolektora ūdens temperatūra uzsilst par 45°C 40 minūšu laikā, bet no vienas puses apstarojamā – 120 minūšu laikā. Līdz ar to, abpusēji apstarojamais saules enerģijas kolektors, noteikta ūdens daudzuma sasildīšanai par vienu un to pašu ΔT_{ag} , patērē mazāk enerģijas un tādā režīmā darbojās ar lielāku lietderības koeficientu. Tas dod iespēju, viena un tā paša tilpuma siltuma akumulatorā uzkrāt ievērojami lielāku siltuma daudzumu.

Iegūtie dati liecina par to, ka abpusēji apstarojamam saules enerģijas kolektoram, apstarojot abas puses ar vienādu starojuma intensitāti, kura summāri 2 reizes lielāka nekā klasiskam saules enerģijas kolektoram vienā pusē, temperatūras ΔT_{ag} un saražotā siltuma daudzuma pieaugums ir apmēram 1.65 reizes. Kā pozitīvs faktors jāatzīmē, ka konstrukcijas ziņā, abpusēji apstarojams saules enerģijas kolektors ir vienkāršāks nekā vienpusējs. Vienkāršs ir otras (aizmugures) puses apstarošanas veids – viens uz sauli un kolektora aizmuguri, zem noteikta leņķa novietots spogulis.

Salīdzinot eksperimentāli iegūtos datus abpusēji apstarojamam saules enerģijas kolektoram, ar simulācijas modeļa iegūtajiem datiem, tika noteiktas relatīvās modeļa kļūdas. To vērtības ir 4.7% (apstarojot ar 1000 W m^{-2}) un 4.2% (apstarojot ar 500 W m^{-2}), kas liecina par simulācijas modeļa precizitāti.

2.3. Konstrukcijas izstrāde saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem

Pamatojoties uz teorētiskajiem pētījumiem tika izstrādāts saules kustībai sekojošais saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem, kas tika nosaukts par plakano saules enerģijas kolektoriekārtu un par to saņemts Latvijas Republikas patents LV 13371 B (2.4.att.) Lai novērstu iekārtas sānsveri, kas konstatēta aprobācijas laikā, tika izstrādāta nedaudz sarežģītāka saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem konstrukcija, par ko saņemts Latvijas Republikas patents LV 13549 B. Dotās iekārtas konstruktīvais izpildījums aprakstīts promocijas darbā. Līdzīgi kā kolektoriekārta ar sānsveri (skat. 2.4.att.), saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem bez sānsveres tika uzlabots, lai saules enerģijas kolektora zenīta



2.4. att. Plakana saules enerģijas kolektoriekārta LV 13371 B aprobācija
Fig. 2.4. Solar energy collector (patent LV 13371 B)

leņķis būtu maināms atkarībā no saules deklinācijas leņķa. Konstrukcija tika pilnveidota, nosaukta par saulei sekojošo enerģijas kolektorierīci ar atstarotājiem, par to ir saņemts Latvijas Republikas patents LV 13713 B.

Balstoties uz teorētiskajā daļā veiktajiem aprēķiniem un pētījumiem izstrādāta saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem automatiskā saulei sekošanas sistēma. Darbā ir parādīta sistēmas funkcionālā shēma un aprakstīts tās darbības princips. Par saules enerģijas kolektora vadības ierīci, kas nodrošina tā sekošanu saulei saņemts Latvijas Republikas patents LV 14611 B.

Lai noteiktu simulācijas modeļa precizitāti, 2011. gada maijā tika veikti saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem eksperimentālie pētījumi lauka apstākļos. Saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem tika novietots uz LTZI ēkas jumta. 2.1. tabulā parādīti 5 dienu laikā iegūtie dati, kas salīdzināti ar simulācijas modeļa datiem šīm dienām. Eksperimentu veikšanas izvēlētajās dienās nebija lietainas. 12. maijs bija bez mākoņiem, salīdzinājumā ar pārējām, arī gaisa vidējā temperatūra, kā izriet no tabulas datiem bija maksimālā. Maksimālā gaisa temperatūra piecu dienu laikā bija 24°C.

2.1. tabula / Table 2.1.

Saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem pētījumu rezultāti lauka apstākļos

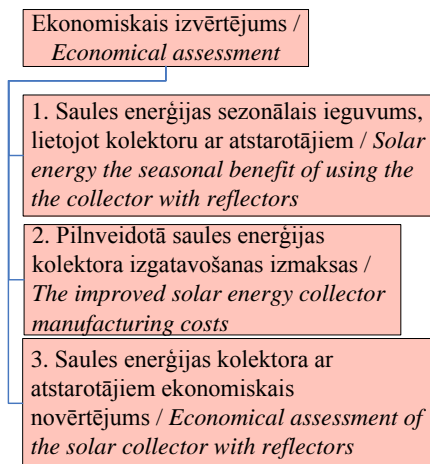
Field research results of the solar collector with reflectors

Datums / Date	ΔT_{ag} max, °C	Saražotais Q / Produced Q , kJ	Gaisa t_{vid} / Air t_{av} , °C	Gaisa t_{max} / Air t_{max} , °C	Teorētiski noteiktais Q / Theoretically determined Q , kJ	Relat. kļūda / Relat. error, %
11.05.11.	71	519.2	16.5	19.0	503.3	3.06
12.05.11.	74	532.4	20.5	24.0	504.9	6.01
18.05.11.	68	498.4	12.7	15.0	513.6	3.05
19.05.11.	72	529.6	17.8	22.0	514.9	4.23
20.05.11.	70	526.3	16.1	19.0	516.1	3.41
Vidējās vērtības / The average values	71	521.2	16.7	19.8	510.6	4.00

Kā izriet no 2.1. tabulas relatīvo kļūdu vērtības svārstās no 3.05-6.01%, vidējā vērtība ir 4%, kas liecina par simulācijas modeļa precizitāti. Saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem salīdzināšanai ar no vienas puses apstarojamo plakano saules enerģijas kolektoru, tika izmantots aprakstītais simulācijas modelis. No iegūtajiem rezultātiem izriet, ka lietojot saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem un apstarojot to ar starojuma intensitāti 1000 W m⁻², iespējams iegūt 2.89 reizes lielāku siltuma daudzumu salīdzinot ar plakano saules enerģijas kolektoru.

3. EKONOMISKAIS IZVĒRTĒJUMS

Ekonomiskā izvērtējuma veikšanai, tika noteikts saules enerģijas sezonālais ieguvums, lietojot saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem, dotā kolektora izgatavošanas izmaksas, veikts ekonomiskais salīdzinājums ar cita veida resursiem, kā tas parādīts 3.1. attēlā.



3.1. att. **Ekonomisko pētījumu veikšanas blokshēma**
Fig. 3.1. The block diagram of the economic research activities

Kopējais siltuma daudzums, kuru iespējams iegūt 8 mēnešu laikā no saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem ar laukumu 0.1 m^2 ir 108.68 MJ , pārrēķinot elektroenerģijā ($1 \text{ MJ}=3.6^{-1} \text{ kWh}$) – 30.19 kWh . Līdzīgi tika noteikts saražotais elektroenerģijas daudzums saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem, kura laukums 1 m^2 , $W_{kT}=301.89 \text{ kWh}$. Aprēķināts vidējais lietderības koeficients $\eta_{kvid}=0.69$.

Aprēķināts, ka 0.1 m^2 saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem izgatavošanai tika patērēti 174.65 EUR , bet saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem 1 m^2 izgatavošanas izmaksas C_I kopā sastādīs 341.08 EUR .

1 kWh izmaksas noteikšanai, jānosaka nepieciešamie kapitālieguldījumi iekārtas iegādei, transportam līdz izmantošanas vietai un montāžai (Priekulis, 2008):

$$K = k_m \cdot C_I = 1.2 \cdot 341.08 = 409.30 \text{ EUR}, \quad (3.1)$$

kur k_m – koeficients, kurš ievērtē papildus izmaksas, kuras saistītas ar iekārtas transportu līdz izmantošanas vietai un montāžu.

