



LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE

MEŽA FAKULTĀTE
FOREST FACULTY

Mg.sc.ing. EDGARS BUKŠĀNS

**KOKSNES MATERIĀLU UGUNSDROŠĪBU IETEKMĒJOŠIE FAKTORI UN
UGUNSREAKCIJAS PROGNOZĒŠANA**

**DIFFERENT FACTOR INFLUENCE ON FIRE SAFETY OF WOOD MATERIALS
AND PREDICTION OF THE REACTION TO FIRE**

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

SUMMARY OF ACADEMIC DISSERTATION
for acquiring the Doctor's degree Dr.sc.ing.

JELGAVA
2010

Promocijas darba zinātniskais vadītājs:
Supervisor:

Andris Morozovs
asoc. prof. Dr.chem.

Promocijas darbs izpildīts Latvijas Lauksaimniecības universitātes (LLU) Meža fakultātes Kokapstrādes katedrā, Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūtā.

Pētījumi veikti laika posmā no 2005. gada līdz 2009. gadam.

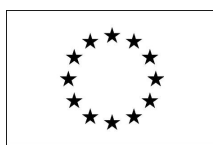
The research is carried out at the Latvia University of Agriculture (LUA), Forest Faculty, Department of Wood Processing, Forest and Wood Products Research and Development Institute. Research was done in period from 2005 till 2009.

Oficiālie recenzenti / Official reviewers:

- Dr.habil.sc.ing. Arnolds ŠĶĒLE, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors, Latvijas Zinātnes padomes eksperts/ Professor of Latvia University of Agriculture, expert of Latvian Council of Science;
- Dr.habil.sc.ing. Arnis TREIMANIS, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors, Latvijas Zinātnes padomes eksperts / Professor of Latvia University of Agriculture, expert of Latvian Council of Science;
- Dr.habil.chem. Urve KALLAVUS, Tallinas Tehnoloģijas universitātes profesore, Materiālu pētniecības centra vadītāja/ Professor of Tallin University of Technology, Head of the Centre for Materials Research.

Promocijas darba izstrāde veikta ar ESF granta un Meža attīstības fonda atbalstu.

Doctoral thesis has been worked out by financial support of ESF and Forest Development Fund.



Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Mežzinātņu nozares un Materiālzinātņu nozares Koksnes materiālu un tehnoloģijas apakšnozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2010. gada 6 maijā. plkst. 11:00 Jelgavā, Dobeles ielā 41, sēžu zālē.

The promotion paper will be presented for public criticism in an open session of the Promotion council of Wood materials and technology sub-branch of Forest Sciences and Material Sciences branch of the Latvia University of Agriculture held on 6th May, 2010 at 11:00 o'clock a.m. in conference hall, Dobeles iela 41, Jelgava.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā, Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001 vai <http://llufb.llu.lv/llu-theses.htm>.

Atsauksmes sūtīt LLU Mežzinātņu nozares un Materiālzinātņu nozares Koksnes materiālu un tehnoloģijas apakšnozares promocijas padomes sekretāram LLU profesoram *Dr.sc.ing. A. Drēskam*, Akadēmijas iela 11, Jelgava, Latvija, LV-3001 vai mfmezizm@llu.lv

The thesis and resume are available at the Fundamental Library of Latvia University of Agriculture, Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001 or <http://llufb.llu.lv/llu-theses.htm>.

References are welcome to be send to professor *Dr.sc.ing. A. Drēska* the Secretary of the Promotion Council of Wood materials and technology sub-branch of Forest Sciences and Material Sciences branch of the Latvia University of Agriculture, Akadēmijas iela 11, Jelgava, LV-3001, Latvia or mfmezizm@llu.lv.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
TĒMAS AKTUALITĀTE	5
PĒTĪJUMA MĒRĶIS.....	5
DARBA UZDEVUMI.....	5
PĒTĪJUMU METODES.....	6
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE.....	6
IEGŪTIE REZULTĀTI UN PRAKTISKĀ NOZĪME	6
DARBA STRUKTŪRA.....	6
1 LITERATŪRAS APSKATS	7
2 PĒTĪJUMU VISPĀRĒJĀ METODIKA.....	7
2.1 MATERIĀLU IZVĒLE UN PARAUGU SAGATAVOŠANA	7
2.2 TESTU METODES UN APRĪKOJUMS.....	7
2.3 DATU APSTRĀDE UN ANALĪZE	8
3 KOKSNES UZSILŠANAS DINAMIKA.....	8
4 KOKSNES DEGŠANAS PROCESU IETEKMĒJOŠIE FAKTORI.....	9
4.1 KOKSNES MITRUMA SATURA IETEKME UZ UGUNŠREAKCIJU	9
4.2 KOKU SUGU IETEKME UZ UGUNŠREAKCIJU	10
4.3 KOKMATERIĀLU IZMĒRU UN KONSTRUKCIJAS IETEKME UZ UGUNŠREAKCIJU	11
4.4 DAŽĀDU APDARES MATERIĀLU IETEKME UZ UGUNŠREAKCIJU	13
4.5 KOKSNES MODIFIKĀCIJAS IETEKME UZ UGUNŠREAKCIJU	13
5 KOKSNES KOMPOZĪTU MATERIĀLU UGUNŠREAKCIJA.....	15
6 KOKSNES UGUNŠREAKCIJAS UN UGUNŠIZTURĪBAS UZLABOŠANA.....	18
7 KOKSNES MATERIĀLU UGUNŠREAKCIJAS PROGNOZĒŠANA	21
7.1 KOKSNES UGUNŠREAKCIJAS PROGNOZĒŠANAS METODES	21
7.2 KOKSNES KOMPOZĪTU MATERIĀLU UGUNŠREAKCIJAS PROGNOZĒŠANA.....	22
7.3 UGUNŠREAKCIJAS PROGNOZĒŠANAS METOŽU PĀRBAUDE	23
7.4 UGUNŠREAKCIJAS PROGNOZĒŠANAS METOŽU PIELIETOŠANA.....	25
8 SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI	26
9 REKOMENDĀCIJAS	27

TABLE OF CONTENT

GENERAL DESCRIPTION.....	30
TOPICALITY OF THE RESEARCH.....	30
THE TARGET OF THE RESEARCH.....	31
THE RESEARCHES' TASKS:.....	31
THE RESEARCH METHODS.....	31
THE SCIENTIFIC NOVELTY.....	31
THE OBTAINED RESULTS AND THE PRACTICAL IMPORTANCE.....	32
THESIS STRUCTURE.....	32
1 LITERATURE REVIEW.....	32
2 GENERAL RESEARCH METHODS.....	33
2.1 SELECTION OF MATERIALS AND SPECIMEN PREPARATION.....	33
2.2 TEST METHODS AND EQUIPMENT.....	33
2.3 DATA PROCESSING AND ANALYSIS.....	33
3 DYNAMICS OF WOOD HEATING UP.....	34
4 FACTORS AFFECTING WOOD BURNING PROCESS.....	34
4.1 THE INFLUENCE OF WOOD MOISTURE CONTENT ON REACTION TO FIRE.....	35
4.2 THE INFLUENCE OF WOOD SPECIES ON REACTION TO FIRE.....	35
4.3 THE INFLUENCE OF TIMBER DIMENSIONS AND DESIGN MODE ON REACTION OF FIRE.....	35
4.4 THE INFLUENCE OF DIFFERENT COATINGS ON REACTION TO FIRE.....	36
4.5 THE INFLUENCE OF WOOD MODIFICATION ON REACTION TO FIRE.....	36
5 REACTION TO FIRE OF WOOD COMPOSITE MATERIALS.....	37
6 IMPROVEMENT OF WOOD REACTION TO FIRE AND FIRE RESISTANCE.....	38
6.1 RESEARCH OF FIRE RETARDANTS ACTION IN CONE CALORIMETER TESTS.....	38
6.2 INFLUENCE OF FIRE RETARDANTS ON THE DYNAMIC OF WOOD HEATING UP.....	39
6.3 INFLUENCE OF FIRE RETARDANTS ON THE CLASSIFICATION OF REACTION TO FIRE.....	39
7 PREDICTION OF WOOD MATERIALS' REACTION TO FIRE.....	40
7.1 THE METHODS OF WOOD MATERIALS' REACTION TO FIRE PREDICTION.....	40
7.2 THE PREDICTION OF REACTION TO FIRE OF WOOD COMPOSITE MATERIALS.....	40
7.3 THE VERIFICATION OF METHODS FOR REACTION TO FIRE PREDICTION.....	41
7.4 THE CARRYING INTO EFFECT THE METHODS FOR PREDICTION THE REACTION TO FIRE.....	42
8 CONCLUSIONS.....	42
9 RECOMMENDATIONS FOR PRACTICE.....	43

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Eiropas kokrūpniecības attīstības programmā „Roadmap 2010” paredzēts, ka līdz 2010. gadam koksne un kokmateriāli kļūs par galveno materiālu būvniecībā un apdarē. Lai to sasniegtu ir nepieciešams atrisināt daudzus koksnes pielietojuma jautājumus, tai skaitā tās konstrukciju ugunsdrošību. Koksnes plašāka pielietojuma sekmēšana ir viens no pamatuzdevumiem „Latvijas mežsaimniecības un uz koksnes resursiem balstītas rūpniecības tehnoloģiskās platformas vīzijā 2030”.

Latvijā koksni izmanto galvenokārt nelielu dzīvojamo ēku būvniecībā. Lielākās ēkās, piemēram, skolās, sporta hallēs u.c., to izmanto galvenokārt jumta konstrukcijās. Koksne pēc vidusmēra patērētāju domām ir neizturīga, piemērota vienīgi pagaidu risinājumiem. Daudzi arhitekti uzskata, ka tā nav piemērots būvmateriāls. Ļoti bieži tiek apšaubīta koksnes ugunsdrošība. Kopumā profesionāļi koksni vērtē kā mazvērtīgāku salīdzinājumā ar citiem konstrukciju materiāliem – tēraudu vai betonu.

Ļoti būtiski ir savlaicīgi risināt arī tehniskus un tehnoloģiskus jautājumus, jo, lai koksni un kokmateriālus varētu izmantot plašāk, ir jāpamato to atbilstība jaunajam pielietojumam, vai arī jārada jauni produkti, kas izstrādāti tieši jaunajai pielietojuma sfērai.

Koksne ir degošs materiāls, tās degšanas procesu ietekmē daudzi faktori, kuru ietekmes būtiskums nav izpētīts. Lai novērstu potenciālās barjeras koksnes produktu pielietošanai būvniecībā, kas varētu rasties informācijas trūkuma dēļ, nepieciešams veikt pētījumus par koksnes materiālu ugunsreakciju un ugunsdrošību ietekmējošajiem faktoriem, kā arī par ugunsdrošības uzlabošanas iespējām un praktiskiem paņēmieniem.

Latvijā ar 2008. gada 1. martu stājās spēkā jaunie būvju ugunsdrošības normatīvi LBN 201-2007, kuri paredz būvizstrādājumu pielietošanu izmantojot būvizstrādājumu klasifikāciju gan ugunsizturībā, gan ugunsreakcijā. Tādēļ kļūst aktuāla problēma par būvniecības produktu pielietošanu saskaņā ar jauno normatīvu, tajā skaitā tādu koksnes produktu, kuru ugunsreakcijas un ugunsizturības parametri nav zināmi.

Veicot situācijas priekšizpēti, noskaidrots, ka koksnes pielietošanai būvniecībā ir daudz ierobežojumu, un viens no galvenajiem iemesliem ir koka konstrukciju ugunsdrošība. Koksnes materiālu ugunsreakcijas pētījumi saskaņā ar Eiropas klasifikācijas sistēmu Latvijā iepriekš nav veikti un Eiropā šie jautājumi ir pētīti salīdzinoši maz.

Pētījuma mērķis

Darba mērķis ir noskaidrot koksnes materiālu un konstrukciju elementu ugunsdrošību ietekmējošos faktorus un to darbības pamatprincipus, izpētīt koksnes materiālu ugunsdrošības paaugstināšanas iespējas un izstrādāt koksnes materiālu ugunsreakcijas prognozēšanas metodes, balstoties uz ugunsdrošību ietekmējošo faktoru izpētes rezultātiem.

Darba uzdevumi

- apkopot un izanalizēt informāciju par koksnes un koksnes kompozītu materiālu ugunsreakciju un ugunsdrošību, ietekmējošajiem faktoriem un antipirēnu izmantošanu koksnes apstrādē;
- veikt pētījumu par koksnes uzsilšanas dinamiku dažādos siltuma starojumos;
- veikt pētījumus par koksnes un koksnes kompozītmateriālu ugunsreakciju ietekmējošajiem faktoriem;
- veikt pētījumus par koksnes un koksnes kompozītmateriālu ugunsreakcijas un ugunsdrošības uzlabošanas iespējām;
- izstrādāt koksnes materiālu ugunsreakcijas prognozēšanas metodes.

Pētījumu metodes

Pētījumi veikti ar mūsdienīgām iekārtām, tādām kā vienotā dedzināšanas iekārta (SBI), grīdas materiālu ugunsreakcijas noteikšanas iekārta (FRP), mazās liesmas tests un koniskais kalorimetrs, kas Eiropas standartizācijas sistēmā tiek izmantotas būvizstrādājumu ugunsreakcijas klasifikācijai, līdz ar to iegūtie dati ir viegli salīdzināmi ar citiem pētījumiem. Koniskā kalorimetra metode ir viena no visplašāk pielietotajām ugunsdrošības pētniecības metodēm pasaulē. Pētījumā veikti arī paralēli testi ar dažādām ugunsreakcijas metodēm, lai izvērtētu iespējamo datu korelāciju starp dažādām metodēm, kā arī gūtu vairāk informācijas par materiāla degšanas īpašībām dažādos apstākļos.

Zinātniskā novitāte

- izstrādātas koksnes un koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas prognozēšanas metodes;
- noteikti koksnes un koksnes kompozītu materiālu ugunsreakciju ietekmējošie faktori un to ietekme uz materiālu ugunsreakcijas klasi;
- izpētīta dažādu koksnes un koksnes konstrukciju ugunsdrošības paaugstināšanas metožu efektivitāte un izstrādāti priekšlikumi koksnes un koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas un ugunsizturības uzlabošanai;
- apkopota informācija par koksnes degšanas procesiem un degšanas procesu modelēšanu.

Iegūtie rezultāti un praktiskā nozīme

Izmantojot pētījuma rezultātā iegūtos datus, var spriest par dažādu koksnes materiālu ugunsdrošību un ugunsreakciju, projektējot būvēs koksnes materiālus. Pētījumā atspoguļoti visi būtiskākie faktori, kas ietekmē koksnes materiālu ugunsreakciju.

Izstrādātā aprēķinu metodika ērti izmantojama, ugunsreakcijas prognozēšanai dažādiem koksnes un koksnes kompozītu materiāliem, izvērtējot potenciālo atbilstību noteiktām ugunsreakcijas klasēm, neizmantojot destruktīvo testēšanu.

Praksē pētījuma rezultāti izmantojami ugunsdrošības nodrošināšanai projektējot būves, kurās izmantoti koksnes materiāli. Kopumā rezultāti veicinās koksnes materiālu pielietojumu būvniecībā.

Darba struktūra

Darbs strukturēts septiņās nodaļās:

1. nodaļa. Situācijas analīze par koksnes degšanas procesu, to ietekmējošajiem faktoriem, ugunsreakcijas pētījumu metodēm un antipirēniem;
2. nodaļa. Pētījuma vispārējā metodika;
3. nodaļa. Pētījums par koksnes uzsilšanas dinamiku dažādos siltuma starojumos;
4. nodaļa. Pētījums par koksnes ugunsreakciju ietekmējošajiem faktoriem;
5. nodaļa. Pētījums par koksnes kompozītu materiālu ugunsreakciju;
6. nodaļa. Pētījums par koksnes ugunsdrošības uzlabošanas iespējām un dažādu antipirēnu efektivitāti;
7. nodaļa. Koksnes materiālu ugunsreakcijas prognozēšanas metožu izstrāde.

Kopumā darbs noformēts uz 127 lpp., tas satur 102 attēlus un 26 tabulas.

Darbā izmantots 133 literatūras avots.

1 LITERATŪRAS APSKATS

Pirmajā nodaļā veikts literatūras apskats un analīze. Nodaļa iedalīta piecās apakšnodaļās. Galvenās tēmas, kas analizētas literatūras apskatā ir:

- koka konstrukciju ugunsdrošības un normatīvās vides apskats, Eiropas uguns klasifikācijas sistēma būvizstrādājumiem un testu metodes;
- koksnes degšanas process un tā matemātiskā modelēšana;
- koksnes aizdegšanās un pārogļošanās;
- koksnes ugunsreakciju ietekmējošie faktori, izmēri, ķīmiska uzbūve, mitruma saturs, konstruktīvais risinājums, blīvums, apdares materiāli, koksnes modifikācija
- koksnes ugunsreakcijas un ugunsizturības uzlabošanas iespējas ar antipirēniem, to iedarbības mehānismiem, ietekmes uz koksnes fizikāli-mehāniskajām īpašībām, dūmu veidošanos, ilgizturību un ietekmi uz vidi.

