VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Donatas Lipinskas

# GAISRO KILIMO VIETOS NUSTATYMAS PAGAL MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ APANGLĖJIMĄ

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02 T)

Vilnius, 2006

Disertacija rengta 2002–2006 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

Prof. habil. dr. Romualdas Mačiulaitis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02 T).

**TURINYS**

ĮVADAS ..... 5
1. LITERATŪROS APŽVALGA ..... 7
1.1. Gaisro techninė ekspertizė, jos tikslai ..... 7
1.2. Pagrindinių gaisro parametrų nustatymo metodų apžvalga ..... 8
1.3. Gaisro dinaminių procesų įvertinimas kompiuteriniais skaičiavimo būdais ..... 14
1.4. Natūraliosios medienos bandinių apanglėjimas modeliuojant ASTM E 119 arba ISO 834 sąlygas ..... 19
1.5. Medienos apanglėjimo greičiai, kai šilumos srautas yra reguliuojamas ..... 24
1.6. Šilumos srautai ir apanglėjimo greitis, esant išplitusiam patalpoje gaisrui, ir pirolizės šilumos poveikis degimo procesui ..... 27
1.7. Medienos apanglėjimo greičiai, kai mediena apsaugota antipirenais ..... 30
1.8. Literatūros analizės bendrosios išvados ..... 31
2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS, METODIKOS BEI ĮRANGA ..... 33
2.1. Tyrimams naudotų medžiagų svarbiausios charakteristikos ..... 33
2.2. Bandymo metodas specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera ..... 34
2.3. SBI bandymo metodas ..... 40
2.4. Medžio anglies elektrinės varžos matavimo įranga ..... 44
2.5. Tyrimų rezultatų statistinio apdorojimo ypatumai ..... 46
3. GAISRO KILIMO VIETOS NUSTATYMO TYRIMAI ..... 48
3.1. Medienos apanglėjimo greičio ir senojo gaisro kilimo vietos nustatymo metodo patikimumas ..... 52
3.1.1. Specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera gauti tyrimų rezultatai ir jų aptarimas ..... 52
3.1.2. SBI įranga gautų rezultatų aptarimas ..... 58
3.2. Naujojo gaisro trukmės ir gaisro kilimo vietos nustatymo metodo sukūrimas ir pagrindimas ..... 62
3.2.1. Medienos tankio įtaka ..... 64
3.2.2. Šilumos srauto tankio įvertinimas ..... 65
3.2.3. Šilumos, reikalingos pirolizės produktams susidaryti, apskaičiavimas ..... 67
3.3. Skyriaus išvados ..... 73
4. NAUJOJO METODO, SKIRTO GAISRO KILIMO VIETAI NUSTATYTI, PRAKTINIO PRITAIKYMO PAVYZDŽIAI ..... 74
4.1. Pirmasis pavyzdys ..... 74
4.2. Antrasis pavyzdys ..... 79
4.3. Skyriaus išvados ..... 82
5. ATLIKTŲ TYRIMŲ PALYGINIMAS SU KITŲ MOKSLININKŲ DARBAIS ..... 83

6. GALUTINĖS IŠVADOS ..... 89
7. LITERATŪROS SĄRAŠAS ..... 90
8. AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA ..... 97

Priedai

1 priedas. Skirtingos rūšies medienos apanglėjimo tyrimai vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera..99

2 priedas. Eksperimentiniai duomenys „indukciniam laikui“ nustatyti .....107

3 priedas. Gaisro kilimo vietos nustatymo medinių konstrukcijų pastatuose metodika (GTC/GT 5)...108

4 priedas. Apanglėjusios medienos bandinių paėmimo planas-schema.....123

5 priedas. Pirmojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti naujuoju metodu.....124

6 priedas. Pirmojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti senuoju metodu.....125

7 priedas. Apanglėjusios medienos bandinių paėmimo duomenų lentelė.....126

8 priedas. Antrojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti senuoju metodu.....127

9 priedas. Antrojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti naujuoju metodu.....128

# ĮVADAS

Darbo aktualumas. Daugelyje šalių mažo aukštingumo namų statybai gaminamoms įvairioms konstrukcijoms (stogų laikančiosioms konstrukcijoms, sienoms, sijoms, kolonoms ir kt.) dažnai naudojama mediena. Kilus gaisrui tokiuose pastatuose, labiausiai iš visų degimo požymių yra pastebimas medžio detalių (konstrukcijos elementų) apanglėjimas. Gaisro tyrinėtojams ypač aktualu susieti šį požymį su tam tikrais svarbiais gaisro poveikiais, pvz., jo trukme ar temperatūra, kad būtų galima nustatyti tikslią gaisro kilimo vietą (židinį) bei kilimo būdą (priežastį). Gaisro dinamika apsunkina medienos degimo trukmės nustatymo tikslumą, nes medinėje konstrukcijoje vyksta daug papildomų fizikinių-cheminių procesų. Šie procesai daro didelę įtaką konstrukcijų atsparumui ugniai, o šios įtakos tyrimams reikalingos skirtingų mokslo šakų žinios. Autoritetingi specialistai mano, jog, tiriant gaisrus, apanglėjimo greitis yra nepakankamai įvertinamas ir jam skiriama per mažai dėmesio. Lietuvoje naudojamose mokslininkų rekomendacijose [1-10] pateikiami apibendrinti medienos apanglėjimo greičiai, aptariama anglies sluoksnio matavimo specifika, teoriniais bei instrumentiniais metodais apskaičiuojama degimo trukmė, tačiau neįvardijama svarbių veiksnių įtaka.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Disertacinio darbo tikslas – parodyti, kaip pagrįstai ir kruopščiai išanalizuotus įvairius apanglėjimo atvejus bei atliktus atitinkamus nuodugnesnius apanglėjimo proceso tyrimus ir matavimus galima panaudoti nustatant gaisro kilimo vietą. Šiam tikslui naudinga tobulinti gaisro kilimo vietos nustatymo metodą. Reikia pasiekti, kad naujasis metodas leistų daug tiksliau nustatyti gaisro poveikį medinėms konstrukcijoms, atsižvelgiant į temperatūrą ir gaisro trukmę, o kartu palengvintų atlikti pagrindinę gaisro tyrimo užduotį – nustatyti tikslią gaisro kilimo vietą bei jo priežastis.

Darbo tikslui pasiekti buvo suformuluoti šie moksliniai ir techniniai uždaviniai:

1. Tikslingai taikyti bandymų metodus (specialią vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamerą, SBI (*Single Borning Item*) įrangą ir kt.) ir atlikti medienos apanglėjimo tyrimus, įvertinti medienos tankį, drėgnį ir šilumos srauto tankį.
2. Nustatyti natūraliosios medienos ir medienos su antipirenais įtaką šilumos kiekiui, reikalingam medienos lakiesiems produktams išgarinti, ir laiko atkarpai (vadinamajam „indukciniam laikui“), kuri trunka iki momento, nuo kurio apanglėjimo procesas gilyn jau vyksta greičiu, artimu pastoviam.
3. Pagrįsti šiuos parametrus SBI metodu gautų rodiklių (suminės šilumos (THR (600)), gaisro didėjimo spartos (FIGRA) bei dūmų kiekio didėjimo spartos (SMOGRA)) vidutinėmis vertėmis.
4. Naudojantis SBI bandymo įranga, nustatyti laisvojo deguonies pritekėjimo į degimo zoną koeficiento vertę.
5. Remiantis gautais naujais eksperimentiniais duomenimis, įvertinti senojo gaisro kilimo vietos nustatymo metodo patikimumą.

6. Pritaikius matematinės statistikos metodus, išvesti naujas medienos apanglėjimo greičio ir degimo trukmės apskaičiavimo priklausomybes ir patikrinti jų tikslumą.

7. Remiantis konkrečių realių gaisrų ekspertizių duomenimis, palyginti senąjį ir naująjį metodus, parodyti, jog naujojo metodo privalumas – vertinimo tikslumas.

Mokslinis naujumas. Pirmą kartą paprastais inžineriniais metodais nustatant gaisro kilimo vietą buvo kompleksiškai panaudoti šie parametrai: medienos tankis ir drėgnis, medienos rūšis, šilumos srauto tankis, šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti, apsaugos priemonės (antipirenai) ir kt.

Praktinė vertė. Remiantis moksliniais tyrinėjimais, sukurta apanglėjimo greičio apskaičiavimo priklausomybė ir įteisinta gaisro kilimo vietos nustatymo metodika „Gaisro kilimo vietos nustatymas medinių konstrukcijų pastatuose“ (GTC/GT 5). Ši nauja metodika įdiegta Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Vidaus reikalų ministerijos Gaisrinių tyrimų centro Ekspertizių skyriuje. Metodika naudosis specialistai visuose šalies ikiteisminio tyrimo skyriuose.

Aprobacija. Darbe išdėstyta medžiaga skelbta viename mokslinių pranešimų rinkinyje, įrašytame į Mokslinės informacijos instituto sąrašą (*ISI Proceedings*), dvejuose recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose ir šešiuose kituose mokslo leidiniuose. Pagrindiniai disertacinio darbo teiginiai buvo aptarti tarptautinėse ir respublikinėse mokslinėse konferencijose:

*1. 14-oje tarptautinėje Baltijos šalių konferencijoje „Materials Engineering – 2005“,* įvykusioje Kaune 2005 m. spalio 6–7 d.

2. *8-oje tarptautinėje konferencijoje „Modern building materials, structures and techniques“,* įvykusioje Vilniuje 2004 m. gegužės 19–21 d.

3. *7-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“,* įvykusioje Vilniuje 2004 m. kovo 25–26 d.

4. *6-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“,* įvykusioje Vilniuje 2003 m. kovo 27–28 d.

5. *Tarptautiniame seminare „Fire investigation methods and lessons learned from fires and other relevant incidents“*, įvykusiame Revingėje (Švedija) 2005 m. birželio 16–19 d.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

Gaisrų tyrimo praktikoje naudojamasi įvairiais tyrimo metodais, leidžiančiais pasiekti pagrindinius gaisrų tyrimo tikslus – nustatyti gaisro kilimo vietą ir priežastis. Patikimas gaisro priežasties įvardijimas galimas tik nustačius gaisro kilimo vietą. Būtent tai ir yra vienas iš sunkiausių gaisro tyrimo klausimų, aptariamų įvairiuose literatūros šaltiniuose [1–3]. Dėl šios priežasties domėjimasis gaisro židinio paieška neatslūgsta ir šiandien. Tikrinamos ir tobulinamos senosios [4], kuriamos naujos metodikos [5], kuriose vis labiau akcentuojamas tyrimo metodų patikimumas ir tikslumas.

Šiuo metu Lietuvoje medinėms konstrukcijoms plačiausiai taikomas instrumentinis gaisro kilimo vietos nustatymo metodas. Ilgą laiką naudojant šį metodą, nustatyta, kad gauti rezultatai nėra visiškai patikimi, nes nepakankamai įvertinamos medienos savybės, jos apsauga antipirenais, gaisro apkrovos dydžio įtaka ir pan. Kadangi gaisrų tyrimo uždavinys yra ne tik kuo tiksliau nustatyti gaisro kilimo vietą, bet ir gauti kuo tikslesnius gaisro trukmės bei kitus jo plėtimosi parametrus (temperatūrą, gaisro plitimo kelius ir pan.), iškyla būtinybė sukurti tobulesnį metodą ir maksimaliai išplėsti jo taikymo galimybes.