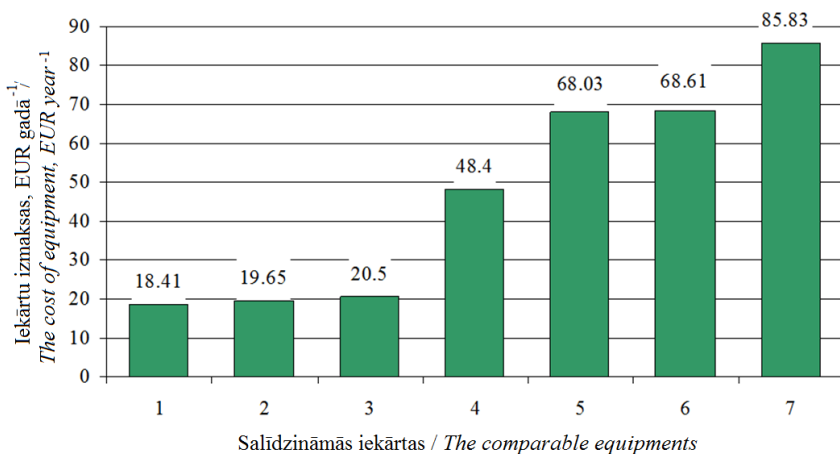
Noteiktā enerģijas īpatnējā izmaksa 1 m^2 lielam saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem, ja tā kalpošanas laiks 20 gadi, ir $0.09 \text{ EUR kWh}^{-1}$, bet, ja

pieņem, ka kalpošanas laiks ir 15 gadi, enerģijas īpatnējā izmaksa sastādīs 0.12 EUR kWh⁻¹.

Veicot saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem ekonomisko salīdzinājumu ar cita veida resursiem, tika noteikts elektroenerģijas patēriņš, kas nepieciešams noteikta ūdens daudzuma uzsildīšanai. Novērtējuma veikšanai ir ņemtas vērā kopējās iekārtu izmaksas (Priekulis, 2008), kuras sastāda – pastāvīgās izmaksas (piesaistītā kapitāla un elektroenerģijas) un mainīgās izmaksas (iekārtu remontam).

Salīdzināšanai tika izmantoti saules enerģijas kolektori, kas uzstādīti LTZI, Ulbrokā. Tie ir firmas *Viessmann* plakanais kolektors *Vitosol 200F SV2* un vakuuma cauruļu kolektors *Vitosol 200 SD*. Papildus tika izvēlētas dažādu veidu kurināmo iekārtas (malkas katls, dabas gāzes katls, granulu katls, šķidrās degvielas katls). Aprēķinos tika pieņemts, ka ūdens sildīšanai, visām iekārtām nepieciešams patērēt 900 kWh sezonā.

Veikts saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem pastāvīgo un mainīgo izmaksu salīdzinājums ar plakanā *Vitosol 200F SV2* un vakuuma cauruļu *Vitosol 200 SD* kolektoru kā arī ar dažāda veida kurināmo iekārtām (3.2.att.). No datu analīzes izriet, ka vienāda siltuma daudzuma saražošanai, lietojot saules enerģijas kolektorus ar atstarotājiem patērēts mazāk līdzekļu.



3.2. att. Saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem salīdzinājums ar citiem siltumenerģijas avotiem

Fig. 3.2. Comparison of solar collector with reflectors with other heat sources:

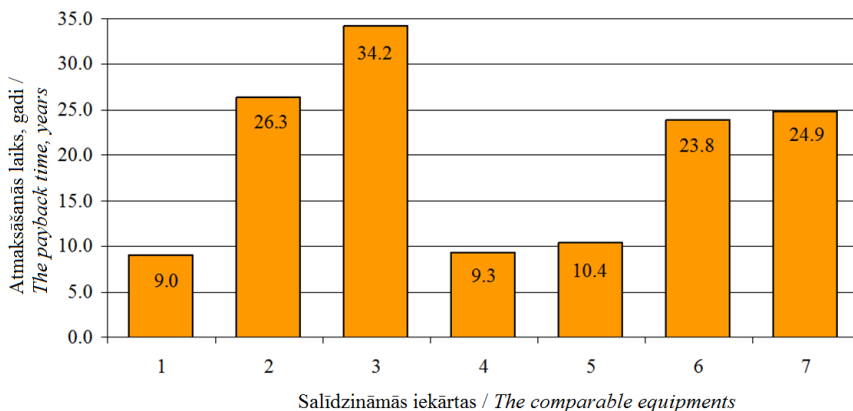
1 – saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem; 2 – plakanais kolektors; 3 – vakuuma cauruļu kolektors; 4 – malkas katls; 5 – gāzes katls; 6 – granulu katls; 7 – šķidrās degvielas katls / 1 – solar collector with reflectors 2 – flat-plate collector, 3 – vacuum tube collector 4 – wood-fired boiler, 5 – gas boiler, 6 – pellet boiler 7 – liquid fuel boiler

Iekārtu ieviešanas atmaksāšanas laiku nosaka, izmantojot sakarību (Kalogirou, 2009):

$$t_{at} = \frac{K}{C_{ek}} \quad (3.2)$$

kur C_{ek} – ekonomiskais ieguvums no iekārtu ieviešanas, EUR.

Salīdzinājums tika veikts gadījumam, ja ūdens sildīšanai izmanto elektroenerģiju. Veicot aprēķinus, noteikts, ka saules enerģijas kolektoru ar atstarotājiem ierīkošana atmaksāsies pēc 9 gadiem.



3.3. att. Ieguldīto līdzekļu atmaksāšanās laiku salīdzinājums

Fig. 3.3. Comparison of the pay-back time of contributions:

1 – saules enerģijas kolektors ar atstarotājiem; 2 – plakana kolektors; 3 – vakuuma cauruļu kolektors; 4 – malkas katls; 5 – gāzes katls; 6 – granulī katls; 7 – šķidrās degvielas katls / 1 – solar collector with reflectors 2 – flat-plate collector, 3 – vacuum tube collector 4 – wood-fired boiler, 5 – gas boiler, 6 – pellet boiler 7 – liquid fuel boiler

Atsaucoties uz Eiropas statistikas datiem (Eurostat, 2012), ka cena par dažāda veida kurināmiem ik gadu pieaug, var paredzēt, ka saules enerģijas kolektora ar atstarotājiem kapitālieguldījums un atmaksāšanās laiks tuvāko gadu laikā būs vēl zemāki, salīdzinot ar cita veida kurināmo resursiem.

SECINĀJUMI

1. Izstrādāta konstrukcija saules enerģijas kolektoram (patents LV 13713 B), kuram ierīkoti atstarotāji, kas nodrošina saules starojuma lielāku saules enerģijas uztveršanu.
2. Noskaidroti minimālie un maksimālie atstarotāju pagriešanas leņķi saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem. Noteiktas matemātiskās sakarības atstarotāju pagriešanas leņķu aprēķināšanai, kad atstarotāju platums nepārsniedz absorbera platumu, jo tad tiek nodrošināta efektīvākā atstarojošo virsmu laukuma izmantošana.
3. Aprēķināts, ka ieteicamais pagriešanas intervāls saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem ir 10 minūtes.
4. Lielāku saules starojuma intensitāti iespējams panākt ar divasu sekošanas mehānismu, bet tas sadārdzina iekārtas izmaksas. Vēl iespējama iekārtas pagriešana tikai ap polāro asi, kas vasaras un ziemas saulgriežu laikā ļauj uztvert līdz 92% no saules starojuma intensitātes, bet rudens un pavasara saulgriežos pat līdz 100%.
5. Trīs gadu mērījumu vidējie rādītāji un aprēķini liecina, ka 8 mēnešu laikā (marts-oktobris), saulei sekojošais saules enerģijas kolektors var saražot 1.4 reizes lielāku siltuma daudzumu nekā dienviņu virzienā orientēts stacionārs saules enerģijas kolektors, bet vasaras mēnešos pat līdz 1.5 reizes vairāk.
6. Stacionāri novietots un abpusēji apstarojams saules enerģijas kolektors saražo 1.65 reizes vairāk siltuma, salīdzinot ar kolektoru, kas apstarots tikai no vienas puses ar to pašu starojuma intensitāti.
7. Salīdzinot eksperimentāli iegūtos un teorētiski aprēķinātos datus abpusēji apstarotajam saules enerģijas kolektoram, tika konstatēts, ka mērījumu kļūda ir attiecīgi 4.7% (apstarojot ar starojuma intensitāti 1000 W m^{-2}) vai 4.2% (apstarojot ar intensitāti 500 W m^{-2}), kas liecina par simulācijas modeļa pietiekoši augsto precizitāti.
8. Salīdzināts siltuma daudzums, kuru iegūst ar saulei sekojošu plakano saules enerģijas kolektoru lauka apstākļos, un, ar *Matlab-Simulink* programmā izveidotā kolektora matemātiskā modeļa palīdzību, un konstatēts, ka pie vienādas starojuma intensitātes, kolektors ar atstarotājiem saražo 2.89 reizes lielāku siltuma daudzumu, nekā kolektors bez atstarotājiem.
9. Saražotās siltuma enerģijas īpatnējās izmaksas saules enerģijas kolektoram ar atstarotājiem ir $0.09 \text{ EUR kWh}^{-1}$.
10. Ņemot vērā gada ekspluatācijas izmaksas, noteikts, ka saules enerģijas kolektoru uzstādīšana atmaksāsies 9 gadu laikā.