2 Pētījumu vispārējā metodika

2.1 Materiālu izvēle un paraugu sagatavošana

Promocijas darbā veikti dažādi pētījumi ar atšķirīgiem specifiskajiem mērķiem, kuru sasniegšanai izstrādāta individuāla metodika, kas aprakstīta katras pētījumu sadaļas sākumā. Kopējās iezīmes materiālu izvēlē un sagatavošanā:

- paraugu atlase veikta pēc gadījuma rakstura, nepievēršot uzmanību to izcelsmei;
- paraugu atlasē izslēgti zāģmateriāli ar izkritušiem zariem un sasveķojumiem, kas varētu ietekmēt pētījuma rezultātus;
- visi paraugi kondicionēti atbilstoši standarta LVS EN 13238 metodikai 50% gaisa relatīvajā mitrumā un 23 °C temperatūrā, ja specifiskajā pētījuma metodikā nav minēts savādāk;
- SBI testiem pēc standarta LVS EN 13823 paraugi izgatavoti ar izmēriem 1000 * 1500 mm un 495 * 1500 mm;
- SBI testiem atsevišķie zāģmateriāli skrūvēti uz līstēm ar šķērsriezuma izmēru 20 * 30 mm izmantojot kokskrūves 2 * 35 mm;
- paraugu skaits saskaņā ar standartu metodiku ir 5;
- testiem pēc LVS EN ISO 11925-2 izgatavoti paraugi ar izmēriem 90 * 250 mm;
- testiem pēc LVS ISO 5660-1 izgatavoti paraugi ar izmēriem 100 * 100 mm;
- Testiem pēc LVS EN ISO 9239-1 izgatavoti paraugi ar izmēru 230 * 1050 mm.

2.2 Testu metodes un aprīkojums

Pētījumā izmatotais aprīkojums un standartu saraksts ugunsreakcijas noteikšanai:

- LVS EN ISO 9239-1 - Grīdas segumu ugunsreakcijas noteikšana;
- LVS EN 13823 - Vienotā dedzināšanas iekārta (SBI);
- LVS EN ISO 11925-2 - Atsevišķa liesmas avota tests;
- LVS ISO 5660-1 - Koniskā kalorimetra tests.

Eksperimenti veikti saskaņā ar standarta metodēm, atsevišķos gadījumos ar atkāpēm no standartiem, pētījuma mērķu sasniegšanai.

2.3 Datu apstrāde un analīze

Datu apstrādei izmantotas statistiskās apstrādes metodes:

- aprakstošā statistika un datu savstarpējā salīdzināšana;
- korelācijas un regresijas analīze.

Faktoru būtiskuma novērtēšana

Tā kā ugunsreakcijas pētījumu paraugkopas ir mazas, tad faktoru ietekmes būtiskuma izvērtēšana ar standartizētām datu statistiskās apstrādes metodēm, piemēram, t- tests, ir apgrūtināta un nesniedz vēlamo rezultātu. Līdz ar to pētījumā izmantota tuvināta faktoru būtiskuma izvērtēšanas metode.

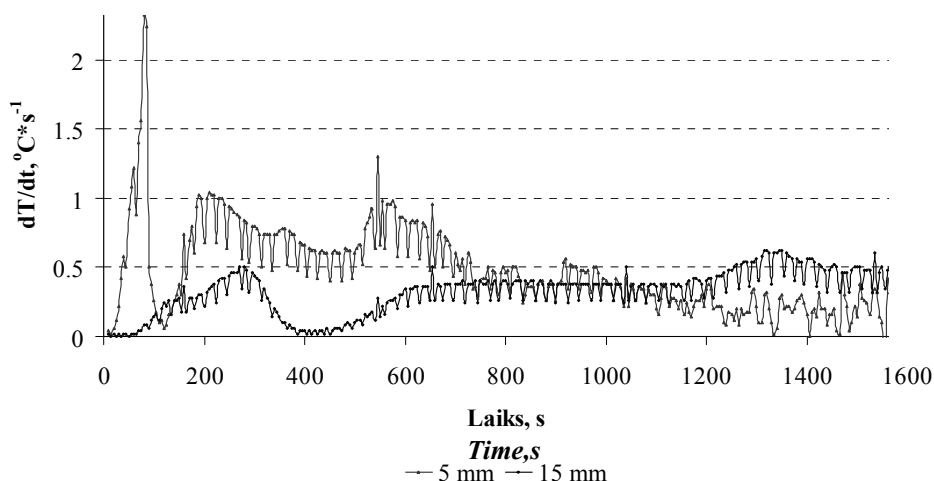
Ugunsreakciju ietekmējošo faktoru uzskata par būtisku, ja faktora vidējā vērtība ir ārpus vienas standartnovirzes robežas parametram ar kuru to salīdzina.

3 KOKSNES UZSILŠANAS DINAMIKA

Pirmā darba uzdevuma risināšanā izanalizēti iepriekš veiktie pētījumi par koksnes degšanas procesu, kā arī noskaidroti koksnes degšanas procesu ietekmējošie faktori. Noskaidrots, ka galvenais faktors koksnes degšanā ir koksnes temperatūra, līdz ar to ir svarīgi zināt koksnes uzsilšanas dinamiku, lai varētu prognozēt uguns attīstību. Intensīvs koksnes degšanas process var notikt tikai tad, kad sasniegta pirolīzes temperatūra – sākot no 200 °C.

Pētījumu rezultātā ir noskaidrots, ka koksnes degšanas procesa dinamiku būtiski ietekmē siltuma starojums kādam pakļauta koksne. Eksperimentālie pētījumi veikti gan zemos siltuma starojumos ($1-14 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) grīdu ugunsreakcijas testēšanas iekārtā, gan augstos siltuma starojumos ($50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) koniskajā kalorimetrā.

Analizēta ne tikai temperatūras izmaiņa, dažādos koksnes slāņos, bet arī temperatūras izmaiņas ātrums. Tā 3.1. attēlā uzrādīta temperatūras izmaiņas dinamika koksne 5 mm un 15 mm dziļumā to siltuma starojumam pakļautās virsmas.



3.1. att. Temperatūras izmaiņas ātruma dinamika egles koksne 5 un 15 mm dziļumā pie $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ siltuma starojuma.

Fig. 3.1. The dynamic of the temperature change in spruce wood at 5 and 15 mm depth at $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ heat flux.

No pētījumu rezultātiem par koksnes uzsilšanas dinamikas izpēti, var secināt:

- priedes koksnes kritiskā siltuma plūsma ir $3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, pie kuras koksnes degšanas process patstāvīgi vairs nav iespējams;

- kokmateriāla šķērsgriezumā, kas pakļauts siltuma starojuma iedarbībai, pastāv būtisks temperatūras gradients, kas ir koksnes materiālu galvenā priekšrocība;
- zemos siltuma starojumos (līdz $14 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) koksnes pašai degšanā nenotiek, pirolīzes procesa sākumā radušos degšanas produktu koncentrācija ir par mazu, lai notiktu pašai degšanā;
- koksnes uzsilšanas dinamika galvenokārt ir atkarīga no ārējā siltuma starojuma, kas ir mainīgs faktors un būtiski izmainās koksnes aizdegšanās brīdī;
- koksnes temperatūras izmaiņas ātrumu koksnes degšanas gadījumā var aptuveni pieņemt kā konstantu lielumu – $0.5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ koksnes virsējos slāņos (5 – 30 mm) un $0.05 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ iekšējos slāņos (vairāk par 40 mm), pie nosacījuma, ka siltuma starojums ir $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$;
- pieaugot koksnes mitruma saturam, palielinās otrās degšanas fāzes ilgums, kad koksnes temperatūra ir $100 \text{ }^\circ\text{C}$;
- rēķinot koksnes temperatūru noteiktā punktā, jāņem vērā koksnes pārogļošanās ātrums, kas samazina koksnes elementa šķērsgriezumu.

4 KOKSNES DEGŠANAS PROCESU IETEKMĒJOŠIE FAKTORI

Koksnes materiālu ugunsdrošība ir būtiskākais jautājums, kas jārisina, pielietojot koksnes materiālus būvēs. Šajā nodaļā apskatīti galvenie koka konstrukciju ugunsdrošību ietekmējošie faktori un to būtiskums.

Izanalizējot literatūru un pirmā pētījuma uzdevuma izpildes rezultātus, izvirzīti šādi pētnieciskie virzieni dažādu faktoru ietekmes uz koksnes degšanu izziņāšanai:

- koksnes mitruma satura ietekmes uz ugunsreakciju izpēti;
- koku sugas ietekmes uz ugunsreakciju izpēti;
- kokmateriālu izmēru un konstrukcijas ietekmes uz ugunsreakciju izpēti;
- dažādu apdares materiālu ietekmes uz ugunsreakciju izpēti;
- koksnes modifikācijas ietekmes uz ugunsreakciju izpēti.

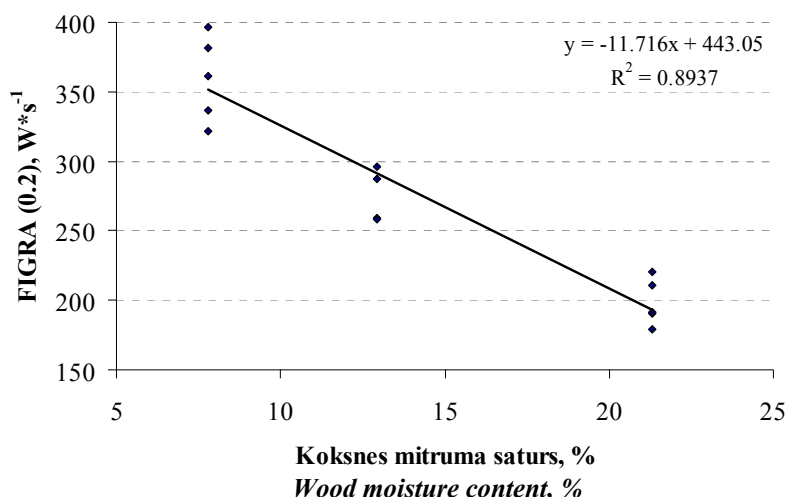
4.1 Koksnes mitruma satura ietekme uz ugunsreakciju

Pētījuma veikšanai izvēlēti egles (*Picea Abies* L.) koksnes zāgmateriāli ar nominālo biezumu 22 mm. Zāgmateriālu sākotnējais mitruma saturs ir 18 %. Lai pētījuma rezultāti būtu savstarpēji salīdzināmi, zāgmateriāli kalibrēti uz vienu biezumu – 20 mm.

Sagatavotas trīs zāgmateriālu koksnes mitruma grupas – 21 %, 13 % un 8 %, kas attiecīgi marķēti ar M, V un S.

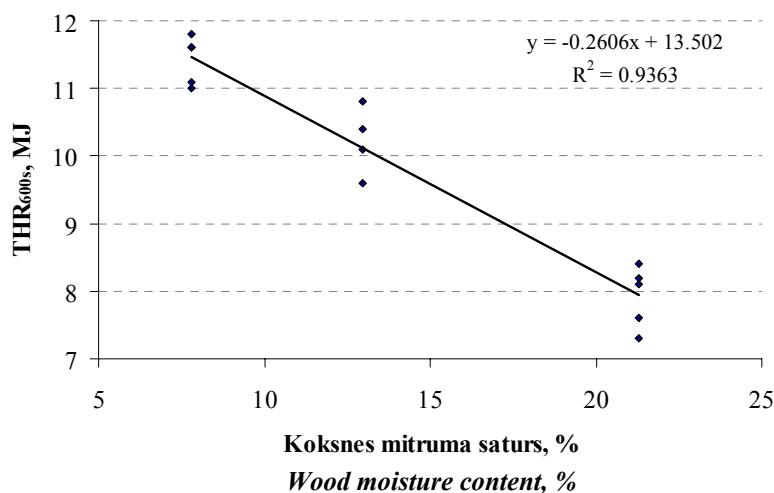
Lai novērtētu koksnes mitruma ietekmi uz ugunsreakcijas parametriem, veikta regresijas analīze un noteiktas sakarības 4.1. un 4.2. ugunsreakcijas parametru prognozēšanai atkarībā no egles koksnes mitruma. Sakarību grafiskais attēlojums dots 4.1. un 4.2. attēlos.

Koksnes mitruma saturs atstāj tiešu ietekmi uz degšanas parametriem FIGRA un THR, bet nav vērojama būtiska koksnes mitruma satura ietekme uz dūmu veidošanās parametriem SMOGRA un TSP. Pastāv cieša korelācija starp koksnes mitruma saturu un degšanas parametriem FIGRA un THR_{600s}.



4.1.att. Sakarība starp egles koksnes mitruma saturu un ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu (FIGRA0.2).

Fig. 4.1. Coherence between spruce wood moisture content and fire growth rate (FIGRA0.2)



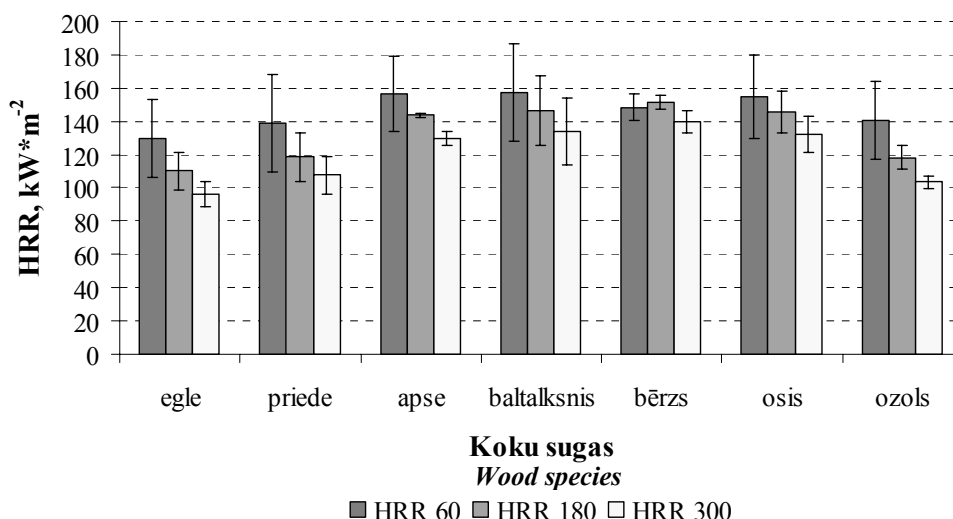
4.2.att. Sakarība starp egles koksnes mitruma saturu un kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā (THR_{600s}).

Fig. 4.2. Coherence between spruce wood moisture content and total heat release in 600 s (THR_{600s}).

4.2 Koku sugu ietekme uz ugunsreakciju

Dažādu koku sugu ietekmes uz koka izstrādājumu ugunsreakciju, atlasīti zāģmateriāli no visām galvenajām rūpnieciski izmantotajām Latvijā augošajām koku sugām (egle, priede, apse, baltalksnis, bērzs, osis, ozols). Koniskajā kalorimetrā pārbaudītas visas koku sugas, bet SBI testā egle, apse un baltalksnis.

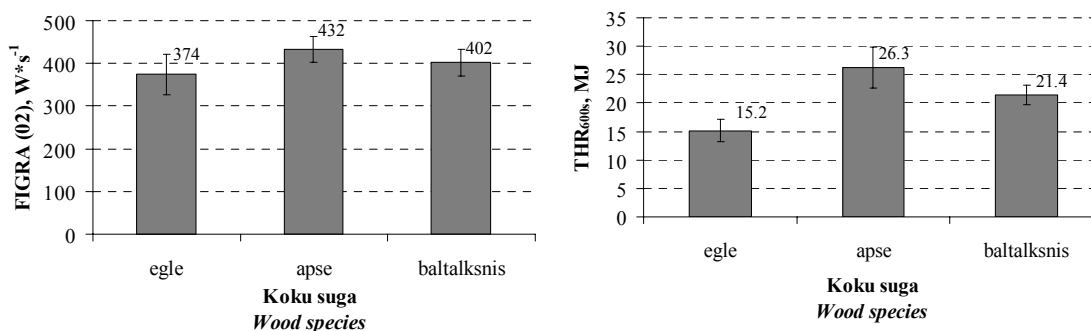
Koksnes degšanas dinamikas raksturošanai izmantota momentānā degšanas jauda dažādos laika momentos – 60-tajā s, 180-tajā s un 300-tajā s, skat. 4.3. att. Vismazāko degšanas jaudu uzrāda egles koksne, savukārt priedes un egles koksnei novērojama vislielākā degšanas jaudas samazināšanās pēc maksimālās vērtības sasniegšanas. Vislielāko degšanas jaudu uzrāda apses un baltalkšņa koksne, bet visvienmērīgāk noris bērza koksnes degšana.