## 1.1. Gaisro techninė ekspertizė, jos tikslai

Techninė gaisrų ekspertizė, kaip teigiama šaltiniuose [2–3], yra gaisro židinio, techninės gaisro priežasties, degimo plitimo kelių ir laiko, priežastinio ryšio tarp medžiagų, daiktų degumo arba techninio įrenginio, prietaiso gedimo, technologinio proceso sutrikimo ir gaisro kilimo fakto, techninių įrenginių ir jų eksploatacijos sąlygų, technologinių procesų režimo, priešgaisrinio saugumo taisyklių reikalavimų atitikimas, atsakingų už priešgaisrinio saugumo taisyklių vykdymą asmenų nustatymas šios ekspertizės naudojamais metodais. Kadangi tarp specialistų dažni gaisro priežasties ir techninės gaisro priežasties sąvokų taikymo nesusipratimai, būtina išaiškinti jų skirtumus.

Kaip rašoma aiškinamajame žodyne [6], **priežastis** – tai reiškinys arba procesas, kuris sukelia kito reiškinio arba proceso būsenos pokytį. Taigi gaisro priežastis – tai procesas, sukėlęs degiųjų medžiagų užsidegimą gaisro židinyje. Nagrinėjant gaisro kilimo procesą, visada galima nustatyti tam tikrus bendrus dėsningumus, materialines sąlygas ir žmogaus veikos (arba neveikos) įtaką šiam procesui. Technine gaisro priežastimi vadinama konkretaus uždegimo šaltinio ir degiųjų medžiagų sąveika, sukėlusi pastarųjų užsidegimą.

Atliekant gaisro technines ekspertizes, naudojamasi įvairių mokslo šakų laimėjimais (kriminalistika, fizika, elektrotechnika, statyba ir kt.). Jais remiantis moksliškai pagrindžiamos gaisro techninės ekspertizės išvadoje pateikiamos nuostatos bei įrodomas jų tikroviškumas.

Tikslus gaisrų priežasčių nustatymas, jų vertinimas ir analizė turi įtakos gaisrų prevencijai, sprendžiant nusikaltimo sudėties buvimo ar nebuvimo klausimus. Gaisrų tyrimo išvadoje pateikti

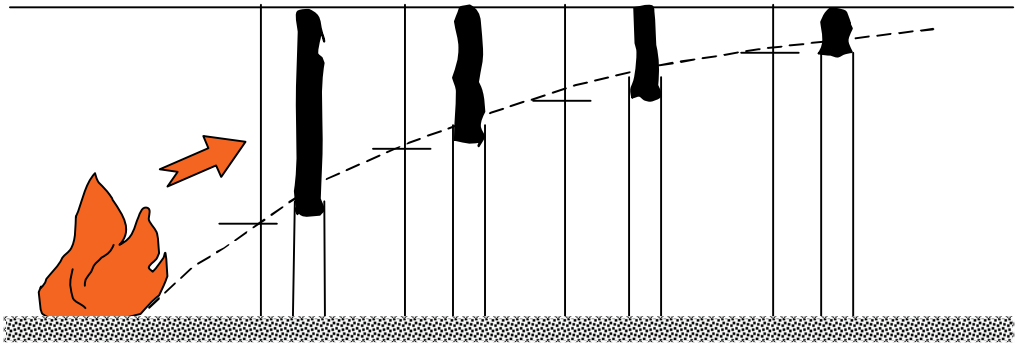
teisingą gaisro kilimo priežastį galima tik nustačius tikrąją gaisro kilimo vietą. Tačiau būtent tai ir yra sunkiausia gaisrų tyrimo proceso sritis, kelianti tyrėjams daugiausia problemų.

### 1.2. Pagrindinių gaisro parametrų nustatymo metodų apžvalga

Bendroji schema ir esminiai gaisro kilimo vietos nustatymo metodikos pagrindai yra pateikti A. I. Fedotovo ir B. V. Megorskio darbe [3] bei kitose gaisrus tiriantiems pareigūnams skirtose metodinėse rekomendacijose [2, 7–9]. Šiuose šaltiniuose pateikiama, kaip nustatyti gaisro kilimo vietą (gaisro židinį) remiantis gaisravietės vizualios apžiūros, liudytojų apklausos ar objekto techninės ir statybinės dokumentacijos tyrimo duomenimis. Šiuos tyrimo būdus galima apibūdinti kaip *subjektyvųjį* metodą, kuriuo naudojantis ieškoma svarbiausių gaisro kilimo vietos požymių. Gaisro židinio požymiais gali būti tam tikri reiškiniai, atspindintys degimo procesus, technikos įrenginių, veikiančių gaisro kilimo metu, darbas, žmonių ir gyvulių reakcija į gaisrą ir pan. Gaisro kilimo vietos požymiu gali būti ir žūtis žmogaus, kuris neturėjo galimybės išeiti iš degančios patalpos. Neretai žuvusiojo kūnas randamas labiausiai nuo gaisro židinio nutolusioje vietoje. Paprastai jo galva būna pasukta nuo gaisro židinio. Iš to galima spręsti, kad žmogus judėjo išėjimo iš patalpos link.

Tokie požymiai dažniausiai nenurodo tikslios gaisro kilimo vietos, o tik jo kryptį. Neretai šie požymiai yra svarbūs vykstant ikiteisminiam tyrimui.

Degimo krypties požymius arba požymius, kuriais remiantis nustatoma gaisro kilimo vietos kryptis, rekomenduojama nustatytais atvejais, kai gaisrai buvo likviduoti išplitusio gaisro pabaigoje arba jo gesimo stadijoje. Šis požymis nustatomas pagal dviejų arba daugiau elementų (pvz., tolygiai gaisro plote išdėstytose kolonose) pažeisto ir nepažeisto ilgių santykio. Šis dydis, tolstant nuo gaisro židinio pasikartojantiems elementams, mažėja. Kolonose apatinė pažeidimo zonos riba, tolstant nuo gaisro kilimo vietos, pamažu kyla prie perdangos (1.1 pav.).

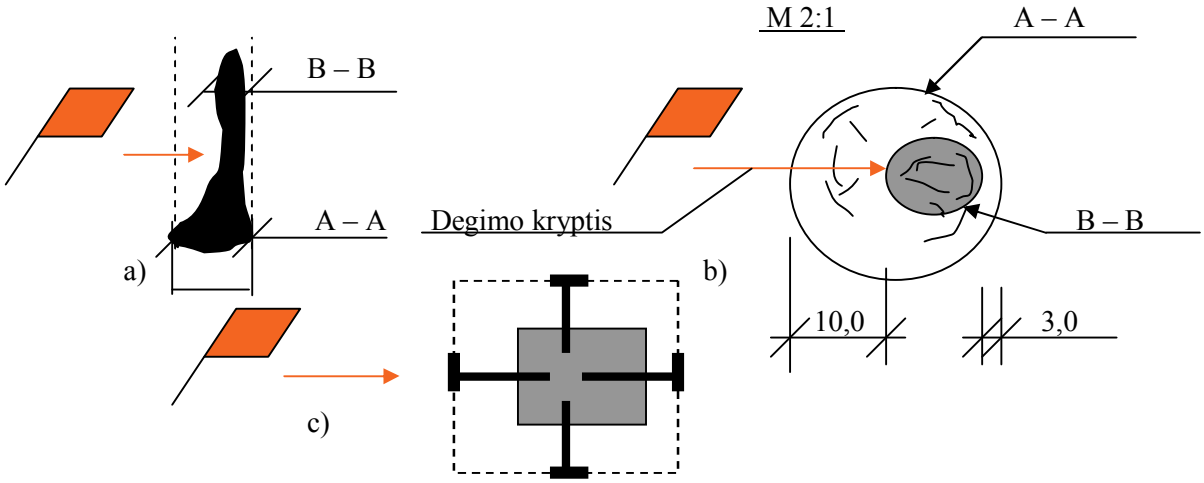


**1.1 pav**. Konstrukcinių elementų pažeidimų ir krypties į gaisro židinį nustatymo pavyzdys [7]

Esant dideliems vienodų medinių konstrukcijų pažeidimams, taip pat išryškėja degimo krypties požymiai – artėjant prie gaisro židinio, medinių konstrukcijų apanglėjimo gylis didėja, nes jų degimo

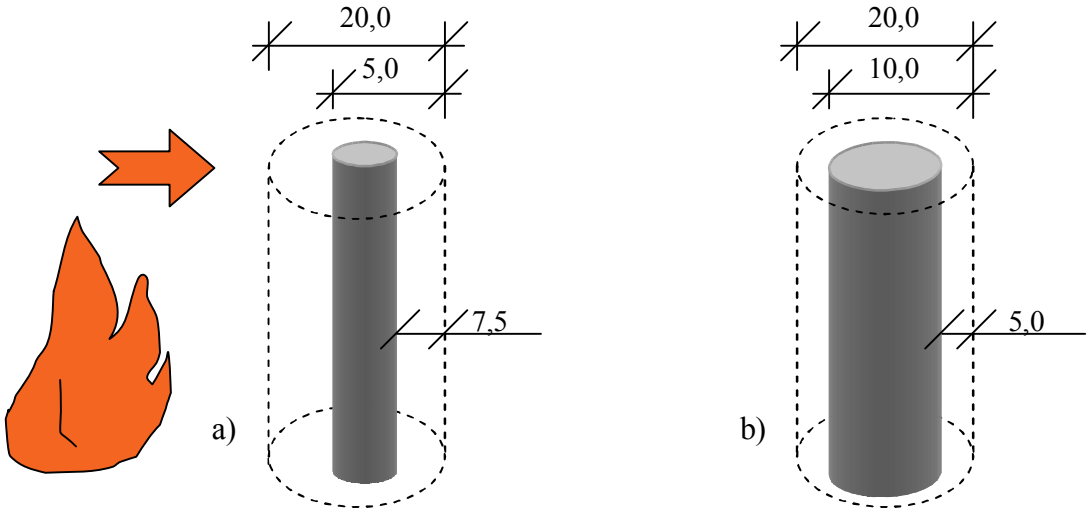
laikas ilgesnis (1.1 pav.). Atsižvelgus į medienos apanglėjimo greitį – 0,4–1,2 mm/min, galima apytiksliai nustatyti degimo laiką ir panaudoti šią laiko charakteristiką ieškant gaisro kilimo vietos.

Degimo krypties požymį galima nustatyti ir pagal konkretų elementą – koloną, stalą ir pan. Tokiu atveju apie degimo kryptį sprendžiama iš elemento pažeidimo asimetrijos, t. y. iš skirtingo elemento pažeidimo laipsnio jo horizontaliajame pjūvyje (vizualiai nustatyti skersai perpjovus medinius elementus arba pagal į medieną įkaltas vinis (1.2 pav., c)). Labiausiai pažeista pusė bus nukreipta į gaisro židinį.




**1.2 pav.** Medienos pažeidimų asimetrijos nustatymo pavyzdžiai: a) vizualiai matoma pažeidimo asimetrija; b) medienos skerspjūvių palyginimas asimetrijai nustatyti; c) asimetrijos nustatymas pagal įkaltas į medinę konstrukciją vinis [7]

Kitas ne mažiau svarbus gaisro plėtimosi krypties nustatymo būdas – vienodų konstrukcinių elementų sudegimo tyrimas (1.3 pav.).




**1.3 pav.** Degimo krypties nustatymas pagal dviejų vienodų konstrukcinių elementų sudegimą [7]

Esant dideliems ir sudėtingiems gaisrams, duomenų, surinktų subjektyviaisiais, t. y. vizualiais metodais, nepakanka. Reikia atlikti papildomus tyrimus taikant laboratorinius metodus. Tokie tyrimo

būdai vadinami *objektyviaisiais* metodais. Šie metodai numato matavimo prietaisų, kurie leidžia gauti tikslesnius rezultatus, palyginti su subjektyviaisiais metodais, panaudojimą. Bendroji gaisro židinio vietos įvertinimo pagal statybinių konstrukcijų pažeidimų lygį schema pavaizduota 1.4 paveiksle.