TOPICALITY OF THE RESEARCH

Over the last century Western Europe is characterized by the high standard of living, which constantly has been in opposite to such energy resources as oil, natural gas and nuclear, and has led to the heavy dependence on imported supplies. To minimize this dependence and the associated negative effects for both the individual end-user and the economy, different promoting and regulating laws, norms and so on in the energy sector are issued (Nersesian, 2007; Siegel et al., 2008).

The increasing demand for energy, limited reserves of fossil fuel, as well as environment pollution and global climate change in recent years in the world created increased interest in renewable resources. It has long been discovered hydrogen engines, environmentally friendly solar cells, solar collectors, wind turbines and other renewable installations (Kaltschmitt et al., 2007). Support for the use of renewable resources became an important part for European Union policy.

The main strategic aim of renewable energy for Latvia is optimal usage of renewable energy potential, taking into account the economic, geographic and technical capabilities, as well as economic, environmental and energy aspects of the development, taking into account the international and European policy objectives and requirements for renewable energy (Lauber, 2005; Fras-Ehrfeld, 2009).

From the literature analysis (Trittin, 2003) starting from 1990 the solar thermal energy market yearly increased by about 13.6%. Since 2000 in the European Union every year additionally was installed over 1 million m² of solar collector area. Solar collectors for domestic water heating account most of the common European solar market. Their price is relatively low and the installation on the roof is simple. In the countries where roofs of the houses are traditionally inclined, there are certain difficulties to install systems with natural circulation which includes heavy and large water tanks. In northern countries water solar heating system with natural circulation are not used due to very low temperatures in winter. Mainly technically advanced solar water heating systems are used, which properly installed can be combined with the additional used boiler water heating. Solar water heating systems are widely used in Denmark and Sweden. Since in both countries district heating and hot water systems are already established, the solar installations there are relatively easily be integrated. If the system, where solar energy as the source of heat is used, is designed to cover only part of the summer-time, it can work at maximum power without large heat storage tank (EREC, 2010).

Today's solar collector devices are mainly used for the production of hot domestic water, space heating using heated floors, for swimming pools water heating, as well as drying and cooling.

In Europe, particularly in Germany, as well as in other parts of the technologically developed world, in 1990-ies there have been developed many

small companies, not only producing the solar equipment, but also carrying out the research work (Zauers, 2004; Clement, 2005).

In Latvia the sun radiation have relatively low intensity. The total energy of the sun is about 1109 kWh m^{-2} per year that is slightly more than in the Scandinavian countries. For the use of solar thermal energy is the period from the last decade of April, when the radiation intensity is around 120 kWh m^{-2} , till the first ten days of September. During this period, about 1800 hours of solar energy can be used for the production of hot water by installing solar panels (EA, 2006). The cost of the existing technology decreases gradually, as they are replaced by new and more completed systems.

The promotion work research direction is focused to the solar energy conversion into thermal energy for water heating, as well as for a variety of other business purposes. Also, obtained heat can be used for agricultural purposes, such as piglet's resting places floor heating. Solar equipment installation, for hot water preparation or for space heating is economically profitable especially when there is a need for the heat recovery system. The planned solar installation share of the load in relation to the additional heating system is variable depending on the season. The addition part of the heat source load is usually covered by the operation of the gas, wood or liquid fuel boiler or electricity.

THE OBJECT, HYPOTHESIS, AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

Research object – motivation of geometric and technical parameters of the solar collector with reflectors for maximum heat production efficiency.

Research hypothesis – a flat-plate solar collector equipped with reflectors and the sun tracking system is able to produce considerably higher amount of heat energy.

The aim of the promotion work is to elaborate theoretical and experimental substantiation of the construction of tracking the sun solar collector for water heating, where for intensification of solar radiation striking the absorber's rear surface reflectors are used.

The main tasks of the research

1. To develop the theoretical base of tracking the sun solar collector, where for the intensification of the solar radiation, striking the absorber's rear surface reflectors is used.
2. To evaluate the constructive solutions and geometric parameters of the solar collector with reflectors for ensuring the maximum of heat production efficiency.
3. To investigate and analyze tracking the sun mechanisms of the collector systems tracking the sun and to select the most suitable.
4. To elaborate the mathematical model of tracking the sun solar collector with reflectors and using the *Matlab-Simulink* software to compute the

main structural and thermal values of the collector's parameters, including produced amount of heat energy.

5. To manufacture the construction of tracking the sun solar collector with reflectors and to work out the methodology for its experimental investigation under laboratory and field conditions.
6. To compare the efficiency and other relevant economic and thermal parameters of the developed solar collector with those of other solar collectors and heat sources.

RESEARCH METHODS

In order to attain the aim of the promotional work different research methods are used, like analysis, synthesis, solution of differential equations, experimental (laboratory and field), statistical and economic evaluation of the research, methods and mathematical modelling, using computer program Matlab-Simulink and others.

In the experimental investigation the technical base, laboratories and laboratory equipment of the agency of Latvian University of Agriculture Research institute of Agricultural Machinery was used. The licensed gauges were used for measuring. The necessary number of measurements was repeated in order to ensure sufficient validity of the measuring results. For evaluation of the results the statistic data processing software *MS Excel* was used.

THESES FOR DEFENCE

1. The developed solar collector with reflectors is more effective than other types of solar collectors.
2. Tracking the sun mechanism of the equipment is working in interruption regime.
3. Using the developed mathematical model of the solar collector with reflectors, it is possible to compute the amount of heat energy produced by the collector.