4.3. att. Momentānā degšanas jauda (HRR) uz laukuma vienību 60-tajā, 180-tajā un 300-tajā s dažādām koku sugām.

Fig. 4.3. Heat release rate on area unit of different wood species (spruce, pine, aspen, grey alder, birch, ash, oak) at 60th, 180th and 300th s.

Veicot pētījumu SBI iekārtā trīs koku sugām, noskaidroti koku sugu īpatnību ietekme uz ugunsreakcijas rādītājiem, kas apkopoti 4.4. attēlā. Līdzīgi kā koniskā kalorimetra testu rezultātā, arī SBI testos egles koksne uzrādīja vislabākos rezultātus, lai gan apses koksnes degšanas FIGRA pieaugums par 15% ir salīdzinot ar egles koksni ir mazs, tomēr THR_{600s} pieaugums par 70% ir būtisks. Tas liecina par intensīvu degšanas attīstību un liesmu izplatību.



4.4. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) dažādām koku sugām.

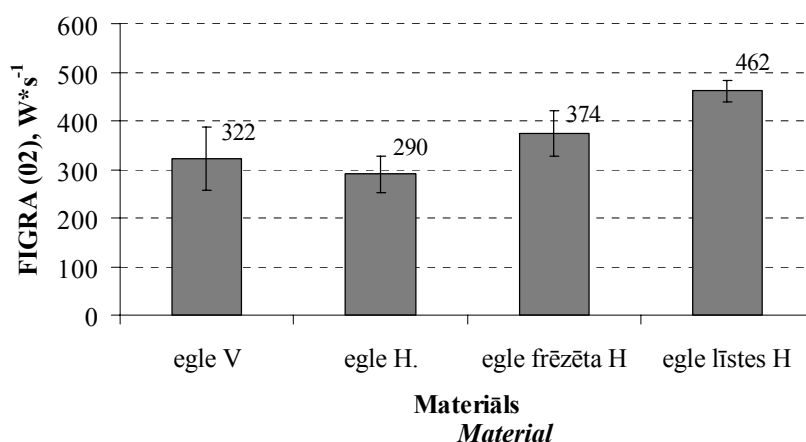
Fig. 4.4. Fire growth rate (FIGRA) and total heat release in 600 s (THR_{600s}) of different wood species (spruce, aspen, grey alder).

4.3 Kokmateriālu izmēru un konstrukcijas ietekme uz ugunsreakciju

Koksnes elementu izmēriem var būt būtiska ietekme uz koksnes degšanu. Masīvām koka konstrukcijām ir ļoti laba noturība ugunsgrēka laikā, savukārt koksnes elementi ar mazu šķērsgriezumu aktīvi piedalās degšanā un izdala lielu siltuma jaudu. Pētījumā novērtēts koksnes materiālu izmēru un konstrukcijas ietekme uz ugunsreakciju un ugunsgrēka attīstību. Pētījumam izvēlēti egles koksnes zāgmateriāli ar zāģētu virsmu (virsmas raupjums Rm 200 – 500 μm) un egles zāgmateriāli ar frēzētu virsmu (virsmas raupjums Rm < 100 μm).

Koksnes konstruktīvajam risinājumam var būt izšķiroša loma ēku ugunsdrošībā un uguns attīstībā.

Dažādu konstruktīvo risinājumu ugunsreakcijas parametri apkopoti 4.5. un 4.6. att.

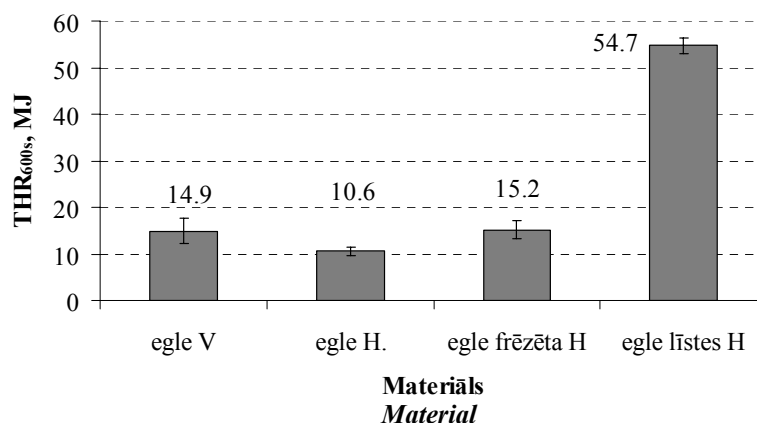


4.5. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) egles zāgmateriāliem ar atšķirīgu orientāciju un virsmu apstrādi,

egle V – egles zāgmateriāli ar vertikālu šķiedru orientāciju, egle H – egles zāgmateriāli ar horizontālu šķiedru orientācija, egle frēzēta H – egles zāgmateriāli ar frēzētu virsmu horizontālā orientācijā, egle līstes H – egles zāgmateriālu līstes horizontālā orientācijā.

Fig. 4.5. Heat release rate (FIGRA) of spruce sawn timber with different grain orientation and different surface roughness,

egle V – spruce sawn timber with vertical grain orientation, egle H – spruce sawn timber with horizontal grain orientation, egle frēzēta H – spruce sawn timber with planed surface in horizontal orientation, egle līstes H – spruce sawn timber slats in horizontal orientation.



4.6. att. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) egles zāgmateriāliem ar atšķirīgu orientāciju un virsmu apstrādi.

Fig. 4.6. Total heat release in 600 s (THR_{600s}) of spruce sawn timber with different grain orientation and different surface roughness.

4.4 Dažādu apdares materiālu ietekme uz ugunsreakciju

Lielākā daļa apdares materiālu pamatā sastāv no organiskajiem savienojumiem, kuru sadegšanas siltums ir būtiski augstāks nekā koksnei. Tā kā koksnes izstrādājumi netiek ekspluatēti bez apdares, tad jānoskaidro tieši apdares pārklājuma ietekmi uz koksnes aizdegšanos un liesmu izplatību. Paraugu sagatavošanai izvēlēts saplāksnis ar 12 mm biezumu, lai maksimāli samazinātu pamatnes ietekmi uz ugunsreakcijas parametriem. Apdares materiāli praktiski visi ir degoši un visbiežāk ar diezgan ievērojamu enerģētisko vērtību, kas ievērojami augstāka nekā koksnes vielai. Pētījumā noskaidrota apdares materiālu ietekme uz materiāla ugunsreakcijas parametriem. Pētījumam tika izvēlēti rūpnieciski plaši izmantoti 8 dažādi Becker Acroma apdares materiāli un nitrolaka, kas izgatavota Latvijā.

Apkopojot rezultātus var secināt, ka apdares pārklājums ietekmē parauga aizdegšanās laiku. Atkarībā no apdares materiāla veida, parauga aizdegšanās laiks var būt ātrāks vai vēlāks nekā neapstrādātai koksnei. Vislabākos rezultātus šajā eksperimentā uzrādīja ūdensbāzes krāsa un laka, kā arī ar eļļu apstrādāta koksne.

Ja datus salīdzina, izvērtējot liesmas radītos bojājumus, tad par neapstrādātu koksni labākus rezultātus uzrāda tikai ūdensbāzes krāsas un eļļas apdare. Pārējie apdares materiāli uzrāda lielākus liesmas izplatības parametrus. Paraugi ar nitrolakas apdari uzrādīja vissliktākos rezultātus, vērtējot pēc visiem kritērijiem.

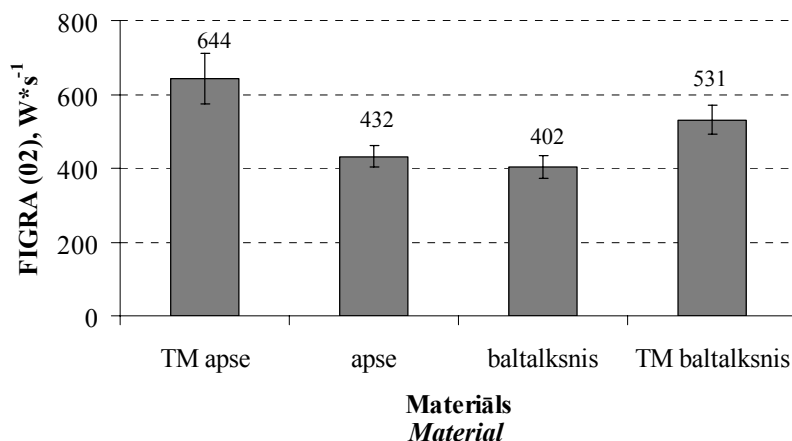
Pārbaudot paraugus ar nitrolakas apdari SBI testā, konstatēts, ka ugunsreakcijas parametru pieaugums nav būtisks, ugunsreakcijas klases pazemināšanai.

4.5 Koksnes modifikācijas ietekme uz ugunsreakciju

Pēc literatūras analīzes noskaidrots, ka koksnes modifikācija var atstāt ietekmi uz koksnes degšanas procesu un ugunsreakciju, taču šie jautājumi Eiropā ir maz pētīti. Izanalizējot pētījuma aktualitāti, izvēlēti divi modificētas koksnes produkti – termiski modificēta koksne un acetilēta koksne. Termiski modificēta koksnes arvien vairāk izplatās Eiropas tirgū, iegūstot aizvien plašāku pielietojumu. Pētījumā pārbaudīta termiskās modifikācijas un acitilēšanas ietekme uz koksnes ugunsreakciju, izmantojot konisko kalorimetru, SBI un grīdu ugunsreakcijas testēšanas iekārtas.

Visiem materiāliem veikti testi koniskajā kalorimetrā $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ siltuma starojumā, kā rezultātā novērots, ka modificētas koksnes ugunsreakcijas parametri ir par 5 – 15 % sliktāki, nekā nemodificētai koksnei.

Lai novērtētu koksnes termiskās modifikācijas ietekmi uz ugunsreakcijas klasifikāciju, veikti testi liela mēroga iekārtā SBI. Koniskā kalorimetra testos iegūtās tendences apstiprinājās, iezīmējot vēl būtiskāku termiskās modifikācijas ietekmi uz ugunsreakcijas parametriem. Testa laikā novērota pastiprināta uguns attīstība termiski modificētas apsei, uzrādot par 50 % lielāku FIGRA indeksu un par 60 % lielāku $\text{THR}_{600\text{s}}$ nekā nemodificētai apses koksnei, skat. 4.7. un 4.8. att. Baltalkšņa koksnei šī ietekme ir mazāka – 30 % FIGRA indeksam un 40 % $\text{THR}_{600\text{s}}$.

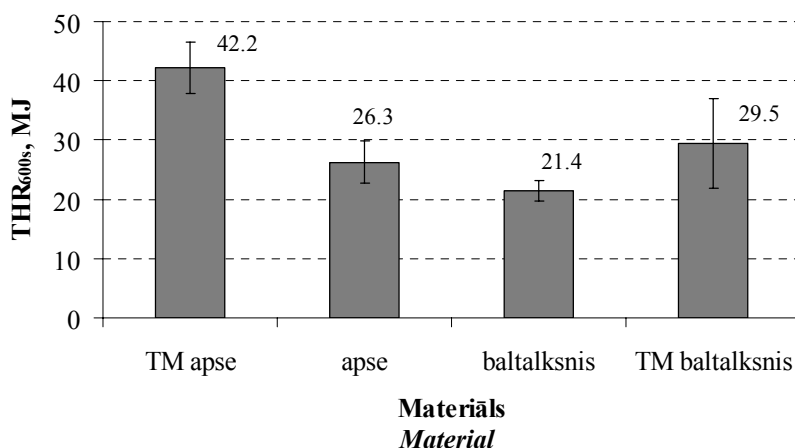


4.7. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) dažādām koku sugām un termiski modificētai koksnei,

TM apse – termiski modificēta apse, apse – nemodificēta apses koksne, baltalksnis – egles nemodificēta baltalkšņa koksne, TM baltalksnis – termiski modificēts baltalksnis.

Fig. 4.7. Heat release rate (FIGRA) of different wood species and thermally modified wood,

TM apse – thermally modified aspen, apse – aspen wood, baltalksnis – grey alder wood, TM baltalksnis – thermally modified gray alder.



4.8. att. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) dažādām koku sugām un termiski modificētai koksnei.

Fig. 4.8. Total heat release in 600 s (THR_{600s}) of different wood species and thermally modified wood.

No pētījumu rezultātiem par koksnes degšanas procesu ietekmējošajiem faktoriem, var secināt:

- koksnes mitruma saturs tieši ietekmē koksnes degšanas procesu, pastāv cieša korelācija starp mitruma saturu koksne un rādītājiem FIGRA un THR_{600s}. Teorētiski ir iespējams aprēķināt egles koksnes degšanas parametrus FIGRA un THR_{600s} attiecīgi pēc sakarībām $y = -11.716x + 443.05$ un $y = -0.2606x + 13.502$,
- koksnes mitruma saturs neietekmē dūmu veidošanās rādītājus SMOGRA un TSP_{600s};
- pastāvot dažādām ēku ekspluatācijas klasēm, koksnes līdzsvara mitrums var būt no 8 – 25 %, un pie šāda koksnes mitruma satura izkliedes diapazons ir vērojamas krasas koksnes materiālu ugunsreakcijas parametru izmaiņas, piemēram, FIGRA sausiem (7%) egles zāģmateriāliem ir par 81% lielāks nekā mitriem (21 %) egles koksnes zāģmateriāliem un THR attiecīgi par 44 % lielāks;

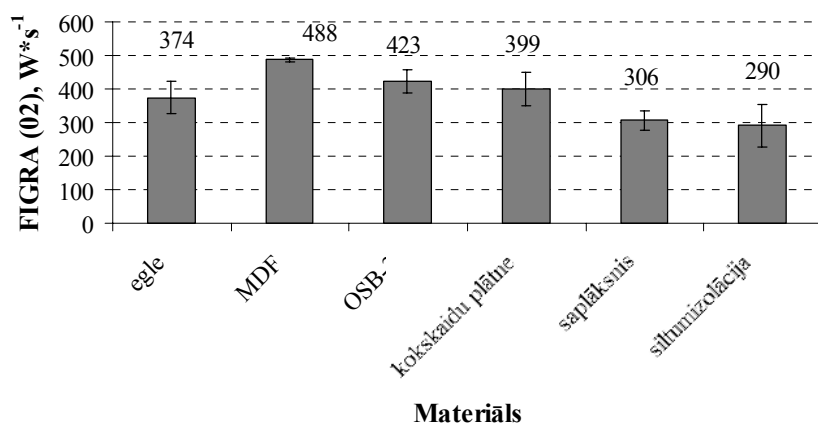
- koksne ir higroskopisks materiāls, un mitruma saturs koksnē ir būtisks faktors, kurš jāņem vērā projektējot ēku ugunsdrošību;
- koku sugu ietekme uz ugunsreakcijas parametriem ir būtiska – līdz 20 % FIGRA indeksa un līdz 80 % THR_{600s} starpība starp Latvijā augošajām koku sugām, un tā ir atkarīga galvenokārt no koksnes uzbūves īpatnībām;
- lapu koku koksnes degšanas gadījumā izdalīto dūmu daudzums ir būtiski mazāks nekā skujkokiem, kas ļauj koksnes materiālus klasificēt ar s1 ugunsreakcijas papildus indeksu;
- ārējam siltuma starojumam ir būtiska ietekme uz koksnes aizdegšanās laiku, kas mainās kā pakāpes funkcija no siltuma starojuma vērtībām, kā arī ievērojama ietekme uz koksnes degšanas jaudu, kas mainās pēc lineāras funkcijas atkarībā no siltuma starojuma;
- koksnes materiālu izmantošana dažādos konstruktīvajos risinājumos maina arī konstrukciju ugunsreakcijas parametrus. Konstrukciju ugunsreakcijas parametrus ietekmē, virsmu kvalitāte, koksnes šķiedru orientācija, kā arī atsevišķu elementu izmēri un to izvietojums;
- ja koksnes materiāli ir definējami kā termiski biezi, tad to ugunsreakcijas klase nav zemāka par D, tomēr atsevišķu elementu izmēri un to izvietojums var vairākkārtīgi palielināt kopējo izdalīto siltuma daudzumu, kas savukārt paātrina vispārējo uzliesmošanu ugunsgrēka gadījumā;
- apdares materiāli neatstāj būtisku ietekmi uz ugunsreakcijas klasifikācijas parametriem FIGRA un THR_{600s}, jo to daudzums ir mazs uz laukuma vienību;
- daži apdares materiāli var vairākkārtīgi samazināt koksnes aizdegšanās laiku, kā arī veicināt liesmu izplatību;
- koksnes termiskā modifikācija un acetilēšana, pasliktina ugunsreakcijas parametrus, un ietekme var būt kritiska, materiāla pāriešanai zemākā ugunsreakcijas klasē.