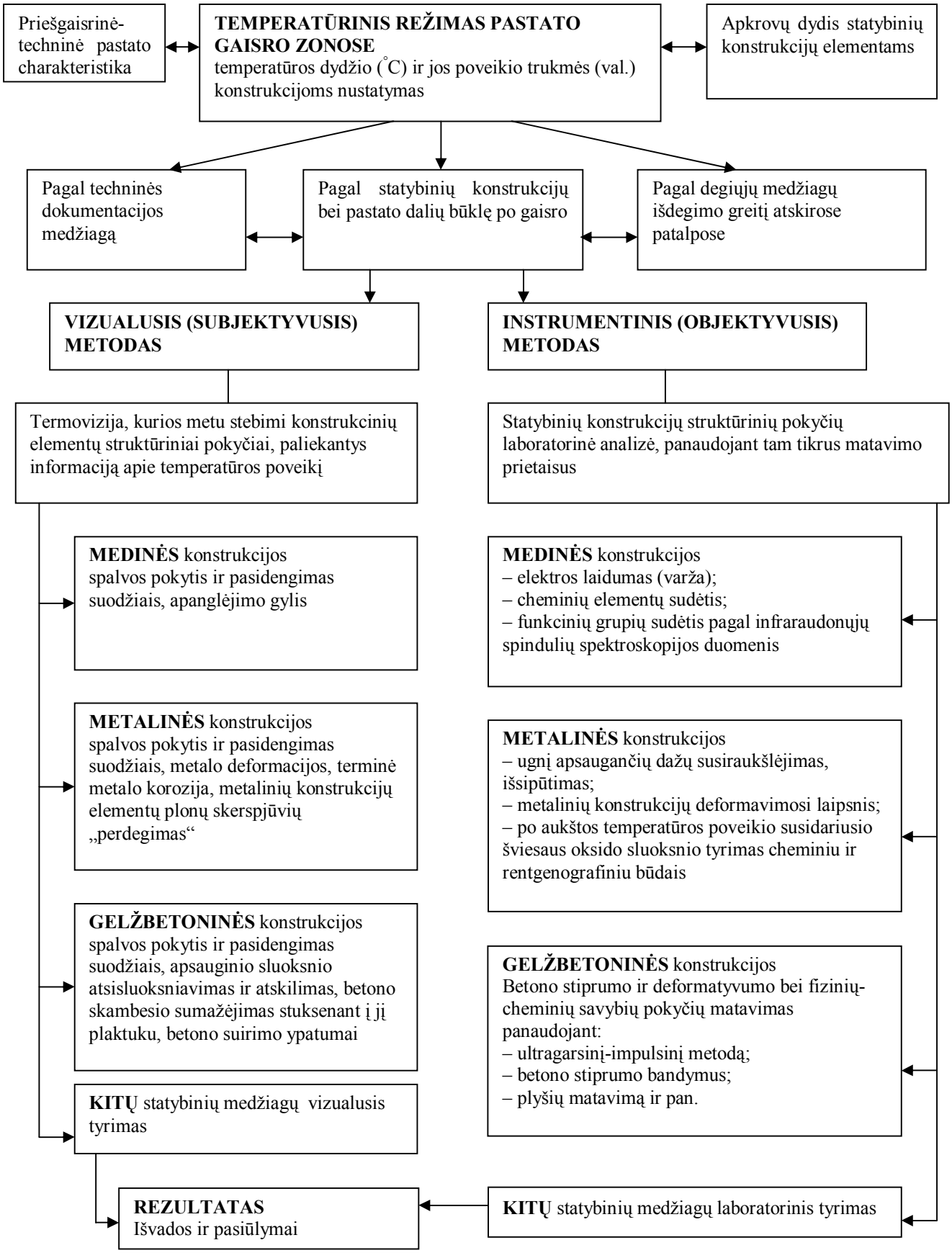
Literatūros šaltinyje [9] yra pateikti instrumentiniai metodai, kuriuos taikant iš likusių gaisravietėje konstrukcinių medžiagų ar išlikusių apdegusių jų liekanų galima gauti svarbius duomenis apie gaisro kilimo vietą: apskaičiuoti orientacinę gaisro temperatūrą ir degimo trukmę, įvertinti įvairių temperatūrinių pažeidimų vietas konstrukcijose ir pan. Metodai remiasi nustatytais glaudžiais koreliaciniais ryšiais tarp atskirų medžiagų vidinių struktūrų charakteristikų ir savybių prieš ir po gaisro. Dėl temperatūrinio poveikio keičiasi daugelio konstrukcijų medžiagų struktūra ir savybės, dažnai vyksta nematomi pokyčiai, kuriuos galima užfiksuoti tik instrumentiniais metodais. Literatūroje pateikiami temperatūrinio poveikio nustatymo metodai skirtingoms statybinėms konstrukcijoms (1.4 pav.):

1. Betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms – pagal betono stiprio ir deformatyvumo bei fizinių ir cheminių savybių pokyčių rodmenis, naudojant ultragarsinį-impulsinį metodą, betono stiprio bandymus, plyšių matavimus ir kt.

2. Metalinėms konstrukcijoms, panaudojant rekristalizacijos lygio nustatymą, – išsimagnetinimo srovės $I_i$ nustatymo metodu, susidariusio šviesaus oksido sluoksnio (žaizdro) tyrimą cheminiu, rentgenografiniu būdais ir kt.

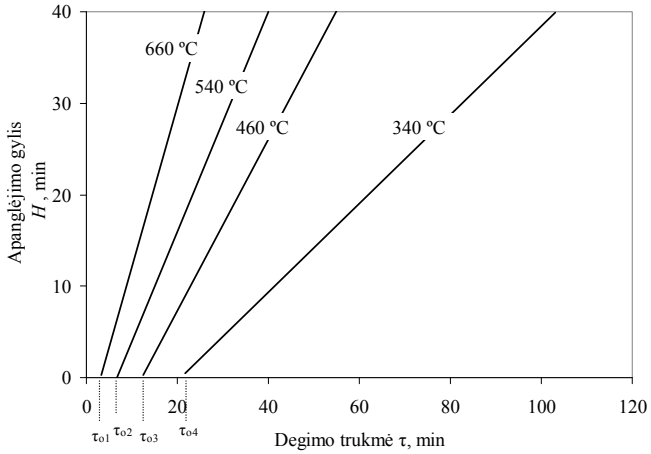
3. Medinėms konstrukcijoms, atliekant medžio anglies tyrimus pagal elektros laidumą, lakiųjų medžiagų ir elementinę anglies sudėtį (santykis H/C) bei funkcinių grupių pagal infraraudonųjų spindulių spektroskopijos duomenis.

Vienas iš tokių metodų šiuo metu taikomas ir Lietuvoje. Metodas [3, 9–10] skirtas medžio anglies tyrimui atlikti. Jo pagrindą sudaro anglies fizikinių-cheminių savybių ir medienos apanglėjimo gylio anglies poėmio vietoje vertinimas. Matuojant medžio anglies varžą *R,* Ω, akcentuojamos ir kai kurios anglies ypatybės, nurodančios specifines jos susidarymo sąlygas. Medžio anglies varža, gaisro metu didėjant apanglėjimo procesams, po truputį mažėja nuo 10 GΩ iki 1 Ω. Anglies bandiniai imami iš vietų, kuriose pagal degimo ir šiluminio poveikio požymius galėjo būti gaisro židinys arba ilgalaikio smilkimo zona, taip pat iš kitų giliausiai apanglėjusių medinių konstrukcijų vietų, prieš tai atlikus apanglėjusios medinės konstrukcijos anglies storio $h_a$, mm, sudegusios konstrukcijos storio $h_n$, mm, ir tikrojo (pradinio) konstrukcijos storio *h,* mm, matavimus. Iš gaisravietės paimti anglies bandiniai laboratorijoje yra išdžiovinami džiovykloje iki 105 °C temperatūroje. Vėliau, remiantis Priešgaisrinės apsaugos mokslo tyrimo instituto (toliau – PAMTI) (Rusija) specialistų [9–10] rekomendacijomis, Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento Gaisrinių tyrimų centre specialia įranga (presu) išmatuojama kiekvieno anglies bandinio elektrinė varža *R,* Ω.




**1.4 pav.** Gaisro kilimo vietos įvertinimas pagal statybinių konstrukcijų ir jų medžiagų pažeidimo lygį [9]

Medienos apanglėjimo greičiui įtakos turi šiluminė apkrova, tenkanti konstrukcijos paviršiui, ir šiluminės apkrovos vertės kaita, priklausomai nuo terminio poveikio trukmės. Ši tema plačiai nagrinėta C. P. Butlerio [11] ir naujesniuose R. H. Whito [12–13] darbuose. Šią problemą sprendė ir rusų mokslininkai [8–10], kurie, atlikę tyrimus skirtingose temperatūrose, parodė, kad apanglėjimo gylis priklausomai nuo degimo trukmės išreiškiamas tiesinėmis priklausomybėmis (1.5 pav.).




**1.5 pav.** Medienos apanglėjimo gylio $H$ priklausomybė nuo degimo trukmės τ, esant vidutinėms temperatūroms [10]

Remiantis 1.5 paveikslo duomenimis, galima nustatyti, kad žemėjant temperatūrai apanglėjimo greitis pastebimai mažėja. Tas pats apanglėjimo gylis gali būti pasiektas skirtingose temperatūrose skirtingu laikotarpiu, vadinasi, nėra tikslu tik pagal apanglėjimo gylį spręsti apie degimo trukmę ir kartu apie tikslią gaisro kilimo vietą. Siekdami įvertinti temperatūros poveikį medinių konstrukcijų apanglėjimui, Rusijos mokslininkai [8–10] ėmėsi tirti anglies fizines-chemines savybes ir nustatė, kad tarp temperatūros dydžio ir anglies elektrinės varžos vertės yra koreliacinis ryšys. Anglies varžos vertės kinta priklausomai nuo temperatūros poveikio, t. y. mažėjant temperatūrai, didėja varžos vertė. Atsižvelgdami į apanglėjimo gylį, elektrinę varžą ir pradinį medinės konstrukcijos storį, mokslininkai [8–10] pritaikė tokią temperatūros apskaičiavimo lygtį:

$$T = \frac{4540}{\ln \frac{B \cdot H \cdot P}{10 - P} + 2{,}15}, \tag{1.1}$$

čia $H$ – medienos apanglėjimo gylis, mm; koeficientas $B$ taikomas siekiant įvertinti medinės konstrukcijos storį; $P$ – anglies bandinio savitosios varžos dešimtainis logaritmas; $T$ – temperatūra, K.

1.1 lygtyje nurodytas medienos apanglėjimo gylis $H$ apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$H = h_a + h_n , \tag{1.2}$$

čia $H$ – medienos apanglėjimo gylis, mm; $h_a$ – anglies storis, mm; $h_n$ – nudegusios konstrukcijos storis, mm.

Koeficientas $B$, įvertinantis medinės konstrukcijos storį jos apanglėjimo kryptimi, nustatomas pagal tokią priklausomybę [9]:

$$B = \frac{\sqrt{h}}{6}, \tag{1.3}$$

čia $B$ – koeficientas, įvertinantis medinės konstrukcijos storį; $h$ – konstrukcijos elemento pradinis storis, šiluminio srauto poveikio atžvilgiu, mm.

Pradinį konstrukcijos storį $h$, anglies gylį $h_a$ bei sudegusios konstrukcijos storį $h_n$ galima nustatyti gaisravietėje, išmatavus jų vertes metaline liniuote ar slankmačiu. Gaisrinių tyrimų centro (toliau – GTC) laboratorijoje matuojama atrinkto anglies bandinio 0,7 cm aukščio stulpelio varža $R$, Ω, apskaičiuojamas (1.1) lygtyje esantis savitosios varžos dešimtainis logaritmas $P$:

$$P = \lg R_s = \lg(R \cdot 0{,}7), \tag{1.4}$$

čia $P$ – anglies mėginio savitosios varžos dešimtainis logaritmas; $R_s$ – apskaičiuota anglies mėginio stulpelio savitoji varža, Ω·cm; $R$ – anglies mėginio varža, Ω.