APPROBATION OF THE RESEARCH

Generally recognized reviewed scientific publications

1. Kancevica, Liene, Putans, Henriks, Ziemelis, Imants. The tracking system for solar collectors with reflectors, **In:** Rivza, Peteris (eds). *Proceedings of the Third International Scientific Conference: RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY*. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2012. p. 189-195. ISBN 978-9984-48-070-1.
2. Kancevica L., Aboltins A. Substantiation for construction of solar collector with reflectors. **In:** Osadcuks, Vitalijs (eds). *10th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2011. - Vol.10, p. 326-329. ISSN 1691-5976.
3. Kancevica, Liene, Aboltins, Aivars. ANALYTICAL ASPECTS FOR CONSTRUCTION OF SOLAR COLLECTOR WITH REFLECTORS. **In:** Dr. Goran, Topisirovic (eds). *Scientific journal: AGRICULTURAL ENGINEERING. No. 4*. Belgrade, Zemun: University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Institute of Agricultural Engineering, December, 2011. p. 21-27. ISSN 0554-5587.
4. Kanceviča L., Putans H. Energy produced by solar battery and perspectives of it's usage in Latvia. *Vide. Tehnoloģija. Resursi: VIII starptautiskās zinātniski praktiskās konferences materiāli*, Rēzekne: Rēzeknes Augstskola, Inženieru fakultāte, 2011. - 1.sēj., 205.-212.lpp. ISSN 1691-5402, ISBN 978-9984-44-070-5.
5. Pelece, Ilze, Putans, Henriks, Zagorska, Viktorija, Kancevica, Liene, Ziemelis, Imants. PECULIARITIES OF DOMESTIC WATER HEATING BY SOLAR COLLECTORS. **In:** Osadcuks, Vitalijs (eds). *9th Interanational Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2010. p. 205-210. ISSN 1691-5976.
6. Ziemelis, I., Putans, H. and Kancevica, L. INVESTIGATION OF SOLAR COLLECTOR IRRADIATED FROM BOTH SIDES. *Agronomy Research: BIOSYSTEMS ENGINEERING*. Volume 8. Estonia: Tartu, 2010. p. 280-286. ISSN 1406-894X.
7. Ziemelis I., Kanceviča L., Putans H. Efficiency of energy produced by different types of solar collectors. *6th Research and Development Conference of CEE AGENG*. Lithuania: Raundondvaris, 2009. p.191-197. ISBN 978-9986-732-50-1.
8. Ziemelis, Imants, Kancevica, Liene, Jesko, Zanis, Putans, Henriks. CALCULATION OF ENERGY PRODUCED BY SOLAR COLLECTORS. **In:** Nulle, Imants (eds). *8th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2009. p. 212-218. ISSN 1691-5739.
9. Ziemelis, Imants, Jesko, Zanis, Kancevica, Liene, Iljins, Uldis. Development of Solar Collectors with Reflectors. **In:** Deltuvas, Romualdas

- (eds). *Proceedings of the Third International Conference: RURAL DEVELOPMENT 2007*. Kaunas: Lithuanian University of Agriculture, 2007. p. 322-327. ISSN 1822-3230.
10. Ziemelis I., Kancevica L., Ziemelis E., Jesko Z. Comparative studies of varied flat plate solar collector structures. **In:** Kucinskas, Vytautas (eds). *Proceedings of the International Conference: TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PROGRESS IN AGRICULTURE. No. 12*. Lithuania: Raundondvaris, 2007. p. 174-177. ISSN 1822-2706.
 11. Kancevica L., Ziemelis I., Kristapsons M. POSSIBILITIES OF WATER HEATING BY SOLAR ENERGY IN LATVIA. **In:** Melnychuk D.A. (eds). *Proceedings of 5th Research and Development Conference of Central and Eastern European Institutes of Agricultural Engineering*. Kiev: National Agricultural University of Ukraine, 2007. p. 96-102. ISBN 966-8302-16-08.
 12. Kancevica, Liene, Navickas, Juozas, Ziemelis, Imants, Putans, Aldis. ANALYZE OF METERELOGICAL DATA FOR DEVELOPMENT OF SOLAR COLLECTORS. **In:** Smigins, Ruslans (eds). *6th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2007. p. 24-28. ISSN 1691-3043.
 13. Jesko, Zanis, Kancevica, Liene, Ziemelis, Imants. COMPRISON OF SOLAR COLLECTORS AND CONVENTIONAL TECHNOLOGIES USED FOR WATER HEATING IN LATVIA. **In:** Smigins, Ruslans (eds). *6th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia: Jelgava, 2007. p. 35-40. ISSN 1691-3043.
 14. Канцевича Л.А., Зиемелис И.Ф., Кристапсонс М.Ж. К развитию плоских солнечных коллекторов. **В кн.:** Лачуга Ю.Ф. (сост.). *5-я международная научно-практическая конференция: Экология и сельскохозяйственная техника. Том 3*. Россия, Санкт-Петербург: ГНУ СЗНИИМЭСХ, 2007. С. 281-286. ISBN 978-5-88890-042-0.
 15. Kanceviča, Liene. Investigation on water heating by solar radiation. Pētījums par ūdens sildīšanu ar saules radiāciju. **Grām.:** Vīksna, Artūrs (proj. vad.). *International conference: EcoBalt' 2007*. Rīga: Intego Plus, 2007. p. 26-29. ISSN 1691-4112.
 16. Kancevica, Liene¹, Navickas, Juozas², Ziemelis, Eriks¹, Ziemelis, Imants¹. Increase of the Efficiency of Solar Collectors (¹Latvia University of Agriculture, ²Lithuanian University of Agriculture). **In:** Savilionis, Aleksandras (eds). *Proceedings of the Second International Scientific Conference: BIOMETRICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE: RESEARCH AND DEVELOPMENT*. Lithuania: Kaunas, 2006. p. 89-92. ISSN 1822-5977.
 17. Kancevica L., Jesko Z., Ziemelis I. Power of Solar Radiation on Different Orientated Surfaces. **In:** Gailums, Aleksandrs (eds). *Proceedings of the International Scientific Conference: Information Technologies for Rural Development*. Jelgava: LUA, 2006. p. 76-84. ISBN 9984-784-13-4.

18. Kancevica L., Ziemelis E., Ziemelis I., Skele A. Development of solar collectors. Усовершенствование солнечных коллекторов. **In:** Kucinskas V. (eds). *Proceedings of the International Conference: DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS IN ECOLOGICAL AND ENERGETIC ASPECTS. No. 11.* Lithuania: Raudondvaris, 2006. p. 287-291. ISSN 1822-2706.
19. Асп. Канцевича Л., д.т.н. Зиёмелис И.Ф., д.б.н. Кристапсонс М.Ж. СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР С ОТРАЖАТЕЛЕМ. **В кн.:** Молоснов Н.Ф. (сост.). *5-я Международная научно – техническая конференция: ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ.* Москва: ГНУ ВИЭХ, 2006. С. 155-161. ISSN 0131-5277.
20. Kanceviča, Liene. Acquisition of Some Meteorological Parameters for The Development of Solar Collectors. **In:** Markevica, Ausma (eds). *Proceedings of the International Scientific Conference: RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT 2006.* – Latvia, Jelgava, 2006. p. 31-36. ISBN 9984-784-14-2.
21. Kancevica, Liene, Putans, Henriks, Putans, Aldis, Ziemelis, Imants. ANALYSIS OF METERELOGICAL PARAMETERS FOR DEVELOPMENT OF SOLAR COLLECTORS. **In:** Palabinskis, Janis (eds). *5th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.* Jelgava: Faculty of Engineering, 2006. p. 177-181. ISSN 1691-3043.
22. Kancevica, Liene, Putans, Henriks, Ziemelis, Imants. MIRROR-COLLECTOR FOR SOLAR WATER HEATING. **In:** Palabinskis, Janis (eds). *5th International Scientific Conference: ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.* Jelgava: Faculty of Engineering, 2006. p. 181-186. ISSN 1691-3043.
23. Kanceviča, Liene, Ziemelis, Imants. Saules starojums – ekoloģiski tīrs enerģijas avots. **Grām.:** Vīksna, Artūrs (proj. vad.). *International conference: EcoBalt' 2006.* Rīga: Intego Plus, 2006. 151.-152. lpp.
24. Ziemelis I., Kancevica L., Putans H. Rational water heating by solar energy. **In:** Deltuvas R. (eds). *The second international scientific conference: RURAL DEVELOPMENT 2005: Globalisation and integration challenges to the rural of east and central Europe.* Lithuania: Kaunas, 2005. p. 51-53. ISSN 1822-3230.

Patents

1. Putāns H., Ziemelis I., Zagorska V., Kanceviča L.. Saules enerģijas kolektora vadības ierīce, kas nodrošina tā sekošanu saulei. Latvijas patents LV 14611 B. F24J2/00, 20.11.2012. Patentī un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 11, 2012.
2. Putāns H., Zagorska V., Ziemelis I., Kanceviča L., Jesko Ž. Mobilā meteoroloģisko datu reģistrēšanas ierīce. Latvijas patents LV 14312 B.