5 Koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcija

Ar koksnes kompozītu materiāliem šajā pētījumā apzīmēti koksnes plātņu materiāli, kuru izgatavošanā izmantota koksne un saistvielas. Pētījumi veikti plašāk izplatītajiem koksnes kompozītu materiāliem. Tā kā koksnes kompozītu materiālos būtisku apjomu sastāda saistvielas, tad koksnes kompozītu materiālu degšanas process atšķiras no masīvkoksnes degšanas.

Izvirzītais pētījuma uzdevums ir veikt dažādu koksnes materiālu veidu ietekmes uz ugunsreakciju izpēti.

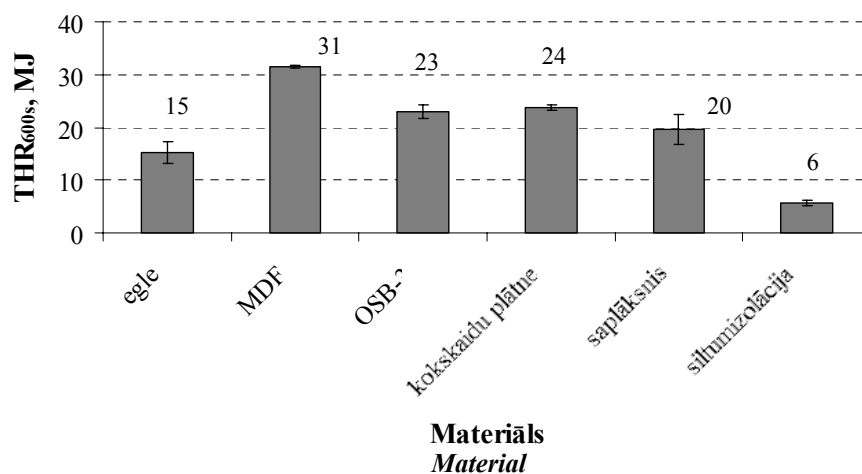
Pētījumā noskaidroti dažādu koksnes plātņu materiālu un celulozes siltumizolācijas materiāla ugunsreakcijas parametri, kas salīdzināti ar egles koksnes ugunsreakcijas parametriem. FIGRA indeksu apkopojums dots 5.1. attēlā. Salīdzinot ar egles masīvkoksnes ugunsreakcijas parametriem, tikai saplākšņi uzrādīja labākus rādītājus, savukārt MDF degšanas gadījumā FIGRA indekss ir par 30 % lielāks nekā egles koksnei.



5.1. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) dažādiem koksnes kompozītu materiāliem.

Fig. 5.1. Heat release rate (FIGRA) of different wood composite materials, egle – spruce, MDF – medium density fiber board, OSB-3 – orientated strand board, kokskaidu plātne – wood particle board, saplāksnis – birch plywood, siltumizolācija – cellulose heat insulation material.

Vēl būtiskāku ietekmi var novērot salīdzinot THR_{600s} vērtības, skat. 5.2. att. Visiem plātņu materiāliem THR_{600s} ir par 30 % līdz 100 % lielāks nekā egles koksnei. Šo lielo starpību daļēji var skaidrot ar materiāla biezuma atšķirību, tomēr pirmajās 600 s no testa sākuma neviens materiāls neizdeg cauri un liesmu attīstība parauga otrā pusē sākas tikai pēc 600-tās s.

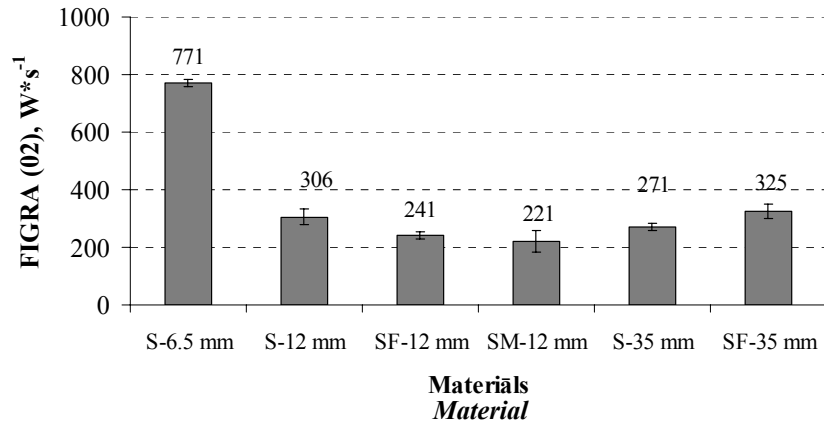


5.2. att. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) dažādiem koksnes kompozītu materiāliem.

Fig. 5.2. Total heat release in 600 s (THR_{600s}) of different wood composite materials.

Lai novērtētu plātņu materiālu biezuma ietekmi uz ugunsreakcijas parametriem, veikts pētījums dažāda biezuma un tipa saplākšņu materiāliem. Būtiskāko ugunsreakcijas parametru vērtības dažādiem saplākšņu materiāliem dotas 5.3. un 5.4. attēlos.

Salīdzinot FIGRA un THR_{600s} vērtības, būtiski izceļas standarta bērza saplāksnis ar biezumu 6.5 mm, kura FIGRA ir par 150 % un THR_{600s} par 225 % lielāks nekā saplāksnim ar biezumu 12 mm.

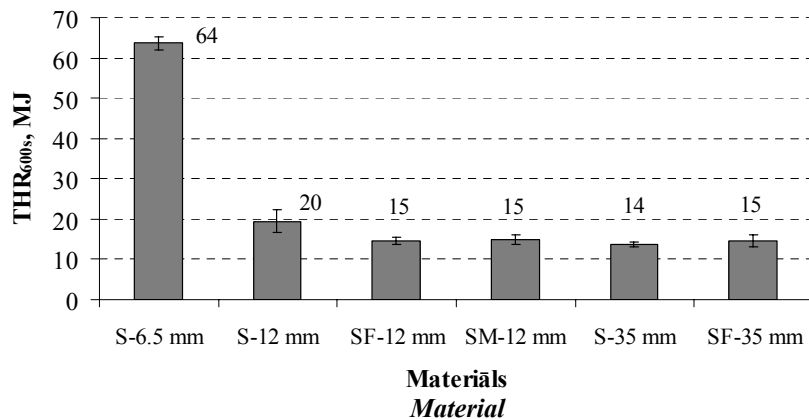


5.3. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) dažādiem saplākšņiem.

S-6.5 mm –standarta bērza saplākšnis 6.5 mm biezumā, S-12 mm – standarta bērza saplākšnis 12 mm biezumā, SF-12 mm –ar fenola filmu laminēts bērza saplākšnis 12 mm iezumā, SM-12 mm – ar mealamīna filmu laminēts bērza saplākšnis 12 mm biezumā, S-35 mm – standarta bērza saplākšnis 35 mm biezumā, SF-35 mm- ar fenola filmu laminēts bērza saplākšnis 35 mm biezumā.

Fig. 5.3. Heat release rate (FIGRA) of different plywood materials,

S-6.5 mm –standard birch plywood with 6.5 mm thickness, S-12 mm – standard birch plywood with 12 mm thickness, SF-12 mm –phenol film laminated birch plywood with thickness 12 mm, SM-12 mm – melamine film laminated birch plywood with thickness 12 mm, S-35 mm – standard birch plywood with thickness 35 mm, SF-35 mm- phenol film laminated birch plywood with thickness 35 mm.



5.4. att. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) dažādiem saplākšņiem.

Fig. 5.3. Total heat release in 600 s (THR_{600s}) of different plywood materials.

No pētījumu rezultātiem par koksnes kompozītu materiālu degšanas procesu, var secināt:

- koksnes kompozītu materiālu degšanas procesa intensitāte un degšanas jauda ir lielāka nekā masīvkoksnei izņemot saplākšņus, un koksnes kompozītu materiāla veidam ir būtiska loma materiāla ugunsdrošībā,
- termiski plānu koksnes kompozītu materiālu degšanas process noris ar vairākkārtīgi lielāku degšanas jaudu un ievērojamu izplatības ātrumu, kas pazemina materiāla ugunsreakcijas klasi uz E,
- plātņu materiālu biezums būtiski neietekmē ugunsreakcijas parametrus, ja to biezumu var definēt kā termiski biezu, kas ir vismaz 10 – 15 mm,
- koksnes kompozītu materiālu izgatavošanas procesā var pievienot antipirēnus, kas radikāli var mainīt degšanas procesa norisi, līdz ar to koksnes kompozītu materiāli var tikt klasificēti E, D, C un B ugunsreakcijas klasēs atkarībā no izmantoto materiālu kombinācijas.

6 KOKSNES UGUNSDROŠĪBAS UN UGUNSIKTURĪBAS UZLABOŠANA

Vispopulārākais koksnes ugunsdrošības uzlabošanas paņēmieni ir koksnes apstrāde ar antipirēniem, taču šobrīd Latvijā pieejamo antipirēnu ugunsreakcijas klase nav noteikta un nav zināmi dati par to ietekmi uz koksnes ugunsreakciju. Tirgū pieejami dažāda tipa antipirēni, kurus principiāli var iedalīt divās grupās – koksnes apstrāde ar piesūcināšanas metodi un koksnes apstrāde ar apdares pārklājumu.

Lai gūtu pilnīgāku priekšstatu par Latvijā ražoto un tirgoto antipirēnu īpašībām un to darbības efektivitāti, veikts pētījums par Latvijā pieejamo antipirēnu darbības mehānismu dažādos siltuma starojumos.

Pētījumā pārbaudīti 8 dažādi antipirēni, kuru identifikācija un piešķirtais marķējums dots 6.1. tabulā.

6.1. tabula
Table 6.1.

Antipirēnu izvēle un to identifikācija *Fire retardant treatment and its marking*

Nr. No.	Nosaukums <i>Brand name</i>	Ražotājs <i>Manufacturer</i>	Apraksts <i>Description</i>	Patēriņš <i>consumption</i> g·m ⁻²	Marķējums <i>Marking</i>
1.	Unitherm AWR	Du Pont Performance GmbH, Vācija	Ugunsizturīga caurspīdīga laka koksnei	400	A-1
2.	Plamostop	ing Josef Hurban-Izostav, Čehija	Bezkrāsaina uguns aizsardzības laka koksnei	250	A-2
3.	Kafurs-4	SIA "Ritols", Latvija	Caurspīdīga poliuretāna laka	230	A-3
4.	Brandschutz	Remmers baustoff technik GmbH, Vācija	Uzputojošu slāni veidojošs uguns aizsardzības līdzeklis koksnei	350	A-4
5.	Tents	Izplatītājs SIA „Katekss”	Neorganisku sāļu un virsmas aktīvu vielu piesātināts ūdens šķīdums	400	A-5
6.	Antipirēns	SIA "V Perro" Latvija	Neorganisku sāļu un virsmas aktīvu vielu piesātināts ūdens šķīdums	400	A-6
7.	KA - 1U	SIA "Melder V" Latvija	Neorganisku sāļu un virsmas aktīvu vielu piesātināts ūdens šķīdums	400-450	A-7
8.	Antipirēns FAP	SIA "Firma Latakva" Latvija	Neorganisku sāļu un virsmas aktīvu vielu piesātināts ūdens šķīdums	200-400	A-8
9.	Neapstrādāta koksne <i>Untreated wood</i>	-	Egles koksne bez apdares <i>Spruce wood without any treatment</i>	-	K

Antipirēnu darbības pētījums koniskajā kalorimetrā

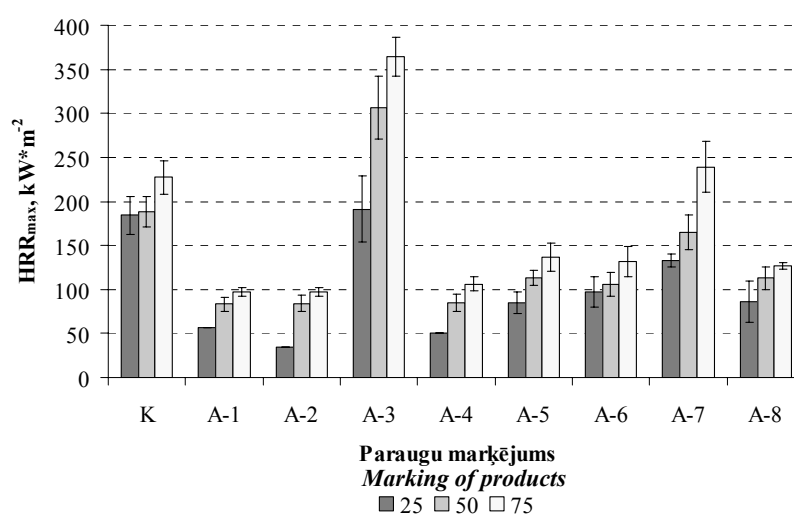
Materiālu ugunsdrošību ugunsgrēka attīstības apstākļos var skatīt divos aspektos: materiāla aizdegšanās un liesmu attīstība tieša liesmas avota iedarbībā un materiāla aizdegšanās siltuma starojuma ietekmē. Pirmais scenārijs raksturīgs ugunsgrēka sākotnējā

attīstības stadijā, kad ugunsgrēka izraisītājs degot pakļauj materiālus tiešu liesmu iedarbībai. Otrais scenārijs jau sākas pirmā darbības laikā, kad dūmgāzes ar pieaugošu temperatūru rada pieaugošu, laikā mainīgu siltuma starojumu uz apkārtējām konstrukcijām.

Šajā nodaļā apskatītie pētījumu rezultāti atspoguļo dažādu antipirēnu darbības efektivitāti dažādos siltuma starojumos.

Materiālu ugunsreakcijas parametrus būtiski ietekmē siltuma starojums un pie salīdzinoši zema siltuma starojuma ($25 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) ugunsreakcijas parametri ievērojami atšķiras no pētījuma datiem lielākos siltuma starojumos, pie tam vērojama ļoti liela datu izkliede.

Antipirēnu darbība izpaužas galvenokārt testa sākumā, pēc tam efektivitāte samazinās un koksnes degšanas process notiek pēc līdzīga scenārija kā neapstrādātai koksnei. Antipirēni būtiski samazina maksimālo degšanas jaudu, kas veidojas koksnes aizdegšanās sākuma stadijā, skat. 6.1. att. Antipirēns A-7 nepilda aizsardzības funkcijas, jo kopumā vērtējot rezultāti ir tādi, kā neapstrādātas koksnes degšanas gadījuma vai pat sliktāki.



6.1. att. Koksnes maksimālā degšanas jauda (HRR_{max}) trīs siltuma starojumos ($25, 50$ un $75 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) dažādiem antipirēniem.

Fig. 6.1. Maximal heat release rate of different fire retardant treated materials at tree different heat fluxes ($25, 50$ un $75 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$).

Antipirēnu ietekme uz koksnes uzsilšanas dinamiku

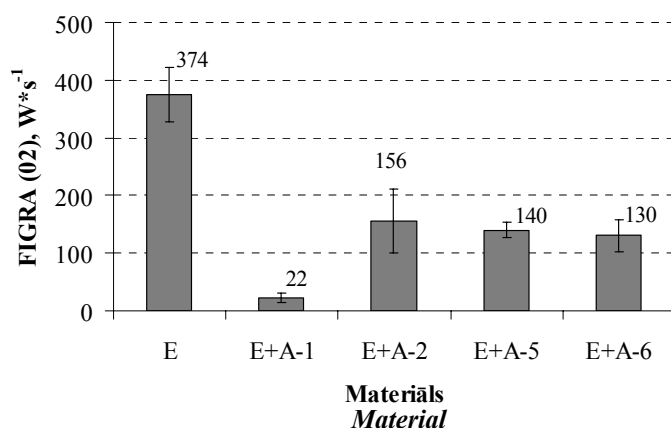
Veicot pētījumu par antipirēnu ietekmi uz koksnes uzsilšanas dinamiku, noskaidrots, ka atkarībā no uguns aizsardzības līdzekļa tipa, koksnes materiālu virsējie slāņi var uzsilt gan ātrāk, gan lēnāk salīdzinot ar neapstrādātu koksni. Tikai termokīmiski reaģējošie antipirēni (A-1, A-2 un A-4) samazina koksnes uzsilšanas ātrumu, skat. 6.6. – 6.8. att. Jo dziļāk no degošās koksnes virsmas, jo antipirēnu ietekme uz koksnes uzsilšanu ir mazāka. Visstraujākais temperatūras kāpums visos mērījuma punktos ir ar antipirēnu A-3 apstrādātai koksnei, kas skaidrojams ar straujo virsmas aizdegšanos un papildu siltuma starojumu, kas rodas sadegot poliuretāna lakai.

Antipirēnu ietekme uz ugunsreakcijas klasifikāciju

Pētījumā veikta četru dažādu Latvijas tirgū pieejamu antipirēnu efektivitātes novērtēšana nosakot to ugunsreakcijas parametrus uz egles koksnes zāgmateriāliem. Galvenie ugunsreakcijas parametri apkopoti 6.2. un 6.3. att.