Taigi, nustatę temperatūrą apanglėjusios medienos mėginių atrinkimo vietoje, mokslininkai pasiūlė empirinę apanglėjimo trukmės $\tau_a$ (min) apskaičiavimo lygtį [9–10]:

$$\tau_a = \exp\left(1{,}38 \ln B \cdot H + 0{,}38 \ln \frac{P}{10 - P} - 1{,}19\right), \tag{1.5}$$

čia $\tau_a$ – apanglėjimo trukmė, min; $B$ – koeficientas, įvertinantis medinės konstrukcijos storį; $H$ – medienos apanglėjimo gylis, mm; $P$ – anglies mėginio savitosios varžos dešimtainis logaritmas.

Tačiau, kaip teigia mokslininkai [8–10], apanglėjimo trukmė, apskaičiuota pagal (1.5) lygtį, nėra galutinė gaisro trukmė, o tik sudėtinė jos dalis. Iš 1.5 paveikslo galima daryti išvadą, kad esant skirtingoms temperatūroms ilgėja laiko atkarpa, trunkanti iki momento, nuo kurio apanglėjimo į gylį procesas pradeda vykti greičiu, artimu pastoviam. Šią laiko atkarpą minėtieji mokslininkai pavadino „indukciniu laiku“ $\tau_o$, jis skaičiuojamas tik tokiu atveju, kai temperatūros vertė $T \leq 895$ K, pagal šią lygtį [9]:

$$\tau_o = 77 - 0{,}086 \cdot T, \tag{1.6}$$

čia $\tau_o$ – „indukcinis laikas“, t.y. laiko atkarpa, trunkanti iki momento, nuo kurio apanglėjimo į gylį procesas pradeda vykti greičiu, artimu pastoviam; $T$ – temperatūra, K.

Be to, mokslininkai [8–10] įsitikino, kad į degimo trukmę būtina įtraukti $\tau_{as}$ – anglies sudegimo trukmę, kuri įvertinama tokiu atveju, kai medinė konstrukcija suanglėjusi per visą jos storį ir

sudegusios anglies storis yra $\Delta h_n$. Anglies sudegimo trukmei $\tau_{as}$ apskaičiuoti PAMTI mokslininkai pasiūlė tokią empirinę priklausomybę [9]:

$$\tau_{as} = \Delta h_n \cdot \exp(690 \cdot T^{-1}), \quad (1.7)$$

čia $T$ – temperatūra, K; $\Delta h_n$ – sudegusios anglies storis, mm; $\tau_{as}$ – anglies sudegimo trukmė, min.

Sudėjus visas gautas (1.5–1.7) priklausomybes, buvo gauta galutinė apskaičiuojama gaisro poveikio trukmė τ, min, apanglėjusios medienos mėginio atrinkimo vietoje. Ji skaičiuojama pagal tokią lygtį:

$$\tau = \tau_b + \tau_{as} = (\tau_a + \tau_o) + \tau_{as}, \quad (1.8)$$

čia $\tau_a$ – medienos apanglėjimo trukmė, min; $\tau_o$ – „indukcinis laikas“, min; $\tau_b$ – bendra medienos apanglėjimo trukmė, min; $\tau_{as}$ – anglies sudegimo trukmė, min; $\tau$ – apskaičiuota gaisro poveikio trukmė, min.

Šio aptarto metodo [3, 9–10] problema yra ta, kad atliekant empirinius skaičiavimus neatsižvelgiama nei į medienos tankį, nei į jos drėgnį, nei į apsaugos priemonių (antipirenų) įtaką medienos degimo trukmei. Be to, galima manyti, kad medienos su antipirenais „indukcinis laikas“ turi būti ilgesnis atitinkamose temperatūrose nei nurodomos 1.5 paveiksle Todėl, norint tiksliau nustatyti gaisro charakteristikas, būtina papildomai ištirti išvardytų rodiklių poveikį – analizuoti kitų mokslininkų gautus tyrimų rezultatus arba patiems atlikti eksperimentinius tyrimus.

### 1.3. Gaisro dinaminių procesų įvertinimas kompiuteriniais skaičiavimo būdais

Tiriant statybines konstrukcijas po gaisro, svarbu nustatyti dvi pagrindines gaisro charakteristikas – gaisro temperatūrą ir trukmę. Šių svarbių gaisro charakteristikų nustatymas, pasibaigus gaisrui pastate, yra pagrįstas įvairiais skaičiavimo metodais. Abu parametrus galima nustatyti žinant temperatūrą konstrukcijos skerspjūvyje bei statybinės medžiagos elgseną (deformaciją, užsiliepsnojimo temperatūrą, struktūros pokytį), atsižvelgiant į aplinkos sąlygas. Tiksliai nustatyti temperatūros pasiskirstymą konstrukcijos skerspjūvyje skaičiavimo metodais sudėtinga dėl gaisro proceso dinaminio pobūdžio, nestacionaraus šiluminio proceso, statybinių medžiagų šiluminių charakteristikų aukštoje temperatūroje tikslaus kitimo įvertinimo, deformacijų verčių konstrukcijų sandūrose, medžiagų destrukcijos bei virsmų aukštoje temperatūroje, taip pat dėl konkrečių tikslių ir patikimų medžiagos degumo rodiklių stokos.

Siekiant supaprastinti išvardytų veiksnių įtaką, dažniausiai daromos tokios skaičiavimo prielaidos:

– gaisro poveikis išreiškiamas temperatūros-laiko kreive, kuri gali būti tiek eksperimentinių tyrimų rezultatas, tiek standartizuota funkcija. Šiuo atveju supaprastinamas šilumos mainų tarp gaisro patalpos ir konstrukcijos sprendimas, nes realiuose pastatų gaisruose temperatūros kaita, taip pat jos perdavimas

konstrukcijai priklauso nuo daugelio veiksnių, kurie kiekvienu atveju yra skirtingi. Dažniausiai šilumos perdavimas konstrukcijai dalijamas į perdavimą spinduliuote bei konvekcija;

– konstatuojama, kad statybinių medžiagų šiluminės charakteristikos priklauso nuo temperatūros, bet vadovaujamasi prielaida, kad medžiagos šiluminės charakteristikos nekinta [14–16]. Daugeliui statybinių medžiagų, kurios yra degios ar turi degiųjų priemaišų, tokia prielaida nėra logiška, nes realaus gaisro metu kinta medžiagos struktūra arba gali visai suirti;

– sudarant skaičiavimo modelį imama, kad pastatų konstrukcijų destrukcija, apanglėjimas bei sudegimas išreiškiami tik statybinės medžiagos tūrio generuojamu šilumos kiekiu [16–20]. Tai, regis, neaktualu laikančiosioms konstrukcijoms iš nedegiųjų statybinių medžiagų, kai tokios konstrukcijos (kolonos, sijos ir pan.) negali apriboti gaisro plitimo. Mažinant gelžbetoninių laikančiųjų konstrukcijų skerspjūvį, numatoma ir betono kritinė temperatūra, kuriai esant statybinė medžiaga praranda numatomas stiprumo savybes [21];

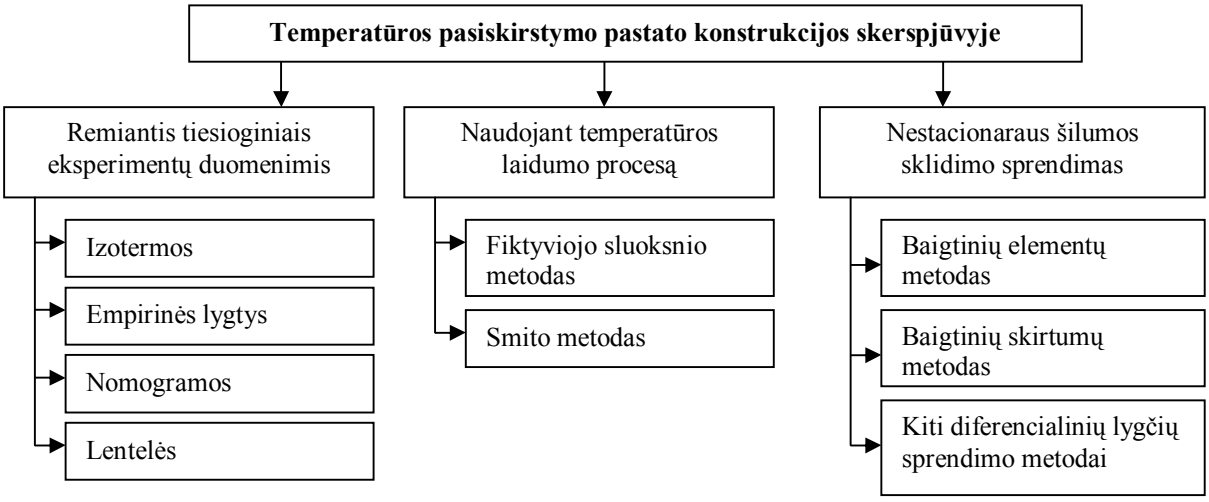
– sudarant skaičiavimo modelį tariama, kad gaisro poveikis modeliuojamas į konstrukcijos paviršių. Tada konstrukcija visame jos išoriniame kaitinamame paviršiuje yra kaitinama pagal tą pačią temperatūros-laiko priklausomybę, o poveikis kiekvienam skirtingai orientuotam paviršiui yra diferencijuojamas koeficientais [22]. Tačiau gaisro metu šilumos srauto tankis, sklindantis nuo gaisro šaltinio, nėra tolygus visam konstrukcijos paviršiui. Dažniausiai toks poveikis konstrukcijai nustatomas iš keleto krypčių.

Temperatūros sklidimas konstrukcijos skerspjūvyje priklauso nuo statybinių medžiagų šiluminių savybių, konstrukcijų geometrijos, gaisro apkrovos ir kt. Žinomus metodus temperatūrai bet kuriame statybinės konstrukcijos skerspjūvio taške nustatyti galima suskirstyti į 3 grupes (1.6 pav.) [16, 18, 21]:

– remiantis tiesioginių eksperimentų duomenimis;

– naudojantis medžiagų temperatūros laidumu;

– taikant nestacionarius šilumos sklidimo principus.




**1.6 pav.** Temperatūros laukų pastato konstrukcijos skerspjūvyje nustatymo metodų skirstymo schema

Eksperimentų metu gautų duomenų apdorojimo ir panaudojimo metodai gana dažnai taikomi praktikoje (kai dažniausiai naudojamos statybinės medžiagos būna pakankamai ištirtos), tačiau tokie metodai paprastai tinka tik konkrečioms tos pačios aibės konstrukcijoms iš tapačių bazinių medžiagų temperatūros laukams prognozuoti. Be to, tokio tipo metodikos reikalauja milžiniškų darbo bei medžiagų sąnaudų, nes natūralaus dydžio konstrukcijos tiriamos daug kartų, keičiant kurį nors veiksnį (geometriją, sudėtį, apkrovą ir pan.). Tačiau taikant šio tipo metodus galima spręsti apie temperatūros pasiskirstymą konstrukcijos skerspjūvyje, esant skirtingoms gaisro poveikio sąlygoms, ir kartu plačiau modeliuoti konstrukcijų darbą gaisro metu.