- G01W1/00, 20.04.2011. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 1, 2011.
3. Ziemeļis I., Kanceviča L., Ziemeļis Ē., Jesko Ž. Saules enerģijas plakanais kolektors ar šūnveida polikarbonāta absorberi. Latvijas patents LV 13696 B. F24J2/42, 20.09.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 9, 2008.
 4. Putāns H., Ziemeļis I., Kanceviča L. Saules enerģijas kolektors ar divdaļīgu absorberi. Latvijas patents LV 13711 B. F24J2/42, 20.06.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 6, 2008.
 5. Putāns H., Ziemeļis I., Kanceviča L., Putāns A. Saulei sekojoša enerģijas kolektorierīce ar atstarotājiem. Latvijas patents LV 13713 B. F24J2/42, 20.06.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 6, 2008.
 6. Kanceviča L., Putāns H., Ziemeļis I., Putāns A., Jesko Ž. Saules enerģijas kolektorierīce ar atstarotājiem. Latvijas patents LV 13549 B. F24J2/42, 20.05.2007. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 5, 2007.
 7. Ziemeļis I., Kanceviča L., Jesko Ž., Ziemeļis Ē., Putāns A. Saules enerģijas plakanā kolektora absorbers ar kanāliem. Latvijas patents LV 13516 B. F24J2/04, 20.03.2007. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 3, 2007.
 8. Putāns H., Ziemeļis I., Viesturs D., Kanceviča L., Putāns A., Ziemeļis Ē. Plakana saules enerģijas kolektorierīce. Latvijas patents LV 13371 B. F24J2/02, 20.01.2006. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 1, 2006.

Reports at the international scientific conferences

1. The tracking system for solar collectors with reflectors. *Third International Scientific Conference: RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY*. Jelgava: Latvia University of Agriculture, May 28th-30th, 2012.
2. Substantiation for construction of solar collector with reflectors. *10th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Jelgava, Latvia University of Agriculture, May 26th - 27th, 2011.
3. Energy produced by solar battery and perspectives of it's usage in Latvia. *Vide. Tehnoloģija. Resursi: VIII starptautiskās zinātniski praktiskās konference*, Rēzekne, Rēzeknes Augstskola. Inženieru fakultāte, Latvijas ilgtspējīgās attīstības pētnieciskais institūts, 2011.gada 20.-22. jūnijs.
4. Investigation of Solar Collector Irradiated from Both Sides, Biosystems Engineering 2010. Tartu, Estonia, 13th -24th May 2010.
5. Analyze of Meteorological Data for Development of Solar Collectors. *6th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL*

- DEVELOPMENT*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 24th -25th, 2007.
6. К развитию плоских солнечных коллекторов. 5-я международная научно-практическая конференция *Экология и сельскохозяйственная техника*. Россия, Санкт-Петербург. 15-16 мая, 2007.
 7. Investigation on water heating by solar radiation. Pētījums par ūdens sildīšanu ar saules radiāciju. International conference *ECOBALT 2007*. Latvia, Riga. May 10th -11th, 2007.
 8. Increase of the Efficiency of Solar Collectors. Second International Scientific Conference *BIOMETRICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE: RESEARCH AND DEVELOPMENT*. Lithuania, Kaunas, Lithuanian University of Agriculture. November 24th -25th, 2006.
 9. Development of solar collectors. Усовершенствование солнечных коллекторов. International Conference *DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS IN ECOLOGICAL AND ENERGETIC ASPECTS. No. 11*. Lithuania, Raudondvaris. September 14th -15th, 2006.
 10. Acquisition of some meteorological parameters for the development of solar collectors. International Scientific Conference *RESEARCH FOR RURAL DEVELOPMENT 2006*. Latvia University of Agriculture, Department of Post – Graduate Studies. May 19th -22th, 2006.
 11. Analyze of meteorological parameters for development of solar collectors. 5th International Scientific Conference *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 18th -19th, 2006.
 12. Mirror-collector for solar water heating. 5th International Scientific Conference *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*. Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 18th -19th, 2006.
 13. Солнечный коллектор с отражателем. Труды 5-ой Международной научно-технической конференции *Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве*. Москва, ГНУ ВИЭСХБ. 16-17 мая, 2006.
 14. Saules starojums – ekoloģiski tīrs enerģijas avots. International conference *ECOBALT 2006*. Latvia, Riga. May 11th -12th, 2006.
 15. Rational water heating by solar energy. The Second International Scientific Conference *Rural Development 2005*. Lithuania, Kaunas, Lithuanian University of Agriculture. November 17th -19th, 2005.

Participation in the promotional work – related projects

1. Years 2011-2013 – Assistant in Project No. 09.1049 “Field Crops Research technical compliance and efficient use of methods and functional models for conventional and ecological farming”.

2. Years 2009-2012 - Researcher at the ESF project “Attraction of human resources for the research on renewable energy resources”.
No 2009/0225/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/129.
3. Year 2007 - Expert in the ESF project “Modernization of Engineering study content in the Latvian University of Agriculture”.
No. 2005/0124/VPD/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2./0066/00.7.

SCIENTIFIC NOVELTY AND PRACTICAL APPLICATION OF THE RESEARCH

1. The original mathematical model of the solar collector with reflectors for calculation of produced by the collector amount of heat energy is developed.
2. The methodology for experimental investigation of the collector under laboratory conditions is worked out and the experimental results obtained.
3. The construction of the collector with reflectors is substantiated theoretically and experimentally.
4. The changes in the difference between inflow and outflow heat carrier temperatures depending on the intensity of solar radiation and time is established.
5. The changes in the amount of produced heat energy by the collector theoretically and experimentally in dependence on the outside air temperature and intensity of solar radiation are stated.
6. Experimentally it is proved that the solar collector with reflectors is producing more heat energy than the other types of solar collectors.
7. Mathematical model for the calculation of production and exploitation expenses, pay-back time and the cost of 1 kWh of produced by the collector heat energy are established.

1. THEORETICAL RESEARCH

The theoretical research follows from the research tasks defined in the first chapter of the promotion work. There theoretical motivation of the development of a collector with reflectors is worked out, where in order to increase the intensity of solar radiation on the collector's absorber, reflectors are used. In this case the collector has to be equipped with the system for tracking the sun. The efficiency of a collar collector is higher, if solar beams are striking the absorber's surface perpendicularly. There are different systems used for the tracking the sun. The most cost-effective system is chosen. In order to calculate the main parameters of the solar collector with reflectors and compute the amount of produced heat energy by the collector, its mathematical model is worked out and the main parameters calculated.

The theoretical research is divided into four sections, as shown in *Figure 1.1*.

The first section there is explained the process of the development of solar collector with reflectors, defined reflectors position, rotation angle, taking into account the absorber and reflector dimensions, as well as analysed parameters that affect these values. Thermal analysis is carried out theoretically. The thermal and engineering analyze is made, depending on the material of the collector's cover, on the beam angle of incidence and heat loses from the collector.

The second section contains analyze of solar tracking modes and the theoretically possible amount of heat energy produced by the collector.

In the third section mathematical model of the solar collector with reflectors is developed, a as well as the mathematical model of a collector, which absorber is irradiated from both sides.

In the fourth section there based on the mathematical model of the collector the simulation models of solar collector with reflectors and solar energy collector irradiated from both sides is developed in order to use the computer program *Matlab-Simulink*.

1.1. Substantiation of the construction of a solar collector with reflectors

One of the research tasks is to create an effective solar water heating collector with increased efficiency. As the efficiency of a collector in large scale depends on the intensity of solar radiation striking the absorber, it was decided to heighten the radiation intensity on the absorber by the use of reflectors (mirrors). In this case reflected from the reflectors solar radiation is striking the absorber of the collector from its rear side too. Then there is no need for heat insulation of the rear side of the collector, because there is used so called box-type absorber from both sides covered by transparent glass covers. From the front side an absorber receives direct solar radiation, but from the rear side – reflected. The principal scheme of the equipment is shown in *Figure 1.2*. The collector is supplied with a tracking the sun mechanism.