Visi antipirēni uzrāda būtisku FIGRA indeksa un $\text{THR}_{600\text{s}}$ samazinājumu. Īpaši jāatzīmē ar antipirēnu A-1 apstrādāta koksne, kas uzrāda par 95 % mazāku FIGRA indeksu

un par 85 % mazāku THR_{600s} . Līdzīgus rezultātus var novērot arī antipirēnam A-2, taču termoķīmiskās reakcijas rezultātā dūmgāzēs samazinās skābekļa saturs, ko iekārta fiksē kā degšanu, un līdz ar to tiek uzrādīts paaugstināts FIGRA(0.2), bet FIGRA(0.4) ir $37 \text{ W}\cdot\text{s}^{-1}$.

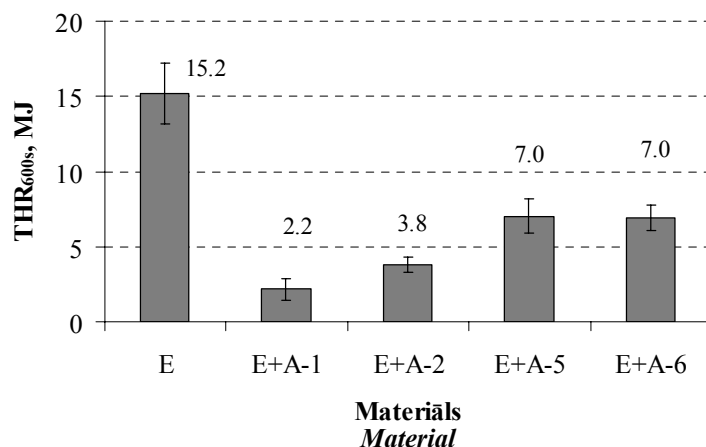


6.2. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA) ar antipirēniem apstrādātai egles koksnei.

Fig. 6.2. Fire growth rate (FIGRA) of different fire retardant treated spruce wood materials.

Sāļu bāzes antipirēni A-5 un A-6 uzrāda vienādus rezultātus un par 60 % mazāku FIGRA indeksu, kā arī 50 % mazāku THR_{600s} nekā neapstrādātai koksnei, kas dot iespēju šādi apstrādātu koksni klasificēt C ugunsreakcijas klasē.

Salīdzinot 600 s izdalīto dūmu daudzumu, var novērot nelielu samazinājumu, kas ir tuvu papildu klasifikācijas indeksa s1, s2 robežvērtībai – 50 m^2 . Antipirēnu A-1 un A-2 lietošanas gadījumā var iegūt s1 papildu klasifikācijas indeksu.



6.3. att. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) ar dažādiem antipirēniem apstrādātai egles koksnei.

Fig. 6.3. Total heat release in 600 s (THR_{600s}) of different fire retardant treated spruce wood materials.

Koksnes degšanas procesa dinamikas izpētei izmanto HRR, FIGRA un THR izmaiņu laikā. Visi antipirēni novērš strauju degšanas jaudas pieaugumu testa sākumā, salīdzinot ar neapstrādātu koksni. Ar uguns antipirēniem A-1 un A-2 apstrādātas koksnes degšanas process sākas ar 300 – 360 s aizkavēšanos salīdzinot ar neapstrādātu koksni un noris ar 5 – 6 reizes

mazāku siltuma jaudu. Degšanas process ir vienmērīgs un sāk pieaugt pēc 1100-tās s no testa sākuma, kad paraugs sāk degt no otras puses, kas nav apstrādāta. Būtiski ir atzīmēt kopējā izdalītā siltuma daudzuma samazinājumu, kas ar A-1 un A-2 apstrādātajiem kokmateriāliem testa laikā ir 2 – 4 reizes mazāks nekā neapstrādātai koksnei.

No pētījumu rezultātiem par koksnes kompozītu materiālu degšanas procesu, var secināt:

- izmantojot antipirēnus koksnes apstrādei, var panākt koksnes ugunsreakcijas klasifikācijas uzlabošanu par vienu vai divām ugunsreakcijas klasēm;
- ar termokīmiski reaģējošiem antipirēniem, kas temperatūras ietekmē veido izolējošu nedegošu putu slāni, var vairākkārtīgi uzlabot koka konstrukciju ugunsreakcijas parametrus un iegūt augstāko ugunsreakcijas klasi B, kas iespējama koksnes produktiem;
- antipirēnu Kafurs-4 un KA-1U izmantošana neuzlabo koksnes ugunsreakcijas parametrus pētījumos ar koniskā kalorimetra metodi;
- katram antipirēnam ir ievērojami atšķirīga efektivitāte, līdz ar to nevar pētījuma rezultātus vispārināt uz citiem antipirēniem, tas nozīmē, ka katram antipirēnam ir jānosaka potenciālā ugunsreakcijas klase, kas ir atkarīga arī no koku sugas, materiāla veida, konstrukcijas elementu izmēriem, un apstrādes tehnoloģijas;
- visi antipirēni būtiski zaudē efektivitāti pieaugot siltuma starojumam;
- tikai termokīmiski reaģējošie antipirēni samazina koksnes uzsilšanas ātrumu, pārējie pētījumā izmantotie antipirēni palielina vai neietekmē koksnes uzsilšanas ātrumu;
- antipirēnu izpētē ar konisko kalorimetru un SBI novērotas būtiskas atšķirības, SBI testi uzrāda labākus rezultātus nekā koniskā kalorimetra metode, kas skaidrojams ar mainīgu un salīdzinoši mazu siltuma starojumu SBI iekārtā;
- SBI testa metode neobjektīvi novērtē potenciālo ugunsdrošības risku ar antipirēniem apstrādātas koksnes gadījumā, jo testā materiāls tiek pakļauts zemiem siltuma starojumiem, bet antipirēni būtiski zaudē efektivitāti, pieaugot siltuma starojumam.

7 KOKSNES MATERIĀLU UGUNŠREAKCIJAS PROGNOZĒŠANA

7.1 Koksnes ugunsreakcijas prognozēšanas metodes

Koksnes materiālu ugunsreakcijas prognozēšana ir komplicēts jautājums, jo koksnes materiālu degšanas procesu ietekmē daudzi faktori, kā arī faktoru mijiedarbība. Ugunsreakcijas prognozēšanai izmanto vienkāršotu empīrisku aprēķinu metodes izstrādi pamatojoties uz eksperimentāli iegūtajiem datiem.

Tā kā koksnes kompozītu materiāli būtiski atšķiras no masīvkoksnes, tad izstrādātas atsevišķas FIGRA un THR_{600s} prognozēšanas metodes masīvkoksnes materiāliem un koksnes kompozītu materiāliem.

Masīvkoksnes degšanas gadījumā galvenie ugunsreakciju ietekmējošie faktori ir koksnes mitrums, koku suga, virsmu apstrāde un materiāla biezums. FIGRA(0.2) un FIGRA(0.4) koksnes materiāliem ir vienāds, tāpēc aprēķinos izmantots apzīmējums FIGRA, kas attiecināms uz abiem indeksiem. Izstrādāti empīriski vienādojumi FIGRA un THR_{600s} prognozēšanai, skat. 7.1. un 7.2. sakarības.

$$\text{FIGRA} = 450(1 - 0.026W) \cdot k_s \cdot k_v \cdot k_b \cdot k_a, \quad (7.1)$$

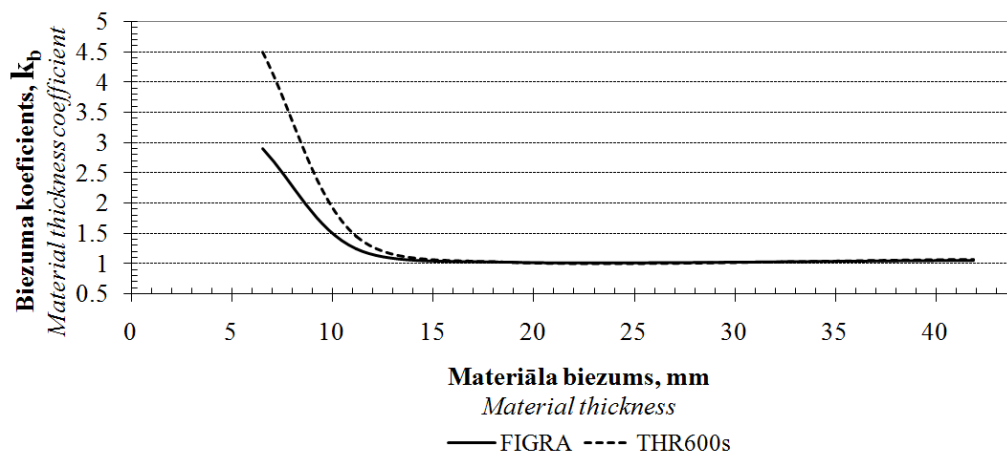
kur

- W – koksnes absolūtais mitrums, %;
- k_s – koku sugas koeficients, (egle – 1, priede – 1.05, bērzs, baltalksnis – 1.1, apse – 1.15, osis – 0.95, ozols – 0.9);
- k_v – koksnes virsmas koeficients (zāģēta virsma – 1, frēzēta vai slīpēta virsma – 1.1);
- k_b – koksnes materiāla biezuma koeficients (nosaka pēc diagrammas, skat. 7.1. att.);
- k_a – virsmu apdares veida koeficients (bez apdares – 1, atkarībā no apdares materiāla veida un daudzuma – 0.8 – 1.1, apdare ar antipirēniem – 0.15 – 0.9).

$$\text{THR}_{600s} = 14(1 - 0.02W) \cdot k_s \cdot k_v \cdot k_b \cdot k_a, \quad (7.2)$$

kur

- W – koksnes absolūtais mitrums, %;
- k_s – koku sugas koeficients, (egle, ozols – 1, priede – 1.2, bērzs, baltalksnis – 1.4, apse – 1.7, osis – 1.3,);
- k_v – koksnes virsmas koeficients (zāģēta virsma – 1, frēzēta vai slīpēta virsma – 1.4);
- k_b – koksnes materiāla biezuma koeficients (nosaka pēc diagrammas, skat. 7.1. att.);
- k_a – virsmu apdares veida koeficients (bez apdares – 1, atkarībā no apdares materiāla veida un daudzuma – 0.8 – 1.1, apdare ar antipirēniem – 0.15 – 0.9).



7.1. att. Koksnes materiālu biezuma koeficienta noteikšanas diagramma ugunsgrēka attīstības indeksa FIGRA un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s (THR_{600s}) aprēķiniem.
Fig. 7.1. The diagram for determination of wood material thickness coefficient for fire growth rate (FIGRA) and total heat release during 600 s (THR_{600s}) calculations.

7.2 Koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas prognozēšana

Koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas parametru prognozēšana ir komplicētāks uzdevums, jo nāk klāt daudzi citi ietekmējošie faktori, kas galvenokārt ir nekoksnes materiāli un koksnes materiālu uzbūves struktūras izmaiņas, kas ietekmē koksnes fizikāli mehāniskās īpašības, kā arī koksnes kompozītu materiāla ugunsreakciju.

Balstoties uz eksperimentālajiem datiem izstrādāts vienkāršotas koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas prognozēšanas metodes, skat. sakarības 7.3 un 7.4.

$$FIGRA = 450(1 - 0.026W) \cdot k_m \cdot k_b \cdot k_a, \quad (7.3)$$

kur

- W – koksnes absolūtais mitrums, %;
- k_m – materiāla veida koeficients, (bērza saplāksnis – 0.72, OSB – 1.13, MDF – 1.3, kokskaidu plātne – 1.05);
- k_b – koksnes materiāla biezuma koeficients (nosaka pēc diagrammas, skat. 7.1. att.);
- k_a – virsmu apdares veida koeficients (bez apdares – 1, atkarībā no apdares materiāla veida un daudzuma – 0.6 – 1.1, apstrāde ar antipirēniem – 0.15 – 0.9).

$$THR_{600s} = 14(1 - 0.02W) \cdot k_m \cdot k_b \cdot k_a, \quad (7.4)$$

kur

- W – koksnes absolūtais mitrums, %;
- k_m – materiāla veida koeficients, (bērza saplāksnis – 1.2, OSB – 1.45, MDF – 2.6, kokskaidu plātne – 1.55);
- k_b – koksnes materiāla biezuma koeficients (nosaka pēc diagrammas, skat. 7.1. att.);
- k_a – virsmu apdares veida koeficients (bez apdares – 1, atkarībā no apdares materiāla veida un daudzuma – 0.6 – 1.1, apstrāde ar antipirēniem 0.15 – 0.9).

7.3 Ugunsreakcijas prognozēšanas metožu pārbaude

Lai novērtētu izstrādāto ugunsreakcijas prognozēšanas algoritmu darbību, veikta to pārbaude salīdzinot ar eksperimentu rezultātiem. Tabulās 7.1 un 7.2 apkopoti dati par masīvkoksnes ugunsreakcijas parametru prognozēšanu, kā arī novērtēta starpība starp rezultātiem, kas izteikta procentos. Gan aprēķinātās FIGRA indeksa vērtības, gan THR_{600s} neatšķiras no vidējiem eksperimentu rezultātiem vairāk par 5% un nepārsniedz datu kopas vienas standartnovirzes apgabalu.

Eksperimentālu datu citu koka sugu un biezumu pārbaudei nebija pieejami, taču tā kā pastāv korelācija starp koniskā kalorimetra rezultātiem un SBI testu, tad izstrādātie koeficienti ir ar augstu ticamības līmeni. Grūti novērtējams ir k_a koeficients, kas tiešā veidā atkarīgs no citiem materiāliem un to daudzuma. Darbā pētot apdares materiālu ietekmi uz ugunsreakciju ir novērots, ka vairumā gadījumu apdare uzlabo ugunsreakcijas parametrus, bet atsevišķos gadījumos var arī uzrādīt sliktākus rezultātus. Vēl plašāka datu izkliede ir vērojama dažādiem antipirēniem. Atkarībā no to veida un apstrādes tehnoloģijas, ugunsreakcijas parametri var desmitkārtīgi atšķirties.

7.1. tabula

Table 7.1.

Ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa (FIGRA) aprēķinu metodes pārbaude masīvkoksnei
Evaluation of fire growth rate (FIGRA) prediction model for solid wood materials

Koku suga <i>Wood species</i>	FIGRA aprēķin. <i>calculated</i>	Eksperimentu dati <i>Experimental data</i>		Starpība, % <i>Difference</i>		
		FIGRA	Standartnovirze <i>Standard deviation</i>	Vidējā <i>Average</i>	Maksimālā <i>Maximal</i>	Minimālā <i>Minimal</i>
Apse/ <i>Aspen</i>	421	432	30	-2.6	5	-10
Baltalksnis/ <i>Grey alder</i>	403	402	30	0.2	8	-7
Egle/ <i>Spruce</i> (W=8%)	356	360	30	-1.0	7	-10
Egle/ <i>Spruce</i> (W=13%)	298	290	37	2.7	15	-10
Egle/ <i>Spruce</i> (W=21%)	204	198	17	3.1	11	-5
Egle/ <i>Spruce</i> (W=10%)	366	374	47	-2.1	11	-15

7.2. tabula
Table 7.2.

Kopējās siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) aprēķinu metodes pārbaude masīvkoksnei
Evaluation of total heat release in 600 s (THR_{600s}) prediction model for solid wood materials

Koku suga <i>Wood species</i>	THR_{600s} aprēķin. <i>calculated</i>	Eksperimentu dati <i>Experimental data</i>		Starpība, % <i>Difference</i>		
		THR_{600s}	Standartnovirze <i>Standard deviation</i>	Vidējā <i>Average</i>	Maksimālā <i>Maximal</i>	Minimālā <i>Minimal</i>
Apse/ <i>Aspen</i>	26.7	26.3	3.6	1.5	15.0	-12.0
Baltalksnis/ <i>Grey alder</i>	22.0	21.4	1.7	2.7	10.5	-5.0
Egle/ <i>Spruce</i> (W=8%)	11.8	11.4	0.5	3.4	7.6	-0.8
Egle/ <i>Spruce</i> (W=13%)	10.4	10.6	0.9	-1.9	6.7	-10.6
Egle/ <i>Spruce</i> (W=21%)	8.1	7.9	0.3	2.5	6.2	-1.2
Egle/ <i>Spruce</i> (W=10%)	15.7	15.2	2	3.2	15.9	-9.6

Novērtējot koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas prognozēšanas algoritmus, novērota būtiska rezultātu neatbilstība dažos gadījumos. Ar fenola „filmu” laminēta saplākšņa ar 35 mm biežumu ugunsreakcijas parametri ir sliktāki nekā 12 mm biežam materiālam, kas ir pretrunā ar teoriju. Tā kā abos gadījumos saplākšņa blīvums būtiski neatšķiras, tad vienīgais faktors, kas varēja ietekmēt ir ražošanas tehnoloģija, respektīvi, izmantoto materiālu daudzuma attiecība. Nelielas līmes vai sveķu proporciju atšķirības var izraisīt šādus rezultātus, ko nevar paredzēt modeļos.