Kiti temperatūros pasiskirstymo konstrukcijos skerspjūvyje skaičiavimai pagrįsti temperatūros laidumo procesu [16–17, 23, 31]. Šios grupės metodų esmė yra tokia: kaitinant tiriamosios medžiagos paviršių tolygiu šilumos srautu pusiau apribotame kūne, galima rasti tokią plokštumą, kurioje temperatūra kyla pagal standartinę gaisro temperatūros-laiko $\tau_s$ kreivę. Iš čia kilo „fiktyviojo sluoksnio“ metodo pavadinimas, kai atstumas nuo pusiau apriboto kūno paviršiaus iki nagrinėjamojo taško buvo pavadintas „fiktyviuoju sluoksniu“. Šiuo atveju vyksta temperatūros laidumo procesas medžiagoje, kai dalis šilumos srauto yra sunaudojama temperatūrai pakelti įvairiuose medžiagos taškuose ir atitinkamame medžiagos storyje atsiranda temperatūros gradientas, kurio kaita gali būti sėkmingai nustatyta.

Pastaruoju metu vis labiau populiarėja kompiuterinių programų panaudojimas prognozuojant konstrukcijų elgseną gaisro metu. Temperatūros laukų pasiskirstymui statybinės konstrukcijos skerspjūvyje nustatyti yra naudojami įvairūs specializuoti programiniai paketai, kurie iš esmės padeda per gana trumpą laiką atlikti nestacionarių šilumos mainų sudėtingus skaičiavimus. Tokiuose programiniuose paketuose temperatūros sklidimui nustatyti dažniausia taikomi baigtinių elementų ir baigtinių skirtumų metodai [17–20, 30, 32–36]. Dauguma užsienio mokslinių organizacijų, užsiimančių konstrukcijų tyrimais, tam, kad nustatytų temperatūros laukų pasiskirstymą pastato konstrukcijose, turi susikūrę arba naudojasi įvairiomis kompiuterinėmis programomis. Lietuvoje moksliniams tikslams naudojami tik universalūs programų paketai, kurie nėra patogūs kasdieniniam naudojimui. Plačiausiai naudojamos specializuotos programos pateiktos 1.1 lentelėje. Be abejo, šiems skaičiavimams tinka ir universalūs programiniai paketai, kuriuose numatytas šiluminių uždavinių sprendimas.

**1.1 lentelė**. Kompiuterinių programų, skirtų temperatūros laukams prognozuoti gaisro metu, suvestinė

| Programos pavadinimas | Skaičiavimo metodas | Sukūrusi organizacija | Šalis |
|---|---|---|---|
| FIRES-T3 | Baigtinių elementų metodas | University of California | JAV |
| TASEF | Baigtinių elementų metodas | SP | Švedija |
| THELMA | Baigtinių elementų metodas | BRE | Anglija |
| STABA | Baigtinių elementų metodas | IBMB | Vokietija |

Baigtinių elementų ir baigtinių skirtumų metodais pagrįstos skaičiavimo programos naudoja nestacionarius šilumos mainus aprašančias sudėtingas diferencialines lygtis atskiroms šilumos mainų rūšims, kurios vyrauja tam tikrose konstrukcijos vietose (konstrukcijos paviršius, konstrukcija ir jos poros bei vidinės ertmės) ir kurių pagrindu atliekami skaičiavimai [19–20, 35]. Baigtinių elementų metodas leidžia įvertinti statybinės medžiagos šilumines savybes, kurių reikšmė gali priklausyti nuo temperatūros, modeliuoti įvairius gaisro poveikio scenarijus, šilumos kiekį, suteikiamą konstrukcijai konvekcijos ir šiluminės spinduliuotės būdu, bei pateikti rezultatus, priklausančius nuo gaisro trukmės ir temperatūros.

Remdamiesi šiluminio uždavinio matematine išraiška [16–17, 23, 31], daugelis mokslininkų nuo pat Antrojo pasaulinio karo laikų kūrė matematinius medienos pirolizės modelius. Kaip teigia visiškai neseniai tokių modelių analizę atlikęs M. L. Janssensas [37], jų sukurta daugiau nei 50. Moksliniai medienos pirolizės tyrinėjimai aprašyti 1.4 skyriuje. Apibendrinant duomenis galima teigti, kad pagrindinis kriterijus, įvertinantis medinės konstrukcijos sudegimą ir jos laikančiųjų galių netekimą, yra medienos apanglėjimo greitis. Savo ruožtu apanglėjimo greitis priklauso nuo tokių pagrindinių rodiklių: medienos drėgnio, medienos tankio, lignino kiekio medienoje, anglies susiformavimo rodiklio, deguonies kiekio. Visus šiuos rodiklius apibūdinti matematiškai gana sudėtinga. M. L. Janssenso atlikti darbai parodo koreliacinius šių rodiklių ryšius su medienos apanglėjimo greičiu. Jo [37] pateikiamas medienos pirolizės matematinis modelis išreiškiamas remiantis šiluminio balanso (energijos tvermės) dėsniu ir turi tokią išraišką:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla\left(\rho_g v_g c_g T\right) = \nabla\left(k \nabla T\right) - r_v\left(\Delta h_v + \Delta h_w\right) - r_p \Delta h_p \,, \tag{1.9}$$

čia $\rho$ – medienos, iš dalies apanglėjusios medienos ar anglies tankis, kg/m$^3$; $c_p$ – medienos, iš dalies apanglėjusios medienos ar anglies savitoji specifinė šiluma, J/kg·K; $T$ – temperatūra, K; $\tau$ – laikas, s; $\rho_g$ – pirolizės dujų išgaravimo tankis, kg/m$^3$; $v_g$ – išgaravimo greičio vektorius, m/s; $c_g$ – garavimo dujų savitoji specifinė šiluma, J/kg·K; $k$ – medienos, iš dalies apanglėjusios medienos ar anglies šilumos laidumo koeficientas, W/m·K; $r_v$ – vandens išgaravimo greitis, kg/s; $\Delta h_v$ – vandens išgaravimo šiluma, J/kg; $\Delta h_p$ – pirolizės šiluma, J/kg; $\Delta h_w$ – drėgnio šiluma, J/kg; $r_p$ – pirolizės greitis, kg/s.

Tokios priklausomybės apskaičiavimas nėra toks paprastas dėl jau anksčiau minėtų ypatybių. Pavyzdžiui, jau vien dėl to, kad medienos šilumos laidumo koeficientas priklauso nuo temperatūros, tankio ir drėgnio. Todėl M. L. Janssensas pateikia naują vienos dimensijos modelį, atitinkantį šiluminio balanso dėsnį, tokia išraiška:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \left(\Delta h_v + \Delta h_w\right)\rho_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} \,, \tag{1.10}$$

čia $\rho$ – medienos, iš dalies apanglėjusios medienos ar anglies tankis, kg/m$^3$; $c_p$ – medienos, iš dalies apanglėjusios medienos ar anglies savitoji specifinė šiluma, J/kg·K; $T$ – temperatūra, K; $\tau$ – laikas, s; $k$ – medienos, iš dalies apanglėjusios medienos ar anglies šilumos laidumo koeficientas, W/m·K; $\Delta h_v$ – vandens išgaravimo šiluma, J/kg; $\Delta h_p$ – pirolizės šiluma, J/kg; $\Delta h_w$ – drėgnio šiluma (J/kg); $x$ – ilgio koordinatė, m; $\rho_o$ – išdžiovintos medienos tankis, kg/m$^3$, $w$ – masės drėgnis, %.

Šiuolaikiniai programų paketai sudaro patogią darbo aplinką, o kompiuteriams yra sukurti grafiniai generatoriai, kurie leidžia labai vaizdžiai parodyti apskaičiuotų temperatūros laukų išsidėstymą [20, 33].

Be baigtinių elementų ir baigtinių skirtumų metodų dar yra kelios kompiuterinio modeliavimo rūšys, kur vadovaujamasi elektros srovės laidumo arba skysčio judėjimo dėsningumų analogija [14, 17, 30]. Pavyzdžiui, pagal šį principą buvo sukurtas Lukjanovo hidraulinis integratorius, kurio skaičiavimo procesas yra ilgalaikis ir gana sudėtingas, bet gauti rezultatai, autorių teigimu, yra pakankamai tikslūs [30]. Pateiktus dėsningumus plačiai pritaiko kiti autoriai [38–40] atlikdami savo skaičiavimus.

Kompiuterinio modeliavimo metodų pranašumas yra skirtingų medžiagų nagrinėjamosios konstrukcijos skerspjūvyje panaudojimo bei skaičiavimo galimybės skirtingose koordinačių sistemose, greitas priklausomybių nuo gaisro trukmės parengimas, vaizdus grafinis pateikimas ir pan. Šie metodai yra universalūs, leidžia lanksčiai nagrinėti šilumos mainus.

Naudojant praktikoje anksčiau aprašytus skaičiavimo metodus, pastebima, kad pagrindiniai trūkumai yra jų panaudojimo ir programinių paketų galimybės, ypač kai programa nenumato papildomų medžiagos charakteristikų ar poveikių konstrukcijai įtakos. Tai aktualu esant aukštoms temperatūroms, kurias konstrukcija pasiekia gaisro metu. Tuo labiau, kad pastaruoju metu daugėja naujų statybinių medžiagų, naudojamų įvairiose konstrukcijose. Medinės konstrukcijos šiuolaikinėje statyboje išlieka populiarios ypač dėl pagerėjusio apsaugos priemonių (antipirenų) poveikio. Degiose statybinėse medžiagose dėl laidumo vyksta šilumos sklidimas, tai ypač aktualu pradinėmis gaisro minutėmis. Temperatūros apskaičiavimas atitvarinėje ar laikančiojoje medinėje konstrukcijoje leidžia numatyti konstrukcijos užsiliepsnojimo momentą, įtaką liepsnos sklidimui, visišką medinės konstrukcijos perdegimą bei plyšių atsiradimą, vientisumo ar stiprumo savybių praradimą [17, 41–42].

Degiose medžiagose, kaip ir nedegiose, esant aukštoms temperatūroms, vyksta cheminės reakcijos. Šiuo atveju jos yra kitokio pobūdžio, tačiau visos turi įtakos temperatūros sklidimui konstrukcijos skerspjūvyje. Dažniausiai degiose medžiagose vyksta egzoterminės reakcijos [17, 41], kurios apsunkina šiluminio balanso įvertinimą. Degiųjų medžiagų šiluminiai rodikliai, palyginti su nedegiomis statybinėmis medžiagomis, tyrinėjami daug rečiau ir, be abejo, pateikiama daug mažiau tyrimų rezultatų. Vienas iš tokių tyrimų, siekiant surasti naujų statybinių medžiagų degumo ypatumų, pateiktas O. I. Molčiadskio darbe [43]. Šių tyrimų metu terminės analizės metodu buvo tirti apie 5 g svorio medienos bandiniai, o bandymų metu mėginta nustatyti masės netektį, išskiriamą energiją,

šilumos laidumo koeficientą, šiluminę talpą. Temperatūra kameroje buvo keliama 20 °C/val. greičiu, o medienos degimo intensyvumo priklausomybė, autorių teigimu, išsiskyrė į 2 etapus: medienos pirolizės produktų degimą ir anglies degimą.

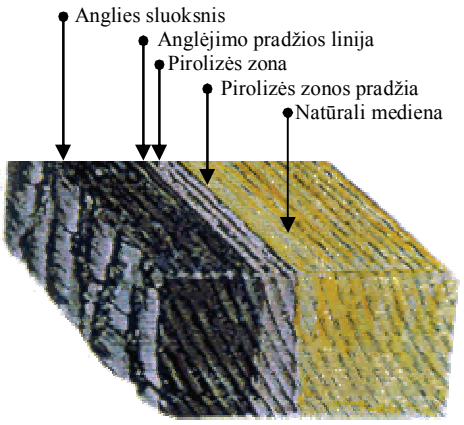
Analizuodami mokslinę literatūrą nustatėme, kad trūksta eksperimentinių duomenų apie skirtingų degiųjų medžiagų šiluminius rodiklius, o tai apsunkina ne tik temperatūros laukų konstrukcijos skerspjūvyje, bet ir gaisro trukmės apskaičiavimą kompiuteriniais metodais.