The angles of rotation of the collector are calculated:

$$\beta_{a1} = \arcsin \frac{a}{2d}, \quad (1.1)$$

and

$$\beta_{a2} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{a}{d}. \quad (1.2)$$

From formulas (1.1) and (1.2) it follows that the right and left reflector placement angle values depend on the width of the collector absorber and a placement distance d . The values a and d are conditional absorber's and reflector's width and length. If both are the same, the rotation angle for the right reflector $\beta_{a2}=22.5^\circ$ and the left reflector $\beta_{a1}=30^\circ$. As it is seen the right and left side angles of the rotation of the reflectors are not equal. This can be explained by the fact that β_{a1} – is maximal possible angle of rotation and β_{a2} – is minimal possible angle of rotation. When both reflectors of the solar collector irradiated from both sides turn at the same angle (see *Fig.1.2.*), then denoting the width of the collector's absorber by a_k , and the width of reflectors with $a_{a1}=a_{a2}=a_a$, as well as the rotation angle of reflectors – with β_a , and using geometric correlations, the ratio between the width of the reflector and absorber are as following:

$$\frac{a_a}{a_k} = \frac{\cos 2\beta_a}{\cos \beta_a}. \quad (1.3)$$

An important condition for the equation (1.3) is that the length of the reflecting surface is never bigger than the width of the absorber, that is $a_a \cdot a_k^{-1} \leq 1$. This insures the most efficient use of the reflective surface area.

In the work the ratio of concentration is expressed. For the determination of this, the concentrators of reflectors reflectance – ρ_{at} is taken into account, which depends on the spectral reflectance of reflectors (Стребков, Тверьянович, 2007; Chaves, 2008). Results are summarized in common graph (*Fig.1.3.*), which shows the ratio of the concentration depending on the number of reflectors, for two and four reflectors accordingly. In the calculations it is assumed that $\rho_{at}=0.9$. Dependence of the distance d on the rotation angle of the reflectors in *Figure 1.3* is shown. It follows that in this case the optimal turning angle of the reflector $\beta_a \approx 10-17^\circ$, providing the concentration ratio from 1.5 to 3.

On the basis of studies and engineering calculations, a patent of the Latvian Republic LV 13711 B is received, for the invention of the solar collector with two-parts absorber (Putans et al., 2008). The absorber of the collector is made up from two parts, one to the other positioned at some angle to the working surface and focused on the reflector's side. The angle between the absorber parts selected so that the reflected radiation from absorbers to the flat surface falls below the smallest possible angle. For example, if from each side in a row are placed three reflectors, the angle is selected so that the reflected sun rays from the second reflector are perpendicular to the front surface of the absorber. In the case of reflecting elements are placed on same parabolic-shape base, thus

creating parabolic surface, much higher ratio of concentration can be obtained (Welford, Winston, 1989; O’Gallagher, 2008; Chaves, 2008).

Thermal analysis is based on the solar collector parameters change depending on the angle of incidence. There is calculated reflection ρ_p , absorption α_p and transmittance τ_p coefficients of a solar collector glass cover. The calculations show that the transmission coefficient of the glass will decrease, when the beam angle to the solar collector will be bigger than 50° . The reflection coefficient at this angle will grow rapidly. But as the solar collector will be provided by a tracking system, then, as it can be seen from the graph (*Fig.1.4.*), the changes are insignificant – up to 10° . In order to specify the glass, which will be used in a particular installation, the transmission coefficient of the solar radiation, calculations were made according at the angle of incidence of the solar beams with a step 0.5° , and the averaged values were stated.

The heat energy absorbed by the absorber of the solar collector was analyzed. The biggest part of the solar radiation striking the working surface of a collector is absorbed into the absorber material and further transmitted to the heat carrier, which is known as the useful energy. In thermal installations heat losses have to be taken into account. They depend on the individual design of the installation, coefficient of heat transfer between the components of the installation, calculated heat loss coefficient values at different outdoor temperature and wind speed.

1.2. Analysis of the sun tracking systems for solar collectors

In order a solar collector produces as much as possible heat energy during a day it must be oriented so that the sun’s rays are striking the working surface of the collector perpendicularly. Then at similar the other factors, the efficiency of the equipment will be at its maximum. Receiving systems are categorized by the type of tracking – about one axis (single-axis), and about two (two-axes) as shown in *Figure 1.5*. Single-axis tracking systems are used at horizontal position, considered in the thesis – the east-west (the *E-W horizontal*), south-north (the *S-N horizontal*), and parallel to the earth’s axis or polar axis (the *E-W polar*) (Duffie, Beckman, 2006; Стребков, Тверьянович, 2007; Kalogirou, 2009).

In order to evaluate the amount of heat energy received by following the sun surface, in all the cases in a variety of correlations are used. Results of calculation for tracking the sun systems in *Table 1.1* are given. The two-axes tracking system collects the maximum possible solar energy during the day at summer solstice and equinox. The *E-W polar* tracking system makes it possible to collect maximum solar energy during the equinox, which is equal to two-axes tracking system collected, and during the summer solstice by about 8% less radiation energy compared with two-axes tracking system. This is explained by the fact that solar energy collector’s inclination is equal to the polar axis, which in this case is equal to the place latitude, and on equinox, when $\delta=0^\circ$ and the angle of solar incidence $\theta=0^\circ$.

When analyzing the results which are summarized preference would be given to *E-W polar* single-axis tracking system, because the obtained results in percentage are closer to the two-axes tracking system compared with other single-axis tracking systems.

1.3. Mathematical model for the collector

In order to substantiate the calculation of the efficiency of a solar collector, there were computed the maximum of heat energy, which the equipment is able to produce. Assuming that the rotation mechanism of the solar collector 4 (*Fig.1.6.*) will operate with interruptions, the angle of solar beams incidence has been analyzed. In the case when the absorber of a solar collector is perpendicular to the sun's rays and $\theta=0^\circ$, solar radiation that strikes the reflective surface as I_k (the left side reflector) and I_l (the right side reflector), comes to points O_1 and O_2 . Being reflected they come to the solar collector as values I_{ka} and I_{la} in point O . The sun beam after some time gets in the second position, when I'_k becomes like I'_{ka} and I'_l like I'_{la} in point O' . The solar incidence angle will change and in *Figure 1.6.* is displayed as angle θ .

Taking into account the correlations that determine the intensity of solar radiation which reaches the collector working surface, as well as used thermodynamic parameters and the factors influencing them, the mathematical model for the determination of the amount of heat energy produced by the solar collector with reflectors is created as following:

$$Q_k = 3.6 \cdot S_k \cdot \left[\frac{24}{\pi} I_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \cos \theta \tau_A^{m_A} (1.01 \cdot \tau_{p1} \alpha_a + 1.01 \cdot \tau_{p2} \alpha_a 2 \rho_{at} \cos 2\beta_a \cos 2\theta) - q_z (T_i - T_g) \right], \quad (1.4)$$

- where Q_k – amount of heat accumulated by the solar energy collector, J;
 S_k – working surface area of the solar energy collector, m²;
 τ_A – atmospheric transmission coefficient, relat.unit;
 θ – angle of solar incidence, degrees;
 I_{SC} – solar constant, W m⁻²;
 n – serial number of the day, counting from the first January;
 τ_p – transmission coefficient of the solar collector's covering, relat. unit;
 q_z – energy loss coefficient, W m⁻² K⁻¹;
 T_g – outdoor air temperature, K;
 T_i – inlet temperature of the heat carrier into collector, K;
 m_A – atmospheric mass, relat.unit, whose value is determined according to the day of the year (in view of the sunset and sunrise times, or angles ω_{sr}):

$$m_A = \frac{1}{\frac{\omega_{sr}\pi}{180} \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_{sr}}, \quad (1.5)$$

where ω_{sr} – sunset hour angle, degrees;
 φ – latitude, degrees;
 δ – solar declination, degrees or radians.

The mathematical model for the solar collector irradiated from both sides is:

$$Q_k = 3.6 \cdot S_k [2I_k \eta_{oT} - q_{zv}(T_{iv} - T_{gv})], \quad (1.6)$$

where η_o – optical efficiency of collector, relat.unit,
which is explained in detail in the thesis.

For determination of the theoretical amount of heat that can be obtained from a solar collector with reflectors, the simulation model was used. The model was established with *Matlab-Simulink* software, using the equation (1.4). In order to simplify the simulation process, the simulation model was divided into three blocks, which are identified by letters A, B and C.