Otra problēma, ar ko nākas saskarties ir materiāla biežuma koeficienta dažādība atšķirīgiem koksnes kompozītu materiāliem. Katram koksnes kompozītu materiālam var būt atšķirīga materiāla biežuma ietekme uz ugunsreakciju.

7.3. tabula
Table 7.3.

Ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa (FIGRA) aprēķinu metodes pārbaude
koksnes kompozītu materiāliem

Evaluation of fire growth rate (FIGRA) prediction model for wood composite materials

Materiāls <i>Material</i>	FIGRA aprēķin. <i>calculated</i>	Eksperimentu dati <i>Experimental data</i>		Starpība, % <i>Difference</i>		
		FIGRA	Standartnovirze <i>Standard deviation</i>	Vidējā <i>Average</i>	Maksimālā <i>Maximal</i>	Minimālā <i>Minimal</i>
Saplākšnis/ <i>Plywood</i> , 35mm	265	271	12	-2.3	2.3	-6.8
Saplākšnis/ <i>Plywood</i> , 12 mm	318.0	306	28	3.8	12.6	-5.0
Saplākšnis/ <i>Plywood</i> , 6.5 mm	768.6	771	14	-0.3	1.5	-2.1
Saplākšnis Fen.Lamināts/ <i>Plywood phenol laminate</i> 12 mm	238.5	241	13	-1.0	4.4	-6.5
Saplākšnis Fen.Lamināts/ <i>Plywood phenol laminate</i> 35 mm	198.8	325	24	-63.5	-51.4	-75.6
Saplākšnis Mel.Lamināts/ <i>Plywood melamine laminate</i> 12 mm	222.6	221	37	0.7	17.4	-15.9
OSB, 12 mm	499.1	423	35	15.3	22.3	8.2
MDF, 18 mm	478.5	488	7	-2.0	-0.5	-3.4
Kokskaidu plātne/ <i>Particle board</i> , 12 mm	463.8	399	50	14.0	24.8	3.2

Koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas prognozēšanai izmantota masīvkoksnes sakarība, nosakot mitruma ietekmi uz ugunsreakciju. Tā kā koksnes kompozītu materiāliem ir atšķirīga struktūra un tie sastāv no dažādiem produktiem, tad arī koksnes mitruma ietekmes sakarības var būt atšķirīgas.

Izstrādātie algoritmi koksnes kompozītu materiālu ugunsreakcijas parametru prognozēšanai var tikt izmantoti aptuvenu ugunsreakcijas datu iegūšanai, kā arī palīdz izprast ietekmējošo faktoru būtiskumu.

7.4. tabula

Table 7.4.

Kopējās siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}) aprēķinu metodes pārbaude koksnes kompozītu materiāliem

Evaluation of total heat release in 600 s (THR_{600s}) prediction model for wood composite materials

Materiāls <i>Material</i>	THR_{600s} aprēķin. <i>calculated</i>	Eksperimentu dati <i>Experimental data</i>		Starpība, % <i>Difference</i>		
		THR_{600s}	Standartnovirze <i>Standard deviation</i>	Vidējā <i>Average</i>	Maksimālā <i>Maximal</i>	Minimālā <i>Minimal</i>
Saplāksnis/ <i>Plywood</i> , 35mm	14.4	13.8	0.6	4.5	8.6	0.3
Saplāksnis/ <i>Plywood</i> , 12 mm	18.8	19.5	2.8	-3.8	11.1	-18.7
Saplāksnis/ <i>Plywood</i> , 6.5 mm	65.0	63.7	1.6	2.0	4.5	-0.4
Saplāksnis Fen.Lamināts/ <i>Plywood phenol laminate</i> 12 mm	14.1	14.5	1	-2.9	4.2	-10.0
Saplāksnis Fen.Lamināts/ <i>Plywood phenol laminate</i> 35 mm	10.8	14.5	1.5	-33.8	-20.0	-47.7
Saplāksnis Mel.Lamināts/ <i>Plywood melamine laminate</i> 12 mm	13.1	15	1.2	-14.1	-5.0	-23.2
OSB, 12 mm	22.7	23	1.4	-1.3	4.8	-7.5
MDF, 18 mm	31.3	31.4	0.1	-0.3	0.0	-0.6
Kokskaidu plātne/ <i>Particle board</i> , 12 mm	24.3	23.7	0.4	2.3	4.0	0.7

7.4 Ugunsreakcijas prognozēšanas metožu pielietošana

Saskaņā ar ugunsreakcijas klasifikācijas sistēmu atbilstoši standarta LVS EN 13501- 1 būvizstrādājumus klasificē 7 ugunsreakcijas klasēs. Koksnes materiāli var tikt klasificēti E; D; C un B klasēs. Materiāla piederību noteiktai ugunsreakcijas klasei nosaka ugunsreakcijas parametru FIGRA un THR_{600s} robežvērtības, kas identificētas 7.5. tabulā.

Veicot koksnes materiāla ugunsreakcijas prognozēšanu saskaņā ir izstrādāto aprēķinu metodiku, iegūtās vērtības jāsalīdzina ar robežvērtībām, lai prognozētu materiāla ugunsreakcijas klasi.

Ugunsreakcijas parametru robežvērtības pēc standarta LVS EN 13501-1
Reaction to fire classification criteria according to Standard LVS EN 13501-1

Ugunsreakcijas klase <i>Reaction to fire class</i>	FIGRA robežvērtība <i>FIGRA criteria</i>	THR _{600s} robežvērtība <i>THR_{600s} criteria</i>
B	≤ 120 W·s	≤ 7.5 MJ
C	≤ 250 W·s	≤ 15 MJ
D	≤ 750 W·s	-
E	-	-

8 SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

1. Lielākajai daļai koksnes materiālu pašai aizdegšanās nenotiek siltuma starojumos, kas mazāki par 14 kW m^{-2} un kritiskā siltuma plūsma ir 3 kW m^{-2} , zem kura patstāvīga koksnes degšana nav iespējama. Siltuma starojums būtiski ietekmē temperatūras gradientu koksni. Koksnes uzsilšanas dinamika galvenokārt ir atkarīga no ārējā siltuma starojuma, kas ir mainīgs faktors un būtiski izmainās koksnes aizdegšanās brīdī. Pieaugot koksnes mitruma saturam, palielinās mitruma iztvaikošanas fāzes ilgums, kad koksnes temperatūra ir $100 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Koksnes mitruma saturs tieši ietekmē koksnes degšanas procesu. Pastāv cieša lineāra sakarība starp mitruma saturu egles koksni un rādītājiem FIGRA un THR_{600s}.
3. Koku sugu ietekme uz ugunsreakcijas parametriem ir būtiska – līdz 20 % FIGRA indeksa un līdz 80 % THR_{600s} starpība starp Latvijā augošajām koku sugām.
4. Ārējam siltuma starojumam ir būtiska ietekme uz koksnes aizdegšanās laiku, kas mainās kā pakāpes funkcija no siltuma starojuma vērtībām, kā arī ievērojama ietekme uz koksnes degšanas jaudu, kas mainās pēc lineāras funkcijas atkarībā no siltuma starojuma.
5. Apdares materiāli neatstāj būtisku ietekmi uz ugunsreakcijas klasifikācijas parametriem FIGRA un THR_{600s}, jo to daudzums ir mazs uz laukuma vienību tomēr dažādi apdares materiāli var vairākkārtīgi samazināt koksnes aizdegšanās laiku, kā arī veicināt liesmu izplatību.
6. Koksnes termiskā modifikācija un acetilēšana, pasliktina ugunsreakcijas parametrus, un ietekme var būt kritiska, materiāla pāriešanai zemākā ugunsreakcijas klasē.
7. Koksnes mitruma saturs neietekmē dūmu veidošanās rādītājus SMOGRA un TSP_{600s}. Lapu koku koksnes degšanas gadījumā izdalīto dūmu daudzums ir būtiski mazāks nekā skujkokiem.
8. Koksnes kompozītu materiālu degšanas procesa intensitāte un degšanas jauda ir lielāka nekā masīvkoksnei izņemot saplākšņus. Termiski plānu koksnes kompozītu materiālu degšanas process noris ar vairākkārtīgi lielāku degšanas jaudu un ievērojamu izplatības ātrumu, kas pazemina materiāla ugunsreakcijas klasi uz E.
9. Izstrādātā koksnes ugunsreakcijas prognozēšanas metode, ņemot vērā koksnes mitruma saturu, koku sugu, virsmu raupjumu, materiāla biezumu un virsmu apdari, uzrāda būtisku ticamības līmeni. Līdzīgas ugunsreakcijas prognozēšanas metodes izstrādātas arī koksnes kompozītu materiāliem, tomēr tās izmantojamas informatīvos nolūkos.

9 REKOMENDĀCIJAS

1. Latvijā augošo koku sugu ugunsreakcijas parametri var atšķirties līdz 20 % FIGRA indeksa un līdz 80 % THR600s.
2. Uzputojošie antipirēni būtiski uzlabo koksnes materiālu ugunsreakcijas parametrus, jo tie pasargā koksni no uzsilšanas ārēja siltuma starojuma ietekmē un te ir ieteicami pielietojumam sausos apstākļos. Ārējais siltuma starojums ietekmē koksnes aizdegšanās laiku un ir aprakstāms ar pakāpes funkciju no siltuma starojuma savukārt ietekme uz koksnes degšanas jaudu aprakstāma ar lineāru sakarību.
3. Koksnes kompozītu materiālu biezums būtiski neietekmē ugunsreakcijas parametrus, ja to biezumu var definēt kā termiski biezu, kas ir vismaz 10 – 15 mm.
4. Ar uzputojošajiem antipirēniem, kas temperatūras ietekmē veido izolējošu nedegošu putu slāni, var vairākkārtīgi uzlabot koka konstrukciju ugunsreakcijas parametrus un iegūt augstāko ugunsreakcijas klasi B, kas iespējama koksnes produktiem. Katram antipirēnam ir ievērojami atšķirīga efektivitāte, līdz ar to nevar pētījuma rezultātus vispārināt uz citiem antipirēniem. Tas nozīmē, ka katram antipirēnam ir jānosaka potenciālā ugunsreakcijas klase, kas ir atkarīga arī no koku sugas, materiāla veida, konstrukcijas elementu izmēriem, un apstrādes tehnoloģijas.
5. Visi antipirēni būtiski zaudē efektivitāti pieaugot siltuma starojumam. SBI testa metode neobjektīvi novērtē potenciālo ugunsdrošības risku ar antipirēniem apstrādātas koksnes gadījumā, jo testā materiāls tiek pakļauts zemiem siltuma starojumiem, bet antipirēni būtiski zaudē efektivitāti, pieaugot siltuma starojumam. Tikai uzputojošie antipirēni samazina koksnes uzsilšanas ātrumu.
6. Izstrādātā koksnes ugunsreakcijas prognozēšanas metode, ņemot vērā koksnes mitruma saturu, koku sugu, virsmu raupjumu, materiāla biezumu un virsmu apdari, izmantojama ugunsdrošības risku izvērtēšanai un materiālu izvēlei.

DARBA APROBĀCIJA / APROBATION OF RESEARCH RESULTS

Promocijas darba pētījumu rezultātu prezentācija zinātniskajās konferencēs / *Research of the thesis presented at the scientific conferences*

1. *Zinātniski praktiskā konference „Mežzinātne un prakse nozares attīstībai”, LLU MF, Jelgava, 2006. 16. marts, referāts: Koksnes materiālu ugunsizturības noteikšana.*
2. *International PhD workshop “Wood as building material”, NTNU, Trondheim, Norvēģija, 2006.gada 2.-4.maijs, referāts: Determination of wood material fire resistance.*
3. *Ecobalt ‘2006, 2006.gada 11.-12.maijs, stenda referāts: Ēku ugunsdrošība.*
4. *The 2nd meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE), Stokholma, Zviedrija, 2006.gada 30.-31.oktobris, referāts: Fire protection of wood construction materials in Latvia.*
5. *International Scientific Conference “Research for Rural Development ‘2007”, LLU, Jelgava, 2007, referāts: Temperature distribution in wood floorings exposed to fire.*
6. *The 3rd meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE), Helsinki, Somija, 2007.gada 29.-30.oktobris, referāts: Influence of wood moisture content to material reaction to fire.*
7. *Baltic polymer symposium ‘2008, Otepää, Igaunija, 2008.gada 13.-16.maijs, referāts: Influence of surface coatings to wood material reaction to fire.*
8. *The 4th meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE), Rīga, 2008.gada 13.-14.novembris, referāts: Influence of surface coatings to wood material reaction to fire.*
9. *Baltic polymer symposium ‘2009, Ventspils, Latvija, 2009.gada 22.-25.septembris, stenda, referāts: Thermal diffusivity of glulam beams and effect of fire retardants.*

**Zinātniskās publikācijās par promocijas darba tēmu /
Scientific publication related to the subject of the thesis**

1. Buksans E, *Determination of wood material fire resistance*. In: proceeding of International PhD workshop, NTNU, 2006, Wood as building material. P. 23-26.
2. Buksans E, *Ēku ugunsdrošība*. In: proceeding of Ecobalt 2006, , Intego plus, 2006. P. 95-96.
3. Morozovs A, Akerfelds I., Buksans E. *Influence of Wood Modification on Fire Resistance and Hydrophobic Properties*. In: proceeding of The third European Conference on Wood Modification. (2007) P.153 – 156.
4. Buksans E., Morozovs A. *Influence of wood moisture content to material reaction to fire*. In: Proceeding of the 3rd meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering.(2007) P. 91-96.
5. Buksans E., *Temperature distribution in wood floorings exposed to fire*. In: proceedings of International Scientific Conference 'Research for Rural Development 2007, Jelgava, LLU, 2007. P. 167 -173.
6. Buksans E., Morozovs A. *Influence of surface coatings on wood material reaction to fire*. In: Proceedings of the 4th meeting of the Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE).(2008) P. 83-88.
7. Morozovs A., Buksans E., *Fire performance characteristics of acetylated wood*. In: Proceedings of the 4th European Conference on Wood Modification, 27 -29 April, 2009, Stockholm, Sweden. P. 401 – 405.
8. Morozovs A., Bukšāns E. *Fire performance characteristics of acetylated ash (*Fraxinus excelsior*, L) wood*. Wood Material Science and Engineering. Volume 4, Issue 1 & 2, March 2009. P.76-79.
9. Bukšāns E., Morozovs A., *Mīksto lapkoku koksnes ugunsreakcijas parametri*. Valsts pētījumu programma, 2005–2009. Rakstu krājums, Lapu koku audzēšanas un racionālas izmantošanas pamatojums, jauni produkti un tehnoloģijas. Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūts, Rīga, 2009. P.100-104.
10. Bukšāns E. *Dažādu antipirēnu ietekme uz egles *Picea abies* L. koksnes ugunsreakciju*. Mežzinātne 20(53) 2009: 83.-94. lpp.

GENERAL DESCRIPTION

Topicality of the research

In the European timber industry development program “Roadmap 2010” is stated that wood and timber products will take the lead to promote wood as a sustainable building and finishing material. These task to be achieved it is necessary to solve many queries of wood application *int. al.* wood construction fire safety. The wider application of wood is one of tasks of “Vision 2030 of industries’ technological platform based on forestry and wood resources of Latvia”

In Latvia wood is used mainly for construction of small buildings. In the bigger buildings, for example, schoolhouses, sport halls etc. it is used mainly in roof constructions. By middling consumers’ point of view wood is not durable and it is suitable only for temporary solutions. Many of architects believe that it is not suitable as building material. The fire-security of wood frequently is doubted. Wood is evaluated by professionals as inferior in comparison with others building materials – steel or concrete in general. The information based on wood fire-safety comprehensive experiments and wood fire performance facts is needed to change wood possibilities in construction sector undervaluation. It is essential because wood is renewable material that could ensure sustainable and environmentally friendly construction sector progress. It is very essential to develop technical and technological issues in due time and fortifying wood compliance to new application or new products for given area of use must be created for the wider it apply.

Although wood is flammable material, accurately designed wood construction buildings showed good fire performance in case of fire. One of explanation is based on wood burning progress and on char physical properties. The char layer has very good heat isolation property that protects underlying wood against heating up. This wood property in combination with massive wood constructions provides high fire resistance of construction. The data base of wood fire performance is needed to make prognosis of wood construction performance in case of fire and possible risks assessment.

The new and more detailed information and date base is needed to enhance knowledge about wood materials’ fire performance influencing factors: wood moisture content, wood species, building constructive design, dimensions of particular construction elements, type of wood material or composite, kind of wood modification (chemical, thermal, mechanical), behavior of coatings in case of fire, treatment with fire-retardants, blends of different material as well as effects of these factors mutual interaction. Such information and theoretical basis is needed to stimulate wood and wood materials wider and safe application as well as to design new on wood based materials and composites.