Nepaisant to, gaisro scenarijaus modeliavimas kompiuterinėmis programomis yra plačiai taikomas bei plėtojamas Vakarų Europos šalyse bei Jungtinėse Amerikos Valstijose. Taikymo sritys yra labai įvairios, naudojamos ir konkretiems gaisrams tirti ieškant gaisro kilimo priežasčių ar ginant atliktos gaisrų ekspertizės išvadas teisme [44–45]. Šis svarbus degimo charakteristikų nustatymo būdas yra perspektyvus, tačiau mūsų pasirinkti tyrimai yra nukreipti kita, ne mažiau svarbia ir problemiška instrumentinio metodo, naudojamo gaisro trukmei nustatyti, tolesnio tobulinimo linkme.

### 1.4. Natūraliosios medienos bandinių apanglėjimas modeliuojant ASTM E 119 arba ISO 834 sąlygas

Ilgą laiką pastatų projektuotojai, norėdami apskaičiuoti medinių sijų ir kolonų stiprį gaisro sąlygomis, orientavosi į medinės konstrukcijos apanglėjimo greitį. Publikuota nemažai studijų ir tyrimo rezultatų, gautų naudojantis tipiniu gaisro bandymo prietaisu – ugniai atsparia bandomąja kaitinimo kamera (toliau – kaitinimo kamera). Tokie bandymai paprastai buvo atliekami modeliuojant gaisro veikimo sąlygas (laiko-temperatūros kreivė), kaip numatyta ASTM E 119 (*American Society for Testing and Materials Standards*) [46] arba ISO 834 (*International Standard Organisation*) [47]. Šių dviejų tipų bandymų kaitinimo kamerų parametrai buvo nurodomi gana panašūs.

Gaisro sąlygomis mediena patiria terminę destrukciją (pirolizę) (1.7 pav.). Medienos pirolizės ir anglies degimo procesai yra išsamiai išstudijuoti. Šia tema pažymėtinos E. L. Schafferio [48], F. L. Browno [49], S. Hadvigo [50], M. Pofit-Szczepanskos [51] ir kitų mokslininkų publikacijos.




**1.7 pav.** Medienos destrukcijos schema

Medienos virsmo į anglį ir degiąsias dujas metu pirolizės produktai iš esmės priklauso nuo medienos tankio. Pirolizės dujos paprastai dega liepsna iškart, kai tik pakyla į apanglėjusios medienos paviršių. Tolesnis degimas ir mechaninis anglies irimas galutinai suardo ar atskelia ir išorinį anglies sluoksnį. Apanglėjimo greitis iš esmės tiesiškai priklauso nuo laiko.

Apanglėjimo greičio tyrimai ypač svarbūs, nustatant medinės konstrukcijos atsparumą ugniai, kadangi apanglėjimo metu yra prarandamos visos medinės konstrukcijos laikančiosios savybės. Čia yra aiški riba tarp apanglėjusios ir sveikos medienos. Medienos anglies sluoksnio susidarymo temperatūra vidutiniškai siekia 300 $^{o}$C.

Naudodamiesi į ISO 834 panašia procedūra, D. I. Lawsonas ir kiti [52] per 30 min išbandė eglines sijas ir nustatė, kad vidutinis apanglėjimo greitis yra lygus 0,635 mm/min. Rezultatai nebuvo tiesiniai, todėl autoriai [52] pateikė tokią lygtį momentiniam apanglėjimo greičiui prognozuoti:

$$\beta_t = \frac{1{,}04}{\tau^{0,2}}, \tag{1.11}$$

čia $\beta_t$ – momentinis apanglėjimo greitis, mm/min; $\tau$ – degimo trukmė, min. Patogumo dėlei autoriai pateikė panašią išraišką ir vidutiniam apanglėjimo greičiui:

$$\beta = \frac{1{,}30}{\tau^{0,2}}, \tag{1.12}$$

čia $\beta$ – bendras apanglėjimo greitis, mm/min; $\tau$ – degimo trukmė, min.

Naudodamas panašią įrangą B. F. W. Rogowskis [53] publikavo laminuotųjų spygliuočių medienos plokščių tyrimo rezultatus, tuomet apanglėjimo greitis buvo lygus 0,65 mm/min, kai liepsna plito lygiagrečiai laminuotųjų plokščių paviršiui.

C. P. Butleris [54] apžvelgė britų tyrinėtojų atliktų atsparumo ugniai bandymų rezultatus ir priėjo prie išvados, kad kai ugnies veikimo laikas svyruoja 5–30 min intervale, vidutinis apanglėjimo greitis yra 0,66 mm/min. Vokietijoje M. Lache [55] išbandė 2 spygliuočių medienos bei 3 lapuočių medienos pavyzdžius ir nustatė, kad 60 min trukmės bandymuose apanglėjimo greitis svyravo 0,55–0,80 mm/min intervale. Šveicarijoje A. Frangi ir M. Fontana [56] išbandė eglines sijas ISO 834 kaitinimo kamera, kai buvimo ugnyje laikas svyravo nuo 30 iki 110 min, ir nustatė 0,7 mm/min vidutinį apanglėjimo greitį, kai likusios dalies medienos storis viršija 50 mm. Tuomet, kai likusiosios dalies storis buvo mažesnis negu 50 mm, apanglėjimo greitis didėjo taip:

$$\beta = 2{,}36 - 0{,}036\, h_e, \tag{1.13}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $h_e$ – likusios dalies storis, mm.

Autoriai [56] nenustatė jokio tankio ρ poveikio medienos apanglėjimo greičiui, kada tiriamosios medienos tankis buvo 340–500 kg/m$^3$ intervale. Taip pat jie nenustatė jokio drėgnio $w$ poveikio medienos apanglėjimo greičiui, kai drėgnio vertės nuo 8 % iki 15 %.

Kita vertus, M. Lache nustatė [55], kad kai medienos $w$ = 20 %, apanglėjimo greitis buvo 8,3 % lėtesnis negu tada, kai $w$ = 8 %.

R. H. Whitas [57] atliktoje apžvalgoje taip pat nenustatė jokio tankio poveikio medienos apanglėjimo greičiui, kai medienos tankis yra nuo 400 iki 700 kg/m$^3$.

Australijoje atlikto bandymo metu D. Syme [58] tyrė nemažai įvairių rūšių medienos, naudodamas ISO 834 identiškas išlaikymo ugnyje sąlygas. Jis nenustatė jokio konkretaus ar ypatingo kietosios (lapuočių) medienos ir minkštosios (spygliuočių) medienos skirtumų, tačiau aptiko sisteminį medienos tankio poveikį ir pateikė tokią sąsają su apanglėjimo gyliu bei išdegimo trukme:

$$H = \frac{413\tau}{\rho} + 1{,}6\,, \tag{1.14}$$

čia $H$ – apanglėjimo gylis, mm; $\tau$ – degimo trukmė, min; $\rho$ – tankis, kg/m$^3$.

Tokia formulė gauta tik didelio tankio bandiniams, kai šis rodiklis svyravo nuo 500 kg/m$^3$ iki 900 kg/m$^3$.

P. C. R. Collieras [59] atliko bandymus su Naujosios Zelandijos miškų mediena ir nustatė apanglėjimo greičius 400–600 kg/m$^3$ bandiniams, esant 12 % drėgniui.

Jeigu naudosimės D. Syme numatytu santykiu, vadinasi, minėtajam tankio intervalui galėsime daryti prielaidą, kad apanglėjimo greitis lygus 0,72–1,10 mm/min.

Japonijoje atliktų tyrimų metu [60], esant maždaug į ISO 834 panašioms buvimo ugnyje sąlygoms, nustatyti tokie apanglėjimo greičiai: 0,67 mm/min. Duglo eglei ($\rho$ = 565 kg/m$^3$) ir tikrajai eglei ($\rho$ = 410 kg/m$^3$); 0,74 mm/min. Japonijos kedrui ($\rho$ = 420 kg/m$^3$).

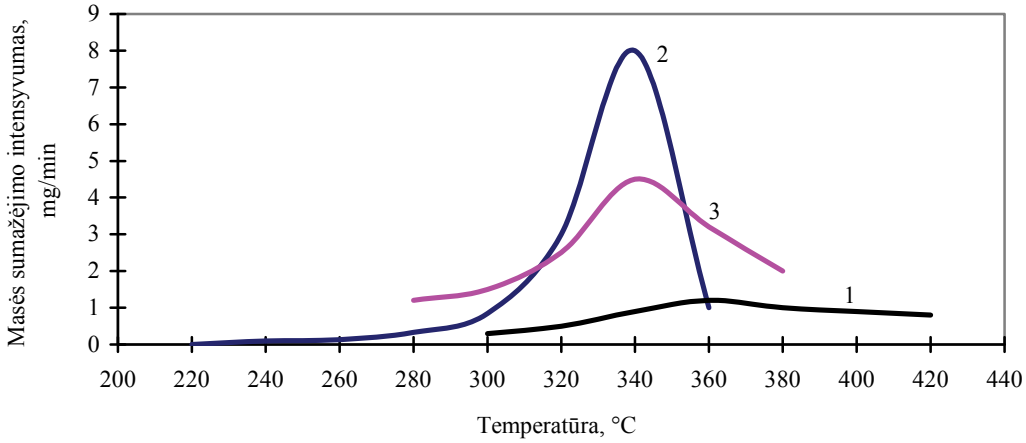
J. M. Njankouo ir kiti [61] ištyrė tropinių miškų kietąją medieną, kurios tankis siekia 1060 kg/m$^3$, ir nustatė neabejotiną apanglėjimo greičio mažėjimą didėjant tankiui. Europoje tokios medienos rūšys statyboje paprastai nenaudojamos.

Iš šaltiniuose [17, 31, 62] pateikiamų duomenų matome, kad medienos apanglėjimas yra glaudžiai susijęs su medienos sudėtinių dalių hemiceliuliozės, celiuliozės ir lignino skirtingomis degimo charakteristikomis (1.8 pav.), turinčiomis įtakos anglies susidarymui. Termografinė medienos sudėtinių dalių skilimo (suirimo į lakiuosius produktus) analizė [17, 31] parodė, kad sudėtinės dalys skyla skirtingose temperatūrose: hemiceliuliozė skyla 200–260 °C, celiuliozė skyla 240–350 °C, o ligninas 280–500 °C temperatūroje. Lignino degimo metu susidaro didžioji anglies dalis. Šį svarbų momentą medienos apanglėjimui bandė tyrimais įvertinti R. H. Whitas ir E. V. Nordheimas [63] pagal apanglėjimo mažėjimo koeficientą $f_c$.

R. H. Whitas ir E. V. Nordheimas [63], naudodamiesi maža vertikaliąja kaitinimo kamera, atliko ASTM E 119 bandymus su įvairiomis 25 mm storio medienos rūšimis. Pritaikę vertinimo kriterijų, kad apanglėjimas prasideda nuo 288 °C, jie nustatė, kad pasiekti 13 mm apanglėjimo gylį eglinių ar pušies bandinių apanglėjimui reikėjo 14,6–15,0 min, kai bandiniai buvo tiriami esant 50 % santykiniam oro drėgniui. Tiriant bandinius esant 30 % santykiniam oro drėgniui, apanglėjimo laikas sumažėjo iki 12,1–14,6 min. Atitinkamai laikas visiškai suanglėti, t. y. 25 mm, buvo lygus 31–34 min, esant 50 % santykiniam oro drėgniui, ir 29–33 min, esant 30 % santykiniam oro drėgniui. Lapuočių medienai apanglėti prireikė 10–20 % daugiau laiko. Tirdami su laiku susijusius duomenis, R. H. Whitas ir E. V. Nordheimas [63] gavo lygtį, kurios struktūra buvo panaši į D. I. Lawsono [52] (1.12) lygtį:

$$\beta = \frac{b}{\tau^{0,19}}, \tag{1.15}$$

čia $b$ – apanglėjimo greičio koeficientas; $\tau$ – degimo trukmė, min.