Figure 1.7. shows the block A, block B and block C combination, thus demonstrating the theoretical heat quantification of the solar collector with reflectors. The simulation model is developed in accordance with formula (1.4). The simulation model block A (see *Fig1.7.*) assesses the ratio of concentration, considering the dependence of rotation angle of the reflector on the other parameters of the solar collector. On the basis of this unit determined correlations β_a and C_k are used. Incepting parameters like latitude and number of the day, with assistance of simulation block B is determined the amount of solar radiation, collected by the solar collector with reflectors during a day. The simulation block C contains the heat loss coefficient determination scheme, where correlations found for calculation of the heat loss coefficient of the solar collector's shell, the heat loss from collector's absorber surface coating and the factors influencing the heat losses (wind, temperature).

The data obtained from the simulation model processing results it follows that the most productive months are from March to October. Using the obtained correlation (1.6) was established simulation model for quantities of heat produced by the solar collector irradiated from both sides.

2. EXPERIMENTAL RESEARCH

The aim of the experimental research is to determine the intensity of solar radiation striking the working surface of a fixed and tracking the sun solar collector. By means of these values it will be possible to calculate an average atmospheric transfer coefficient. Experimental investigation of the solar collector

irradiated from both sides has been carried out and obtained data analyzed. The amount of produced heat energy at different radiation intensities is stated. The data obtained experimentally are compared with computed using *Matlab-Simulink* software and the relative deviation is established.

Experimental research contains description of the design of the solar collector with reflectors. The construction has been tested under laboratory and field conditions. The data obtained are compared with the data obtained using simulation model. The chapter structure is shown in *Figure 2.1*.

2.1. Mobil meteorological data registration device

To determine the average value of atmospheric transmittance and outdoor air temperature a portable meteorological data measuring and registration device MMD-4 (Latvia patent LV 14312 B) was used.

During three years, from 2005 to 2007 from March 1 till November 1 (in 2005 from April 1 till November 1), placed on the roof of a house the device was measuring and registering the intensity of solar radiation on fixed and tracking the sun surfaces, as well as air temperature and relative humidity. The values of these parameters was measured and recorded in the memory of a computer. From the analysis the data obtained is seen that following the sun solar collector has collected 1.4 times more heat energy in comparison with stationary working solar collector.

2.2. Experimental researches of the solar collector irradiated from both sides

The methodology for experimental research of a solar collector having the box-type absorber and both sides irradiated was developed. The ordinary flat plate solar collectors are irradiated only from one side, which is directed to the sun. The rear side of the collector is covered by heat insulation. Therefore the heat losses through this surface are insignificant.

A collector irradiated from both sides has the box-type absorber, into which heat carrier is circulation. There both sides are irradiated. The amount of produced heat energy by the collector depends on radiation intensity.

The aim of research to find out how much more heat energy can be produced by a solar collector, which absorber surface is irradiated from both sides. The research was performed at two different radiation intensities – 1000 W m^{-2} and 500 W m^{-2} (in case of thermal insulation with 2000 W m^{-2}). At the same time it is envisaged to state such solar collector parameters as collector power, the average absorber temperature, produced heat energy, efficiency and others, as well as dynamic parameters of the collector.

As a subject of the research solar collector irradiated from both sides is envisaged to use (*Fig.2.2.*). The collector consists of the box-type absorber, placed in the collector's wooden frame, which both sides are covered with glass panes. The absorber is made of two steel sheets soldered together with small

distance between them. They were 550 mm for 500 W m^{-2} – 340 mm for 1000 W m^{-2} and – 345 mm for 2000 W m^{-2} .

During the irradiation (heating) process the heat carrier (water) temperature in the solar collector loop increased. It caused increase in temperature between the absorber and ambient air temperature ΔT_{ag} . At the same time increased the solar collector's heat loss. In result of this the produced heat energy per unit of time, efficiency and power of the collector lowered. The rise in temperature ΔT_{ag} continued while the stationary process was reached, for this type and intensity of the corresponding peak value. The numerical values of the capacity and efficiency decreased and at the end of the heating, when stationary process was established, the numerical values should be equal to zero.

There advantages and disadvantages of different type of heating characteristics data are analyzed. As an example, let's look at *Figure 2.3*. In this case the solar collector is irradiated with radiation intensity 1000 W m^{-2} . It should be noted that when heating a solar collector from both sides, in comparison with the variant, when a solar collector is heated from one-side (the other side is covered by heat insulation), more rapidly the temperature difference ΔT_{ag} is increasing. Solar collector irradiated from both sides is able to lighten the water temperature by 45°C during 40 minutes, while from one side irradiated collector – 120 minutes. To heat a certain amount of water for the same temperature ΔT_{ag} , the solar collector irradiated from both sides, consumes less power and is working with greater efficiency. This enables one and the same heat storage capacity to accumulate substantially greater amount of heat.

Obtained data show that when the solar collector is irradiated from both sides with the radiation intensity 2 times larger than the classical flat-plate solar collector irradiated from one side, the increase in temperature ΔT_{ag} and heat production is about 1.65 times. As a positive factor should to be noted that in terms of design the solar collector irradiated from both sides is simpler than the irradiated only from one-side, when the rear side is covered by heat insulation.

Comparing the experimental data obtained for the solar collector irradiated from both sides with obtained using the simulation model, the model's relative error was determined. This value is 4.7% when irradiated with intensity 1000 W m^{-2} and 4.2% – when irradiated with the intensity 500 W m^{-2} , indicating the accuracy of the simulation model.

2.3. Designing of the solar collector with reflectors

Based on the theoretical research the solar collector with reflectors following the sun was developed and Latvia patent LV 13371 B received (*Fig.2.4.*). To prevent the equipment from heeling, stated during the time of approbation, improved construction of the collector was developed and Latvia patent LV13549 B received. The structural performance of these equipments is described in the thesis. Like to the first variant of the collector (see. *Fig.2.4.*), the second construction of the collector with reflectors and without heeling was

optimized so that zenith angle of collector was changeable depending on the angle of solar declination. Construction was improved and Latvia patent LV 13713 B was received.

Based on the calculation and research made in the theoretical part of the work, automatic the sun tracking system for the solar collector with reflectors was developed. The system's functional scheme and description of its principle of operation in the promotion work is given. For the solar collector's control device ensuring the tracking process of the sun Latvia patent LV 14611 B was received.

In order to determine the accuracy of the simulation model, in May 2011 the experimental field research of the solar collector with reflectors was carried out. The collector was placed on the roof of a building of the agency of LUA Research institute of Agricultural Machinery. *Table 2.1* shows the obtained data compared with the simulation model data during 5 days. The selected days for the experiment were not rainy. May 12 was cloudless in comparison with the other days and the average air temperature, as it is seen from the table, was at its maximum, that is 24°C.

As follows from *Table 2.1* relative error values varies from 3.05-6.01%, average value is 4%, which shows accuracy of the simulation model. In order to compare the solar collector with reflectors with a flat-plate solar collector irradiated only from one side, the described simulation model was used. From the results it follows that using the solar collector with reflectors and irradiating it with the intensity of radiation 1000 W m², 2.89 times more of heat in comparison with the flat-plate solar collector can be obtained.

3. ECONOMIC EVALUATION

For the economic evaluation of the use of the solar collector with reflectors, its manufacturing cost and the seasonal benefit was calculated, as well as economic comparison with other types of resources was carried out as seen in *Figure 3.1*.

The total amount of heat energy which can be obtained during 8 summer months from the solar energy collector with reflectors with area 0.1 m² is 108.68 MJ, converting to electrical energy (1 MJ=3.6⁻¹ kWh) it makes 30.19 kWh. Similarly was stated the amount of electricity produced by the solar energy collector with reflectors that area 1m², $W_{kt}=301.89$ kWh. Calculated average efficiency is $\eta_{kvid}=0.69$.

It is estimated that 0.1 m² the manufacture of the solar energy collector with reflectors were consumed 174.65 EUR, the solar energy collector with reflectors 1m² manufacturing costs C_I will amount to 341.08 EUR.