The best method to prevent fire hazard is to forbid the fire origination. Wood is flammable material by its chemical nature. The wood burning is indirect. It means that wood could ignite only afterwards the external heat radiation is heated wood up to temperature of pyrolysis and gases are produced. Pyrolysis by-product is char that participate in burning process, but it differs with direct oxidation in solid state and is observed as glowing. It is essential to get to back of ignition and fire progress to develop measures for wood fire protection. Lack of existing wood fire resistance enhancing methods is: complicated technologies treatment with fire-protectors, expensiveness of protectors, as well as the loss of wood valuable physically-mechanical, esthetical, and ecological properties. Although wood flammability is not possible to substantially reduce, nevertheless wood reaction to fire and fire resistance could be improved. The efficacy of fire-retardants is not unequivocal in the each occasions, it is diverse for different materials. It is believed that fire-retardants based on

chemical action are more effective than those based on physical phenomena. Most of fire retardants and their efficacy are not tested according Euro class in market place in Latvian.

The investigations on wood material reaction to fire and on factors affecting fire-safety as well as on possibilities and practical technique must be performed to overcome potential barriers of wood application in construction sector based on absence of the appropriate information.

The new construction fire-safety regulations LBN 201-2007 are applied since 1st March 2008 in Latvia that prescribe to put to use the building materials based on their classification by reaction to fire and fire-resistance that causes problem on to put into practice building materials according the new regulations in particular such wood products that reaction to fire and fire-resistance parameters are not established.

The provisional study the state of art is proved that many constraints exist in wood application in building industry and wood construction fire-safety is one of the main reasons. Wood material reaction to fire investigations according European classification system was not carried out previously in Latvia, and these issues have comparatively few investigations in the Europe.

The target of the research

The target of the present study is the investigation of on wood materials' and wood construction elements' fire-safety influencing factors with aim to ascertain basic principles of their action, to investigate wood materials' fire-safety promotion potentialities and to work out prediction methods of wood material reaction to fire based on the results of investigation of factors influencing fire-safety.

The researches' tasks:

- to summarize and analyze information about influencing factors on wood materials and construction elements fire-safety and application of fire retardants in wood treatment;
- to perform research on thermal diffusivity of wood in different heat fluxes;
- to perform researches on factors influencing reaction to fire of wood and wood composite materials;
- to study possibilities of improvement wood and wood composite materials' reaction to fire and fire-safety;
- to work out methods for prognosis reaction to fire of wood materials.

The research methods

The investigations were performed on up-to-date hardware: the single burning item (SBI), flooring radiant panel (FRP), small flame test, and cone calorimeter that are used in the European standardization system of building materials reaction to fire, wherewith obtained data easy to compare with results of other investigations. The cone calorimeter method is the one of wider used in the fire-safety researches worldwide. The parallel tests with different reaction to fire methods were performed to evaluate correlations of data between different methods, as well as to obtain information about materials' burning performance in distinct conditions.

The scientific novelty

- the methods for prognosis of wood and wood composite materials reaction to fire were worked out;

- the factors influencing wood and wood composite materials reaction to fire and their influence on materials' reaction to fire-class were determined;
- the efficacy of different methods for advancing wood and wood construction fire-safety were explored and the proposals on wood and wood composite materials reaction to fire and fire-resistance improvement were developed;
- the information on wood burning processes and modeling of burning process were summarized.

The obtained results and the practical importance

The results of the research could be used to estimate fire-safety and reaction to fire of different wood materials in design of buildings from wood materials. All significant factors affecting reaction to fire of wood materials were reflected in the research. The developed calculation method is easy to use for prognosis of reaction to fire of different wood materials and composites to evaluate potential compliance to prescribed class of reaction to fire without destructive test.

The results could be made in use for providing fire-safety in case of design of buildings with wood materials application. The results in entirety would advance wood application in construction.

Thesis structure

The thesis is divided into seven chapters:

1. State-of-the-art;
2. General research methods;
3. The investigation of thermal diffusivity of wood in different heat fluxes;
4. The investigation of factors influencing reaction to fire of wood;
5. The investigation of reaction to fire of wood composite materials;
6. The results of investigation on possibilities for improvement of fire-safety of wood and the efficacy of different fire-retardants;
7. The wood materials reaction to fire prognosis methods development.

Thesis are put in to shape of 127 pages, it contains 102 figures and 26 tables. 133 references are used in the thesis.

1 Literature review

The literature review was realized in the first chapter. It is divided into five subchapters. The main topics discussed in literature review are:

- review of fire safety regulation background of wood materials in buildings and its fire safety in Latvia, fire safety in wood buildings, European fire classification of materials, construction products and building elements, test methods;
- process of wood burning and its mathematical modelling;
- ignition of wood and charring;
- influence of wood material type, construction elements dimensions, chemical composition, moisture content, construction design mode, wood density, coatings, wood modification influence on the wood reaction to fire;
- possibilities to improve wood fire performance with fire retardants, their mode of action, influence on the wood physically mechanical properties, behaviour in fire, smoke production, influence on wood longevity and environment were discussed in this chapter.

2 General research methods

2.1 Selection of materials and specimen preparation

Different researches with distinct specific targets which were gained with individually developed methods that are represented in the beginning of each section of research description.

Common features of choose and preparation of materials:

- Occasional sampling of specimens with taking no notice to origin;
- Sampling were provided with excluding timber with loose knots and resin galls that could influence measurements result;
- All specimens were conditioned according standard LVS EN 13238 at 296 K and 50% relative humidity, if it was not designed otherwise by research method;
- SBI test specimens dimensions were 1000 mm * 1500 mm for long wing and 495 mm * 1500 mm for short wing according LVS EN 13823;
- SBI tests' specimens were assembled from separate timber with lath 20 mm 30 mm in crosscut using 2mm * 35 mm bolts;
- Specimens number was 5 according standards;
- Specimens 90 mm * 250 mm were used for single flame source tests according LVS EN ISO 11925-2;
- Specimens 100 mm * 100 mm were used for cone calorimeter tests according LVS EN ISO 5660-1;
- Specimens 230 mm * 1050 mm were used tests in flooring radiant panel equipment according LVS EN ISO 11925-1;

2.2 Test methods and equipment

The standards and equipment according these standards used in the research for determination the reaction to fire were:

- LVS EN ISO 11925-1 for determination of reaction to fire of flooring materials in the flooring radiant panel equipment;
- LVS EN 13823 - single burning item (SBI);
- LVS EN ISO 11925-2 single flame source test;
- LVS EN ISO 5660-1 – cone calorimeter test.

Experiments were performed in accordance with standard methods with alteration in individual cases to achieve goals of the research.

2.3 Data processing and analysis

Statistical data calculus methods used for data processing:

- Descriptive statistics and data reciprocal verification;
- Correlation and regression analysis.

Valuation of factors' relevance

Approximated valuation of factors' relevance were used in the research due to small sample population of reaction to fire tests the assessment of relevance of factors with common statistical data calculus methods e.g. t - tests is inconvenienced and does not offer the preferable certainty. Factor affecting reaction to fire was considered to be relevant, if factors' average value was beyond value of standard deviation of parameter to be compared.

3 Dynamics of wood heating up

The temperature was ascertained as the main factor affecting wood burning by literature data about wood burning process and its influencing factors summarizing and analysis. Knowledge of dynamic of wood heating up is essential to forecast of fire progress. Intense wood burning could progress when temperature of pyrolysis to begin with 470 K is reached. During study was ascertained that radiant heat flux to wood is relevant for dynamic of wood heating up. The experiments were provided both with low radiant heat flux (1 - 14 kW m⁻²) in flooring radiant panel tests, and with high heat flux (50 kW m⁻²) in cone calorimeter tests.

Dynamic of temperature in different depth of wood as well dynamic of velocity of temperature changes was analyzed. The velocity of temperature changes in 5 mm and 15 mm depth from exposed surface was presented in figure 3.1.

On the basis of research of wood heating up tests could be concluded:

- The critical heat flux of pine wood is 3 kW m⁻² below this sustained wood burning is not possible;
- Constitutive temperature gradient exist in the depth of the wood to be subjected to heat flux, that is the main advantage of wood;
- Wood self ignition does not occur under heat flux below 14 kW m⁻² because of low concentration of volatile pyrolysis products to sustain self ignition;
- Dynamic of wood heating up depends from internal heat radiation that is inconsistent factor and changes after ignition;
- The velocity of temperature change in case of wood burning could be approximately supposed as constant value 0.5 K s⁻¹ in the wood upper layers (5 – 30 mm) and 0.05 K s⁻¹ in the wood deepest layers (deeper than 40 mm) at 50 kW m⁻² heat flux;
- pieaugot koksnes mitruma saturam, palielinās otrās degšanas fāzes ilgums, kad koksnes temperatūra ir 100 °C;
- The duration with constant temperature approximately 373 K in moisture evaporation zone increases with wood moisture content and decreases with heat flux inside wood.
- The velocity of wood charring rate must be taken into account in the temperature calculation in the fixed point inside wood because charring decreases wood thickness.

4 Factors affecting wood burning process

The results of researches on the main factors and its relevance affecting fire safety of wood construction are presented this chapter. The following subtasks of investigation of influence of different factors on wood burning were put forward to make inquiries on the basis of literature review and results of run of the first research task:

- The investigation of influence of wood moisture on reaction to fire;
- The investigation of influence of wood species on reaction to fire;
- The investigation of influence of timber dimensions and design mode on reaction of fire;
- The investigation of influence of different coatings on reaction to fire;
- The investigation of influence of wood modification on reaction to fire.

4.1 The influence of wood moisture content on reaction to fire

Spruce (*Picea Abies* L.) wood timber with nominal thickness 22 mm and initial moisture content 18% was used for research. Timber was calibrated to thickness 20 mm. The tree groups of timber were conditioned to moisture content 21%, 13% and 8% and were correspondingly marked as M (moist), V (medium) and S (dry).

The regression analysis of experimental results was performed to evaluate influence of wood moisture on reaction to fire. The equations 4.1 and 4.2 were obtained to forecast parameters of reaction to fire dependence from wood moisture content and presented in fig. 4.1 and 4.2.

The fire growth rate (FIGRA) value (y_1) in dependence with spruce wood moisture content (x) could be calculated by equation 4.1:

$$y_1 = -11,716x + 443,05 \quad (4.1)$$

The total heat release in 600 s periods (THR_{600s}) value (y_2) in dependence with spruce wood moisture content (x) could be calculated by equation 4.2:

$$y_2 = -0,261x + 13,50 \quad (4.2)$$

Wood moisture content has direct influence on the reaction to fire parameters FIGRA and THR, but wood moisture content has no intrinsic influence on smoke production parameters: the smoke growth rate (SMOGRA) and the total smoke production (TSP). The close correlations exist between wood moisture content and reaction to fire parameters FIGRA and THR_{600s}.

4.2 The influence of wood species on reaction to fire

Timber of different trees species mainly used by industry in Latvia was selected (spruce, pine, aspen, gray alder, birch, ash and oak wood). All these kinds of wood were tested in cone calorimeter but spruce, aspen and gray alder wood were used for SBI tests.

The instantaneous heat release rate in the moment of the 60th s, 180th s and 300th s was used to characterize wood burning dynamic (fig. 4.3). Spruce wood has the smallest heat release rate. Supreme fall of heat release rate after reaching of the maximum was characteristic for pine and spruce wood. The maximal heat release rate has aspen and gray alder wood, but even heat release rate has birch wood.

The influence of wood species on the reaction to fire parameters for three wood species in SBI tests was presented in the figure 4.4. Spruce wood showed the best results in SBI tests as like as in cone calorimeter tests. The THR_{600s} increase by 70% of aspen wood burning is relevant in spite of aspen wood FIGRA value increase only by 15% in comparison with spruce wood in the both cases. It is indicative to the intensive burning progress and flame spread.

4.3 The influence of timber dimensions and design mode on reaction of fire

Size of member wood construction could be significant influence on the wood burning. Massive wood constructions has the very good steadiness in case of fire, but wood members with small area of cross cats are actively involved in the fire progress and have the high heat release rate of fire. The spruce wood timber members with sawn surface (roughness R_m 200 – 500 μ m) and spruce timber members with planned surface (roughness R_m less than 100 μ m) were chosen for tests to investigate the influence of timber dimensions and design mode on reaction of fire. The influence of wood construction design mode could be critical role in buildings fire safety and fire progress. Results of tests on influence of timber dimensions and design mode on reaction of fire are presented in figure 4.5 and figure 4.6.

4.4 The influence of different coatings on reaction to fire

Most of coatings are composed from organic mater with the substantially higher heat of combustion as for wood. Wood products are commonly used with coatings; therefore influence coating on wood ignition and flame spread must be evaluated. Commonly in industry used Becker-Acroma 8 coatings and nitrocellulose varnish produced in Latvia were used to coat specimens on the base of 12 mm thick ply-wood for reaction to fire tests with single flame source.

It could be concluded from test results that specimen ignition time is influenced by wood coating. Specimen ignition time could be earlier or belated in comparison with un-treated wood in dependence of coating type. The best results were achieved with wood coated with water based paints and varnishes as well as with vegetable oil treated wood. Wood coatings with water based paints and varnishes, or vegetable oil had the lesser damages by flame than for un-treated wood. Other tested coating materials have wider flame spread parameters. Specimens with nitrocellulose varnish coating had the worst results in comparison with other cases.

On the base of SBI tests of specimens coated with nitrocellulose varnish was ascertained that wood coatings does not diminished wood Euro reaction to fire class even in the worst case.

4.5 The influence of wood modification on reaction to fire

It has been concluded from literature review that wood burning process and reaction to fire is influenced by wood modification but this issue is less studied in the Europe. Two kinds of modified wood products – thermal treated wood and acetylated were selected to response on assessment of their actuality.

Thermal modified wood is more and more expanded on the European market and the acetylated wood goes into market to achieve wider application. The influence of wood thermal modification and acetylation were tested using cone calorimeter, SBI and floorings' radiant panel equipments for tests.

Modified wood had lowered by 5 – 15% parameters of reaction to fire than for un-modified wood for all materials tested in cone calorimeter at 50 kW m⁻² heat flux. The big size tests were performed in SBI to evaluate influence of wood modification on class of reaction to fire. The trends turned up by cone calorimeter tests were proved marking out more intrinsic influence of thermal modification on the parameters f reaction to fire. Thermal modified aspen wood had increased fire progress shoving increased by 50 % value of FIGRA index and by 60% increased THR_{600s} than for un-modified aspen wood as present in figures 4.7., 4.8. Gray alder wood has less pronounce influence – 30 % for FIGRA index and 40% for THR_{600s}.

On the base of experimental results and their analysis of factors affecting wood burning process, it could be concluded:

- The moisture content of wood has direct influence on the wood burning process, close correlation exists between wood moisture content and FIGRA and THR_{600s} values. Spruce wood reaction to fire parameters FIGRA and THR_{600s} could be calculated theoretically in accordance with equations: $y_1 = -11.716x + 443.05$ and $y_2 = -0.2606x + 13.502$;
- The smoke production indexes SMOGRA and TSP_{600s} are not influenced by wood moisture content;
- The equilibrium moisture content could vary from 8 to 25 % in buildings belonging to different operation classes and such diversity range of wood moisture content drastic changes of reaction to fire parameters could be

observed, e.g., dry spruce timber with equilibrium moisture content (EMC) 7% had increased by 81% FIGRA index than moist spruce timber with EMC 21% and THR was increased by 44% accordingly;

- Wood is hygroscopic material and moisture content is essential factor that must be evaluated in the building fire safety design;
- The influence of wood species on reaction to fire parameters is relevant. The difference by 20% of FIGRA index and to 80% of THR_{600s} between wood of trees species growing in Latvia was observed. It depends from structure features of wood;
- Smoke production by hard wood burning is substantially less than from softwood that makes possible to classify them by reaction to fire s₁ additional sub-class;
- The external heat flux has substantial influence on the wood ignition time that that alter by power function of heat flux value, as well as it has significant influence on the wood heat release rate that alter as linear function of heat flux value;
- Design mode of wood construction alters parameters of reaction to fire of the construction. Parameters of reaction to fire are influenced by surface quality, orientation of wood fiber as well as dimensions and disposition of single wood construction member;
- The classification of reaction to fire is not less than D calls if the construction member could be classified as thermally thick, however dimensions and disposition of isolated members could increased total heat release several times that accelerates flash-over in case of fire;
- Wood coatings has not significant influence on the parameters FIGRA and THR_{600s} for classification of wood materials by reaction to fire, because their amount to unit of area is small in;
- Several coatings materials could drastically decrease wood ignition time and favour flame spread;
- Wood thermal modification and acetylation worsens parameters of reaction to fire and could be critical for classification with inferior class of reaction to fire.