**1.8 pav.** Pušies medienos ir jos sudėtinių dalių (celiuliozės miltelių ir lignino), įkaitintų vakuumo sąlygomis, esant kaitinimo greičiui 3 °C/min, masės sumažėjimo intensyvumo pokytis nuo temperatūros atliekant termografinę analizę: 1 – ligninas; 2 – celiuliozė; 3 – pušies mediena [31]

Abu mokslininkai taip pat [63] pateikė tokį empirinį modelį, kuriame apanglėjimo greitis apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$\tau = bH^{1,23}, \tag{1.16}$$

čia $\tau$ – apanglėjimo trukmė, min; $b$ – apanglėjimo greičio koeficientas; $H$ – apanglėjimo gylis, mm.

Detalesni tyrimai parodė, kad parametras $b$ nėra konstanta, o priklauso nuo tokių veiksnių, kaip tankis, drėgnis ir apanglėjimo mažėjimo koeficientas. Apanglėjimo greičio koeficientas yra skaičiuojamas pagal formulę:

$$b = 0,000564\,\rho + 1,21w + 0,532f_c - 0,147, \tag{1.17}$$

čia $\rho$ – išdžiovintos medienos tankis, kg/m$^3$; $w$ – drėgnis, %; $f_c$ – apanglėjimo mažėjimo koeficientas.

Apanglėjimo greičio priklausomybė nuo neapsaugotos medienos tankio akcentuojama ir *Eurocode* 5 [26] (1.2 lentelė). Kai kurioms medienos rūšims nustatant apanglėjimo greitį yra taikomas tankio koeficientas $k_p$ kaip daugiklis, įvertinantis charakteristinį medienos tankį ($\rho_k$) ($k_p = \sqrt{\rho_o / \rho_k}$), kai tiriamosios medienos tankis yra mažesnis nei nurodytas 1.2 lentelėje.

**1.2 lentelė.** Medienos, LVL[a], medinių plokščių ir plokščių medienos pagrindu skaičiuotinas apanglėjimo greitis $\beta_0$ ir tariamasis apanglėjimo greitis $\beta_n$ [26]

| Medienos ar jos gaminių tipas | $\beta_0$ mm/min | $\beta_n$ mm/min |
|---|---|---|
| **a) Spygliuočių mediena ir bukas** | | |
| Klijuotoji sluoksninė mediena, kurios charakteristinis tankis yra ≥ 290 kg/m$^3$. | 0,65 | 0,7 |
| Ištisinė mediena, kurios charakteristinis tankis yra ≥ 290 kg/m$^3$. | 0,65 | 0,8 |
| **b) Lapuočių mediena** | | |
| Ištisinė arba klijuotoji sluoksninė lapuočių mediena, kurios charakteristinis tankis yra 290 kg/m$^3$. | 0,65 | 0,7 |
| Ištisinė arba klijuotoji sluoksninė lapuočių mediena, kurios charakteristinis tankis yra ≥ 450 kg/m$^3$. | 0,50 | 0,55 |
| **c) LVL[a]** | | |
| kurios charakteristinis tankis yra ≥ 480 kg/m$^3$. | 0,65 | 0,7 |
| **d) Plokštės** | | |
| Medinės plokštės | 0,9[b] | – |
| Fanera | 1,0[b] | – |
| Plokštės medienos pagrindu, išskyrus fanerą | 0,9[b] | – |

[a] LVL – *Laminated Veneer Lumber* (Laminuotoji pjautinės medienos fanera)
[b] Vertės galioja, kai charakteristinis tankis yra 450 kg/m$^3$, o plokštės storis – 20 mm.

Pavyzdžiui, vientisai spygliuočių medienai, kurios plokštės storis $h_p$ – mažesnis kaip 20 mm, o charakteristinis tankis mažesnis nei 290 kg/m$^3$, apanglėjimo greitis turi būti apskaičiuojamas taip:

$$\beta_{o,p,t} = \beta_o \cdot k_p \cdot k_h , \tag{1.18}$$

čia $\beta_o$ – skaičiuotinas apanglėjimo greitis, mm/min; $k_p$ – tankio koeficientas; $k_h$ – storio koeficientas.

$$k_p = \sqrt{\frac{290}{\rho_k}} , \tag{1.19}$$

čia $k_p$ – tankio koeficientas; $\rho_k$ – charakteristinis medienos tankis, kg/m$^3$.

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} , \tag{1.20}$$

čia $k_h$ – storio koeficientas; $h_p$ – plokštės storis, mm.

Taigi iš anksčiau aprašytų bandymų rezultatų galima daryti išvadą, kad įvairiose publikacijose pateikiamos labai paprastos rekomendacijos, pavyzdžiui, kad per pirmąsias 30 min gaisro mediena apanglėja 0,6 mm/min arba 0,5 mm/min greičiu. Šie skaičiai nėra tikslūs. Jeigu medinis bandinys yra vientisas, o medienos tankis svyruoja nuo 400 iki 550–720 kg/m$^3$, tada eksperimentiniai tyrimų rezultatai neprieštarauja tokiai išvadai – apanglėjimo greitis kaitinimo kameros sąlygomis svyruoja nuo 0,5 iki 0,8 mm/min. Ši taisyklė netaikoma labai nedidelės trukmės gaisrams, kadangi reikia tam tikro laiko, kol bandiniai įkaista ir užsidega, o vėliau apanglėja. Tačiau nurodyti laikotarpiai labai skiriasi, o jiems įtakos darantys veiksniai dar nevisiškai ištirti.

S. Hadvigas [64] parodė, kad tyrimų metu po 4–6 min medienos bandiniai tik įkaito ir vėliau užsidegė kaitinimo kameroje ir kad šių bandymų metu per pirmąsias 6 min pastebėtas visai nedidelis apanglėjimas. Kita vertus, W. R. Pricas [65] paskelbė, kad jo bandymų metu medienos bandiniai įkaito ir užsidegė per 1 min, o visiškai liepsnojo po 2 min. Taigi rezultatai nevienodi.

Iš pateiktos analizės galime daryti išvadą, kad medienos tankio įtakos apanglėjimo greičiui tyrimai, naudojantis ASTM E 119/ISO 834 bandymų įranga, buvo gana nenuoseklūs ir prieštaringi. Nepaisant to, kad daugumoje šalių statybai naudojamos medienos rūšys pasižymi pakankamai siauru tankio diapazonu, klausimas dėl vienodos apanglėjimo greičio skaičiavimo metodikos yra sunkus, problemiškas ir iki galo neišspręstas.

### 1.5. Medienos apanglėjimo greičiai, kai šilumos srautas yra reguliuojamas

Naudojant ASTM E 119 ar ISO 834, surinkti duomenys yra gaunami bandymo metu po truputį didinant šilumos srautą. Kitas svarbus bandymo atlikimo organizavimo būdas numato šilumą skleidžiantį prietaisą, fiksuojantį ant bandinio nustatomą pastovų (nekintantį) išorinį šilumos srautą.

Pirmuosius C. P. Butlerio [54], taip pat L. G. Griffitho [66] bei P. H. Thomo [67] gautus tyrimų rezultatus apibendrino P. H. Thomas [67], išvesdamas tokią priklausomybę tarp medienos apanglėjimo greičio ir šilumos srauto tankio:

$$\beta = 0{,}028\, q_I\,, \tag{1.21}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, kW/m$^2$.

C. P. Butlerio [54] rezultatai, gauti pritaikius infraraudonųjų spindulių lempų bloką, leidžiantį pasiekti itin aukštas šilumos srauto tankio vertes bandinių paviršiams, o kiti tyrinėtojai naudojo dujomis kūrenamą skydelį. Visi duomenys gauti tyrimo sąlygomis be liepsnos.

Pastaraisiais metais taip pat nemažai tyrinėtojų išbandė įvairias medienos rūšis kūginiame kalorimetre. Daugelis iš jų pateikė apibendrintus duomenis, nenurodydami laiko intervalų, per kuriuos buvo skaičiuojamas apanglėjimo greitis ar gylis. Atsižvelgiant tik į publikacijas, kuriose pateikiama

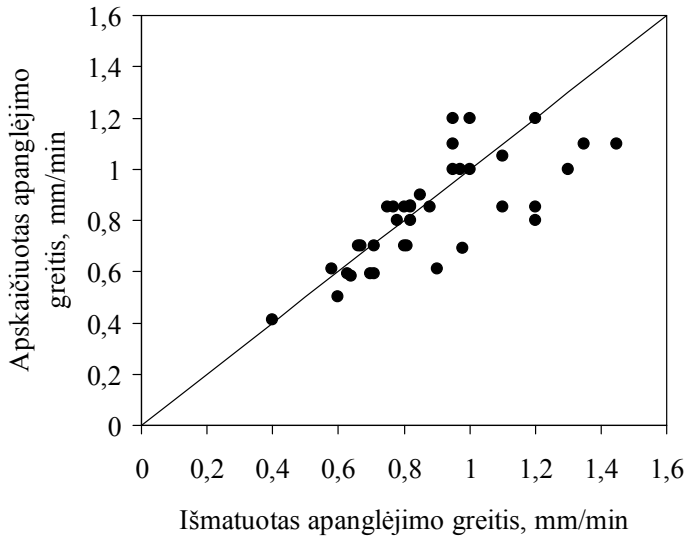
informacija apie tam tikrą laiko trukmę, galima nagrinėti duomenis, gautus iš B. Kristoffersono [68], O. K. Bulieno [69] ir L. D. Tsantaridžio [70] tyrimų.

V. Babrausko [71] pateikta duomenų analizė rodo, kad būtina įvertinti šilumos srauto tankio nuostolius; tuomet išorinio šilumos srauto tankio vertės turi būti pakeltos laipsnio rodikliu, kuris lygus 0,5. Iš atliktos duomenų analizės gauta apanglėjimo greičio skaičiavimo lygtis yra tokia:

$$\beta = 0{,}23\frac{(q_I)^{0,5}}{\tau^{0,3}}, \tag{1.22}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\tau$ – degimo trukmė, min; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, kW/m$^2$; dėl įkaitusių ir užsidegusių bandinių buvo nutarta, kad $q_I = q_e + 25$, čia $q_e$ – spinduliavimas iš kūginio kalorimetro (kW/m$^2$).

1.9 paveiksle parodytas atitikimas tarp apskaičiuotų ir eksperimentu nustatytų rezultatų. Dauguma iš bandomųjų mėginių buvo beveik to paties tankio (iš viso apie 480–500 kg/m$^3$), todėl iš šių bandymo duomenų neįmanoma nustatyti tikslaus tankio veiksnio įtakos.