In order to determine the prime cost of 1 kWh heat energy produced by the collector, there have to be known the necessary capital investments for buying the equipment and transportation and mounting expenses (Priekulis, 2008):

$$K = k_m \cdot C_f = 1.2 \cdot 341.08 = 409.30 \text{ EUR}, \quad (3.1)$$

where k_m – coefficient of additional expenses associated with the transportation and installation of the equipment.

The prime cost for a solar collector with reflectors and working area 1 m^2 at its life time 20 years is $0.09 \text{ EUR kWh}^{-1}$, but if the life time is 15 years, the prime cost of the heat energy produced by the collector is $0.12 \text{ EUR kWh}^{-1}$.

Carrying out the economic comparison of the solar collector with reflectors with other types of heat resources, it was compared with the amount of electricity required for heating the same quantity of water. For this the total cost of equipment is considered (Priekulis, 2008), which consists of fixed costs (capital raised and electricity) and variable costs (equipment repair).

For the comparison there solar energy collectors installed on the roof of a building of the agency of LUA Research institute of Agricultural Machinery were used. These are produced by the *Viessmann* company flat-plate solar collector *Vitosol 200F SV2* and vacuum tube collector *Vitosol 200 SD*. Additionally for the comparison there different types of fuel equipment (wood-burning boiler, natural gas boiler, pellet boiler, liquid fuel boiler) was selected. In the calculation it was assumed that for all the equipment it is necessary to consume 900 kWh for water heating per season.

The fixed and variable costs of the solar collector with reflectors with flat-plate *Vitosol 200F SV2* and vacuum tube *Vitosol 200 SD* collectors as well as various types of fuels equipment were compared (Fig.3.2.). From the data analysis it is stated that in order to produce the same amount of heat to use solar collectors with reflectors is recommended.

The pay back time for the equipment is determined by formula (Kalogirou, 2009):

$$t_{at} = \frac{K}{C_{ek}}. \quad (3.2)$$

where C_{ek} – economic benefits from the introduction of the equipment, EUR.

The comparison was made in case when for water heating the electricity is used. The calculation shows that the pay back time for the solar collector with reflectors is 9 years.

Referring to the statistics of Europe (Eurostat, 2012), that the price of different types of fuels is increasing each year, it is possible to predict that for the solar energy collector with reflectors capital investment and pay back time during next few years will be even lower comparing with other types of fuel resources.

CONCLUSIONS

1. The construction of the solar energy collector with reflectors providing higher intensity of solar radiation on the absorber is invented (patent LV 13713 B).
2. Maximum and minimum values for the rotation angles of the collector's reflectors are stated. Mathematics coherences for the calculation of the rotation angles of the reflectors, when the width of the reflectors are not wider than the width of the absorber, $a_a \cdot a_k^{-1} \leq 1$, because it ensures the efficient use of the reflective surface area of the collector.
3. It is recommended to have the rotation interval 10 minutes for the solar collector with reflectors.
4. The higher irradiation intensity on the collector absorber can be achieved using the two-axes tracking mechanism, but it raises the cost of equipment. The second option is to use the one-axis rotation around the polar axis, which in summer and winter solstice allows use up to 92% of the sun radiation intensity, but in autumn and spring solstice up to 100% of solar radiation.
5. Our three-year average measurements and calculations of the atmospheric meteorological parameters (intensity of solar radiation, air temperature and relative humidity) show that during the 8-months period (March-October), the sun tracking solar collector can produce 1.4 times more heat energy than the south oriented stationary located solar collector, but during the summer months by up to 1.5 times more.
6. The stationary placed and irradiated from both sides solar collector produces 1.65 times more heat energy in comparison with the collector irradiated only from one side, at the same intensity of radiation.
7. Comparing experimentally and theoretically obtained data for the solar collector irradiated from both sides with data obtained using the simulation model, it was found that the measurement error is 4.7% (irradiation with radiation intensity 1000 W m^{-2}) and 4.2% (with irradiation intensity of 500 W m^{-2}), which shows a simulation model of sufficiently high accuracy.
8. Comparing the amount of heat produced by the sun tracking flat plate solar collector under field conditions with results obtained using the *Matlab-Simulink* software, it is stated that at the same radiation intensity, collector with reflectors produces 2.89 times more heat than the collector without reflectors.
9. The prime cost of heat energy produced by the solar collector with reflectors is $0.09 \text{ EUR kWh}^{-1}$.
10. Taking into account the annual operating cost it is stated that the pay back time for the solar collector with reflectors is 9 years.

KOPSAVILKUMA NORĀDĒS IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

REFERENCES USED IN SUMMARY

1. Chaves Julio. *Introduction to NONIMAGING OPTICS*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 560 p. ISBN -13:978-1-4200-5429-3.
2. Clement Wolfgang. *SOLAR HEAT: ENERGY FROM THE SKIES. Renewable Energy – Made in Germany*. Germany: Berlin, 2005. 66 p.
3. Duffie John A., Beckman William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third Edition. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 908 p. ISBN-13 978-0-471-69867-8.
4. EA. Atjaunojamo energoresursu izmantošanas pamatnostādnes 2006.-2013.gadam. ENERĢĒTIKA UN AUTOMATIZĀCIJA. Nr. 9 (54). Rīga: SIA E&A, 2006. 48-55. lpp.
5. EREC. *Renewable energy in Europe: markets, trends, and technologies*. Second edition. UK: London, 2010. 289 p. ISBN 978-1-84407-875-2.
6. Eurostat. Electricity prices for household consumers. 02.04.2012. [online] [cited 07-07-2012]. Available: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
7. Frass-Ehrfeld, Clarisse. *Renewable Energy Sources. A Chance to Combat Climate Change*. Netherlands: Kluwer Low International, 2009. 616 p. ISBN 978-90-411-2870-6.
8. Kalogirou Soteris A. Solar thermal collectors and applications. *RENEWABLE ENERGY FOCUS HANDBOOK*. USA: Elsevier Inc., 2009. p. 333-400. ISBN 978-0-12-374705-1.
9. Kaltschmitt Martin, Streicher Wolfgang, Wiese Andreas. *Renewable Energy. Technology, Economics and Environment*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 565 p. ISBN 978-3-540-70947-3.
10. Lauber Volkmar. European Union Policy towards Renewable Power. **In:** Lauber Volkmar (eds). *Switching to Renewable Power: A Framework for the 21st Century*. London: Sterling, VA, 2005. 203-216 p. ISBN-13: 978-1-84407-241-5.
11. Nersesian Roy L. *Energy for the 21st Century: A Comprehensive Guide to Conventional and Alternative Sources*. England, London: M.E. Sharpe, Inc, 2007. 425 p. ISBN-13: 978-0-7656-1323-3.
12. O'Gallagher Joseph J. *Nonimaging Optics in Solar Energy*. USA: Morgan & Claypool, 2008. 133 p.

13. Priekulis J. *Lopkopības mehanizācija*. Jelgava: LLU, 2008. 355 lpp. ISBN 978-9984-784-76-2.
14. Putāns H., Ziemeļis I., Kanceviča L. Saules enerģijas kolektors ar divdaļīgu absorberi. Latvijas patents LV 13711 B. F24J2/42, 20.06.2008. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas Patentu valdes oficiālais vēstnesis* - Nr. 6, 2008.
15. Siegel Jeff, Nelder Chris, Hodge Nick. *INVESTING IN RENEWABLE ENERGY: Making Money on Green Chip Stock*. Canada: WILEY, 2008. 272 p. ISBN 978-0470-15268-3.
16. Trittin J. *Environmental-Policy Co-operation with Central and Eastern Europe*. Germany: Berlin, 2003. 88 p.
17. Welford W.T., Winston R. *High Collection Nonimaging Optics*. USA: Academic Press, Inc, 1989. 300 p.
18. Zauers Alvilis. Saules bums pasaulē. *ENERĢIJA UN PASAULE*. 2004. 3(26): 24-28. lpp.
19. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. *Концентраторы солнечного излучения*. Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2007. 316 с. ISBN 978-5-85941-149-8.