5 Reaction to fire of wood composite materials

Wood boards produced from wood and adhesive was declared as wood composite materials in the presented research. Most common wood composite materials were used in the research. Wood burning process is influenced by used in wood composite material adhesive because it constitutes relevant range of the composite therefore wood composite material burning process differs from burning of solid wood.

One of the research tasks was to perform researches of factors influencing reaction to fire of different kinds of wood composite materials.

The parameters of reaction to fire of different wood panel materials and cellulose heat insulation materials that were compared with parameters of reaction to fire of spruce wood. Summary of FIGRA indexes are presented in figure 5.1. Play-wood has the better indicators of reaction to fire than spruce solid wood, in its turn in case of MDF burning the FIGRA index was by 30% greater than for spruce wood. The more substantial influence could be observed, when THR_{600s} values are compared see figure 5.2. The THR_{600s} values are increased for all materials in comparison with spruce wood. Such high difference could be partly explained by difference in material thickness, nevertheless none of materials does not

burns through in the first 600 s from beginning of the test and flame progress begins after 600 s period on the panels' back side.

Different thickness and kinds of play-wood panels were used to evaluate influence of materials' thickness on the parameters of reaction to fire. The substantial parameter values of reaction to fire for different play-wood materials are presented in figures 5.3 and 5.4. It could be noticed that birch play-wood with thickness 6.5 mm substantially derive from others by comparing FIGRA and THR_{600s} values. It has increased FIGRA by 150% and THR_{600s} values by 225 % than play-wood with thickness 12 mm.

On the base of experimental results and their analysis of wood composite materials burning process, it could be concluded:

- The wood composite materials burning intensity and heat release rate are greater than for solid wood except thick play-wood. Kind of wood composite material plays substantial role of materials fire safety performance;
- Thermally thin wood composite materials burning process goes on with the several times greater heat release rate and considerable flame spread that decreases reaction to fire class down to E class;
- Density of wood panels has no substantial influence on the parameters of reaction to fire if their thickness could be defined as thermally thick that is at least 10 – 15 mm;
- Fire retardants could be added during wood composite material processing that radically could change burning process, wherewith wood composite materials could be classified as belonging to E, D, C and B reaction to fire classes; it depends from combination of used raw materials.

6 Improvement of wood reaction to fire and fire resistance

The most popular technique of wood fire safety improvement is wood treatment with fire retardants, however the fire retardants class of reaction to fire is not set up at present in Latvia and data of their influence on the reaction to fire of wood is not known. Different kinds of fire retardants accessible on the market could be divided in two groups in principal – for treatment of wood with impregnation method and wood treatment with coating. The research of the accessible in Latvia fire retardants action under different intensity of heat radiation was realized. Eight different fire retardants were tested, their identification and marking is presented in table 6.1.

6.1 Research of fire retardants action in cone calorimeter tests

Two aspects could be used to review materials fire safety in case of fire: ignition of material and flame spread under action of direct flame as well as ignition of material by heat flux. The first scenario is characteristic in initial stage of fire progress, when the fire initiator is action of direct flame. The second scenario yet begins during first scenario when flue gas with increasing temperature creates increasing and changing by time heat flux to surrounding constructions. The research results analysed in this chapter reflects efficacy of action of different fire retardants at different heat fluxes.

Parameters of reaction to fire is substantially affected by heat flux and parameters of reaction to fire at comparatively low heat flux (25 kW m^{-2}) vary to considerable extend from the research results at the greater heat fluxes with very high dispersion of data. Effect of fire retardant is more pronounced at the beginning of the test, after that efficacy depletes and wood burning process occurs with scenario characteristic to un-protected wood. Fire retardants substantially diminish maximal heat release rate that is characteristic to the initial stage of wood burning as represented in figure 6.1. Fire retardant A-7 does not perform

protector's function because results in general are the same as in case of un-treated wood or even worse.

6.2 Influence of fire retardants on the dynamic of wood heating up

By the performing research of the heating up of wood dynamic was ascertained that in dependence from the type of fire retardant the upper layers of wood material could heat up both faster and slower in comparison with un-treated wood. Only intumescent fire retardants (A-1, A-2 and A-4) diminish wood heating up velocity as represented in the figures 6.6 – 6.8. The deeper from exposed to heat flux wood surface the lesser influence of fire retardant on the wood heating up. The most fast temperature increase in all points of measurements had wood treated with fire retardant A-3 that could be explained by rapid ignition of surface and additional heat flux originated by burning of polyurethane varnish.

6.3 Influence of fire retardants on the classification of reaction to fire

Spruce wood timber was treated with four different accessible in the market of Latvia fire retardants to evaluate their efficacy by parameters of reaction to fire in the SBI tests. The main parameters were summarized in figures 6.2 and 6.3. All four tested fire retardants have decreased FIGRA indexes and THR_{600s} value. Wood treated with fire retardant A-1 has decreased by 95% FIGRA index and by 85 decreased THR_{600s} value. The similar results were obtained with fire retardant A-2, however thermo-chemical reaction of fire retardant caused increased oxygen consumption that was fixed by equipment and wherewith increased value of $FIGRA_{(0.2)}$ was produced, but $FIGRA_{(0.4)}$ was 37 W s^{-1} .

Fire retardants on salt base A-5 and A-6 produced equivalent results and decreased by 50% FIGRA index as well as decreased by 50% THR_{600s} than untreated wood, that enables wood with such treatment to classify as C class of reaction to fire.

The comparison of smoke production enables to fix small decrease that is near the borderline between additional classifying indexes s_1 and $s_2 - 50 \text{ m}^2$. In case of applying of fire retardants A-1 and A-2 s_1 additional classifying index could be acquired.

The HRR, FIGRA and THR alteration by time is used to investigate wood burning process dynamic. All fire retardants eliminate increase of heat release rate in the beginning of the test in comparison with un-treated wood. Wood treated with fire retardants A-1 and A-2 ignition time is delayed by 300 – 360 s in comparison with un-treated wood and burning occurs with 5-6 times less heat release rate. The burning process is stable and begins to increase after 1100th second when burning progress on the back surface that is not treated with fire retardant. It is substantial to note diminishing of total heat release that in case of timber treated with A-1 and A-2 is 2 – 4 times less than of untreated wood.

On the base of experimental results and their analysis of burning process of wood treated with fire retardants could be concluded:

- Wood treatment with fire retardants ensures improvement of reaction to fire classification by one or two classes;
- Wood treatment with intumescent fire retardants that produce isolating and non-flammable foam layer by impact of temperature, could improve wood construction reaction to fire parameters several times and the highest reaction to fire class B could be attained that is the maximum for wood products;
- The application of fire retardants Kafurs-4 and KU-1U doesn't improve reaction to fire parameters according cone calorimeter tests;
- Each fire retardant has scientifically diverse efficiency, wherewith research results could not be generalized to another fire retardants that means that for every fire retardant potential class of reaction to fire must be evaluated that is

dependent from species of wood, type of material, construction members dimensions treated as well as from treatment technologies;

- All fire retardants lose their efficacy with growth of heat flux;
- Only intumescent fire retardants diminish heating up of wood the others used in research fire retardants increases or non-affect the rate of wood heating up;
- Substantial differences were observed between cone calorimeter and SBI test results. The SBI tests had better results than the results by cone calorimeter method that could be explained with changing and comparatively low heat flux in the SBI;
- SBI method partially evaluate potential fire risk in case of wood treated with fire retardants, because in the test material is subjected to low heat flux, but fire retardants lose efficacy with growth of heat flux.

7 Prediction of wood materials' reaction to fire

7.1 The methods of wood materials' reaction to fire prediction

Prediction of wood material reaction to fire parameters is complicated task because wood material burning process is affected by numerous factors and by their interactions. Simplified, empirical, calculations methods based on the results of experiments are used to predict material reaction to fire. Since wood composite materials substantially differs from the solid wood then separate prediction of FIGRA and THR_{600s} are used solid wood materials and wood composite materials.

In the case of solid wood burning the main factors affecting reaction to fire are: wood equilibrium moisture content, wood species, surface processing, and thickness of material. The FIGRA_(0,2) and FIGRA_(0,4) are equivalent for wood materials, therefore in calculations denominator FIGRA is used for the both indexes. The equations 7.1 and 7.2 for prediction of FIGRA and THR_{600s} values are developed on the base of empirical data:

$$FIGRA = 450 \cdot (1 - 0.026 \cdot W) \cdot k_s \cdot k_v \cdot k_b \cdot k_a \quad (7.1)$$

Where: W is the wood equilibrium moisture content, %; k_s is the factor of wood species; (1 for spruce, 1.05 for pine, 1.1 for gray alder, 1.15 for aspen, 0.95 for ash tree, 0.9 for oak); k_v is the factor of wood surface processing (1 for sawn surface, 1.1 for planed or sanded surface); k_b is the factor of material thickness according the curve in figure 7.1; k_a is the factor of kind surface treatment (1 for surface without treatment, 0.8 – 1.1 for surfaces in dependence of kind of finishing material and amount; 0.15 – 0.9 for surface treated with fire retardants).

$$THR_{600s} = 14 \cdot (1 - 0.02 \cdot W) \cdot k_s \cdot k_v \cdot k_b \cdot k_a \quad (7.2)$$

Where: W is the wood equilibrium moisture content, %; k_s is the factor of wood species; (1 for spruce and oak, 1.2 for pine, 1.4 for grey alder and birch, 1.7 for aspen, 1.3 for ash tree); k_v is the factor of wood surface processing (1 for sawn surface, 1.4 for planed or sanded surface); k_b is the factor of material thickness according the curve in figure 7.1; k_a is the factor of kind surface treatment (1 for surface without treatment, 0.8 – 1.1 for surfaces in dependence of kind of finishing material and amount; 0.15 – 0.9 for surface treated with fire retardants).

7.2 The prediction of reaction to fire of wood composite materials

The prediction of wood composite materials reaction to fire parameters is the more complicated task because many another influencing factors are added that are mainly non-wood materials and changes in wood material structure that influence physical-mechanical properties of wood as well as the reaction to fire of wood composite material. The simplified

equations 7.3 and 7.4 for prediction of FIGRA and THR600s values of wood composite materials are developed on the base of empirical data:

$$FIGRA = 450 \cdot (1 - 0.026 \cdot W) \cdot k_m \cdot k_b \cdot k_a \quad (7.3)$$

Where: Where: W is the wood equilibrium moisture content, %; k_m is the factor of kind of wood composite material; (0.72 for birch play wood, 1.13 for OSB, 1.3 for MDF, 1.05 for wood particle board); k_b is factor of material thickness according the curve in figure 7.1; k_a is factor of kind surface treatment (1 for surface without treatment, 0.6 – 1.1 for surfaces in dependence of kind of finishing material and amount; 0.15 – 0.9 for surface treated with fire retardants).

$$THR_{600s} = 14 \cdot (1 - 0.02 \cdot W) \cdot k_m \cdot k_b \cdot k_a \quad (7.4)$$

Where: Where: W is the wood equilibrium moisture content, %; k_m is the factor of kind of wood composite material; (1.2 for birch play wood, 1.45 for OSB, 2.6 for MDF, 1.55 for wood particle board); k_b is factor of material thickness according the curve in figure 7.1; k_a is factor of kind surface treatment (1 for surface without treatment, 0.6 – 1.1 for surfaces in dependence of kind of finishing material and amount; 0.15 – 0.9 for surface treated with fire retardants).

7.3 The verification of methods for reaction to fire prediction

The verification of developed algorithm for prediction reaction to fire was performed by comparison of calculated and experimental results. The solid wood reaction to fire predicted value and experimental result as well as differences between them in percents is summarized in tables 7.1 and 7.2. Both the calculated FIGRA index value and the THR_{600s} value difference with mean of experimental results doesn't differ more than 5% and doesn't exceed standard deviation of data set.

The experimental data with other species than spruce and different thickness were not available for verification, though correlation exists between cone calorimeter and SBI tests results, then elaborated calculation factors are with the reasonable level of certainty. The factor k_a is difficult to estimate, because it directly depends from other than wood materials and their amount. In the study of finishing material influence on reaction to fire were observed that finishing improves reaction to fire parameters in most cases, but in the separate cases worse result was attained. Influence of different fire retardants showed even the higher data dispersion. Parameters of reaction to fire could differ ten times it depends from fire retardant type and treatment technology.

Substantial discrepancy was observed in some cases during verification of developed algorithm for prediction reaction to fire. The parameters of reaction to fire of 35 mm thick play-wood that was laminated with "phenol membrane" was worse than 12 mm thick board that is in contradiction with theory. Since the play-wood densities didn't differ in both cases then the exclusive influencing factor is production technology, namely, the ratio of raw materials. The small difference in the ratio of adhesive and resin could be reason of such results that couldn't be predicted in the models.

Another problem is the diversity of material thickness factor (k_b) of different wood composite materials. The thickness influence to reaction to fire could be different for each wood composite material.

To evaluate the influence of moisture content on the reaction to fire of wood composite materials the corresponding coherence for solid wood is used. Since wood composite materials have different structure and they are composed from different raw materials then influence of moisture content could be different.

The developed algorithm for prediction of wood composite material reaction to fire parameters could be used to gain approximated reaction to fire data as well as those help to understand substantiality of influencing factors.

7.4 The carrying into effect the methods for prediction the reaction to fire

The construction materials are classified into 7 classes of reaction to fire in accordance with reaction to fire classification system according LVS EN 13501-1. Wood materials could be classified as E, D, C and B class. Materials affiliation to definite class is determined by the parameters FIGRA and THR_{600s} border-values that are presented in the table 7.5.

To perform prediction of wood materials reaction to fire in the accordance developed algorithm the calculated values must be compared with border-values to predict class of reaction to fire of material.

8 Conclusions

1. Most of species of wood self ignition does not occur under heat flux below 14 kW m^{-2} and the critical heat flux is approximately 3 kW m^{-2} below this sustained wood burning is not possible. Constitutive temperature gradient exists in the depth of the wood to be subjected to heat flux. Dynamic of wood heating up depends from internal heat radiation that depends from fire process advancement. The duration of constant approximately 373 K temperature period in moisture evaporation zone increases with wood moisture content and decreases with heat flux gradient inside wood.
2. The close correlation exists between wood moisture content and FIGRA and THR_{600s} values. Spruce wood reaction to fire parameters FIGRA and THR_{600s} could be predicted by the linear relationship with wood moisture content.
3. Wood of trees species growing in Latvia reaction to fire parameters vary: by 20% in FIGRA index and by 80% in THR_{600s} .
4. The external heat flux has substantial influence on the wood ignition time that that alter by power function of heat flux value, as well as it has significant influence on the wood heat release rate that alter as linear function of heat flux value.
5. Wood coatings material hasn't significant influence on the parameters FIGRA and THR_{600s} for classification of wood materials by reaction to fire, because their amount to unit of area is small, but several coatings materials could drastically decrease wood ignition time and favour flame spread.
6. Wood thermal modification and acetylation worsens reaction to fire parameters and could be critical for classification with inferior class of reaction to fire.
7. The smoke production indexes SMOGRA and TSP_{600s} are not influenced by wood moisture content. Smoke production by hard wood burning is substantially less than from softwood.
8. The wood composite materials burning intensity and heat release rate are greater than for solid wood except thick play-wood. Thermally thin wood composite materials burning process goes on with the several times greater heat release rate and considerable flame spread that decreases reaction to fire class down to E class.
9. The method to predict reaction to fire parameters of timber with reasonable certainty on the base of wood moisture content, species of tree, surface smoothness, material thickness, and surface treatment data is created. The analogue method developed for wood composite materials could be used only for prediction of materials reaction to fire changes trend with changes in data set.

9 Recommendations for practice

1. Wood of trees species growing in Latvia reaction to fire parameters vary: by 20% in FIGRA index and by 80% in THR_{600s} .
2. The intumecent coatings are recommended as preferable fire retardants in dry construction operation conditions because they isolate wood from external heat flux. The external heat flux rate alters wood ignition time by power function of heat flux value, as well as it alters wood heat release rate as linear function of heat flux value.
3. The thickness of wood composite material has no substantial influence on the parameters of reaction to fire if their thickness could be defined as thermally thick that is at least 10 – 15 mm.
4. Wood treatment with intumescent fire retardants could improve wood construction reaction to fire parameters several times and the highest reaction to fire class for wood products the B could be attained. The Influence of one fire retardant could not be transmitted to another fire retardant with the same retention of fire retardant in/on wood. Every fire retardant potential class of reaction to fire must be evaluated that is dependent from species of wood, type of material, construction member dimensions treated as well as from treatment technologies.
5. All fire retardants diminish their efficacy with increase of heat flux. SBI method partially evaluate potential fire risk in case of wood treated with fire retardants, because in the test material is subjected to low heat flux in comparison with heat fluxes in real fires. Only intumescent fire retardants diminish heating up of wood.
6. The method to predict reaction to fire parameters of timber with reasonable certainty on the base of wood moisture content, species of tree, surface smoothness, material thickness, and surface treatment data could be used to estimate fire risks and for solid wood member replacements with other one.