**1.9 pav.** Apskaičiuotų ir išmatuotų apanglėjimo greičių palyginimas kūginiame kalorimetre, pagal V. Babrauską [71]

T. Harada [72] ištyrė tankio efektą kūginiame kalorimetre ir nurodė, kad apanglėjimo greitis $\beta$ kinta atvirkščiai proporcingai tankiui $\rho$. Tai numato ši priklausomybė:

$$\beta = 113\frac{(q_I)^{0,5}}{\rho\tau^{0,3}}, \tag{1.23}$$

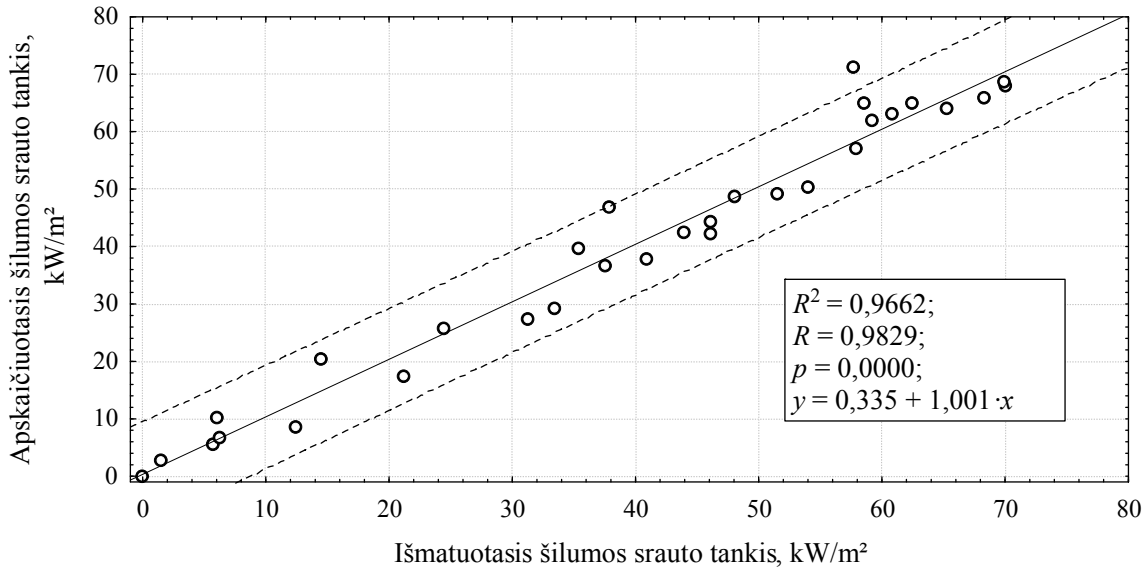
čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, kW/m$^2$; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $\tau$ – degimo trukmė, min.

V. Babrauskas [71] nurodo (1.3 lentelė) vidutinius šilumos srauto tankius per pradinį 60 min laikotarpį. V. Babrauskas pastebi, kad rezultatai pagal ISO yra maždaug 30 % mažesni, palyginti su ASTM E 119 vertėmis, nors abiejų metodų darbo temperatūrų režimai yra gana panašūs. Be to, faktiniai apanglėjimo duomenys pagal ISO 834 kai kuriais atvejais nesiskiria nuo tų, kurie nustatyti pagal ASTM E 119. Todėl V. Babrauskas daro prielaidą, kad pagal ISO 834 šilumos srauto tankio matavimai yra mažiau patikimi.

**1.3 lentelė.** Vidutiniai šilumos srauto tankiai per pirmąsias 60 min keliose kaitinimo kamerose [71]

| Kaitinimo kamera | Metodas | Vidutinis šilumos srauto tankis ($kW/m^2$) |
|---|---|---|
| National Gypsum grindų kaitinimo kamera | ASTM E 119 | 99 |
| NRC (*National Research Council*) grindų kaitinimo kamera | ASTM E 119 | 97 |
| UL (*Underwriters Laboratory*) koloninė kaitinimo kamera | ASTM E 119 | 79 |
| UCB (*University of California Barkeley*) sieninė kaitinimo kamera | ASTM E 119 | 104 |
| **5 sieninių kaitinimo kamerų vidurkis** | ASTM E 119 | 92 |
| SP (*Smart Process*) grindų kaitinimo kamera | ISO 834 | 69 |
| SP (*Smart Process*) sieninė kaitinimo kamera | ISO 834 | 66 |
| FRS (*Furnance Research Services*) sieninė kaitinimo kamera | ISO 834 | 76 |
| FRS (*Furnance Research Services*) koloninė kaitinimo kamera | ISO 834 | 74 |

Tačiau visiškai neseniai K. Lukošiaus [42] atlikti matavimai tam prieštarauja, kadangi jo ISO 834 sąlygas atitinkanti mažų bandinių kaitinimo kamera jau po 20 min leidžia pasiekti 70 $kW/m^2$ srauto tankį, o tolesnė šilumos srauto tankio augimo tendencija aiškiai sutampa su ASTM E 119 vidutiniais duomenimis po 60 min. Be to, jis pateikia apskaičiuoto ir išmatuoto šilumos srauto tankio lyginamąją statistinę analizę (1.10 pav.).




**1.10 pav.** Apskaičiuoto ir išmatuoto šilumos srauto tankio lyginamoji statistinė analizė: —— – tiesinės regresinės analizės kreivė; ---- – vidutinės prognozuojamos vertės 95 % pasikliautinosios ribos, pagal K. Lukošių [42]

Gauta tiesinės regresijos lygtis rodo, kad išmatuotos šilumos srauto tankio reikšmės yra 0,335 kW/m² didesnės nei apskaičiuotosios, nes idealios atitikties atveju tiesinė lygtis turėtų pavidalą $y = x$. Visos apskaičiuoto ir išmatuoto šilumos srauto tankio palyginamosios reikšmės patenka į prognozuojamųjų reikšmių (tiesine lygtimi) 95 % pasikliautinąsias ribas.

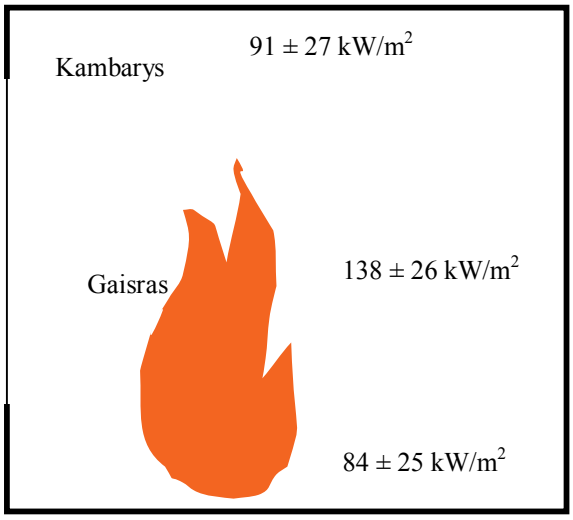
Vadinasi, 1.3 lentelėje nurodyti šilumos srauto tankių skirtumai, kai bandymo metodai skirtingi, negali būti griežtai vertinami. Be to, autorius [71] nepateikia kūginio kalorimetro vidutinio šilumos srauto tankio, todėl sudėtinga lyginti tradicinių metodų duomenis su plačiai populiarinamo naujojo bandymų metodo (kūginio kalorimetro) duomenimis. Be abejo, svarbu paminėti, kad visi kūginio kalorimetro rezultatai susiję su bandymais, esant 21 % deguonies atmosferoje, ir dėl to toks metodas neabejotinai realesnis, kai deguonies koncentracija ugniai atspariose kaitinimo kamerose (tiek ASTM E 119, tiek ISO 834) bus daug mažesnė.

Minėtieji kaitinimo kamerų skirtumai gali lemti skirtingus medienos apanglėjimo greičio rezultatus, todėl jų tarpusavio lyginimas yra problemiškas. Neabejotina, kad tokią problemą reikia spręsti pritaikius atitinkamą pataisos koeficientą, leidžiantį įvertinti oro deguonies įtaką, ypač ISO 834 bandymo metodu gautiems rezultatams.

Svarbu paminėti, kad šilumos srauto tankio kryptis bandinio atžvilgiu taip pat labai reikšminga, kadangi rezultatas priklausys nuo šilumos srauto poveikio skirtumų bandomuosiuose įrenginiuose horizontaliajai ir vertikaliajai bandinio krypčiai. Tačiau mokslinių tyrimų ir lyginamųjų duomenų šiuo klausimu tiek ASTM E 119, tiek ISO 834 bandymų sąlygomis nėra daug. Šiuo aspektu tik M. Lache [55] pastebėjo, kad apanglėjimo greičiai skirtingomis medienos augimo atžvilgiu kryptimis iš esmės buvo identiški.

## 1.6. Šilumos srautai ir apanglėjimo greitis, esant išplitusiam patalpoje gaisrui, ir pirolizės šilumos poveikis degimo procesui

Siekiant galutinai įvertinti medinių konstrukcijų apanglėjimo greitį, svarbu ne tik palyginti duomenis, gautus su vienos ar kitos rūšies bandymo prietaisais, bet ir nustatyti, kas nutinka gaisrų patalpose atveju. Todėl būtina aptarti, ar šiluminiai srautai, kurie naudojami kaitinimo kamerose, yra tipiški realiuose patalpų gaisruose susidarantiems šilumos srautams. Išsamiausią studiją apie šilumos srautus kambario gaisruose yra parašęs J. B. Fangas [73]. Jo bandymų trukmė buvo 60 min, o aukščiausios temperatūros paprastai buvo pasiekiamos praėjus 10–25 min po uždegimo. Autoriaus duomenys (1.11 pav.) rodo esant vidutinį šilumos srauto tankį, kuris lygus 91 $\pm$ 27 kW/m$^2$ prie lubų, 138 $\pm$ 26 kW/m$^2$ prie sienų ir 84 $\pm$ 25 kW/m$^2$ prie grindų. Vidutiniai šiluminiai srautų tankiai, esant išplitusiam patalpoje gaisrui, susidaro 84, 138 ir 91 kW/m$^2$ prie grindų, sienų ir lubų. Jeigu manoma, kad vidutinis kaitinimo kameros šilumos srauto tankis yra 92 kW/m$^2$, tada nebus jokio šilumos srauto tankio nukrypimo prie lubų ir išplitusio gaisro patalpose atveju.




**1.11 pav.** Vidutinės šiluminio srauto tankio vertės gaisro patalpoje atveju prie grindų, sienų ir lubų [73]. Pastaba: vidutinis šilumos srauto tankis per pirmąsias 60 min keliose kaitinimo kamerose (ISO 834, ASTM E 119 ir kūginiame kalorimetre) ~ 92 ± 25 kW/m$^2$

Jeigu medinės konstrukcijos gaisro patalpoje atveju yra storos ir be jokių sujungimų, plyšių ar tarpų ir šalia jų nėra jokių tarpų bei tiesioginio oro srovių, tada galima tikėtis, kad apanglėjimo greičiai bus panašūs į tuos, kurie nustatomi bandant sijas ir kolonas kaitinimo kamerose. T. Hakkarainenas [74] išmatavo storos medienos elementų apanglėjimą patalpoje, įsiplieskus dideliam gaisrui. Ant lubų 30 mm gylio apanglėjimas susidarė po 40 min, o ant sienų – per 50 min. Pirmąsias 3 min nevyko joks degimo procesas, vėliau pirmoje bandymo dalyje apanglėjimas vyko greičiau, vėlesnėje bandymo stadijoje greitis sulėtėjo. Rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad vidutiniai apanglėjimo greičiai yra 0,75 ir 0,6 mm/min atitinkamai, jie patenka į tą patį intervalą kaip ir didžioji dalis duomenų apie sijų ir kolonų apanglėjimo greičius naudojant kaitinimo kameras (0,5–0,8 mm/min). Medinių konstrukcijų apanglėjimo greičio priklausomybę nuo šilumos srauto tankio poveikio savo darbe nagrinėja G. W. Silcockas [75], kuris matematiškai pateikia ir įrodo mažų bandymų kūginiu kalorimetru naudą ir tikslumą natūrinių bandymų atžvilgiu. Tačiau ne ką mažesnius natūrinio bandymo privalumus statybinės medienos apanglėjimo požiūriu pateikia L. R. Richardsonas savo darbe [76], kur detalizuojamos *Eurocode* 5 pateiktos apanglėjimo koeficiento reikšmės, pritaikant Kanados medinių konstrukcijų projektavimo normas.

Remiantis aptartais duomenimis, svarbu atkreipti dėmesį į prognozuojamą gaisro trukmę gaisravietėje pagal medinių konstrukcijų apanglėjimo gylį, ypač tada, kai tarpusavyje lyginamos skirtingose vietose išmatuotos anglies gylio vertės. Akivaizdu, jog esant tam pačiam apanglėjimo gyliui, pavyzdžiui, sienoje ir grindyse, apanglėjimo trukmė grindyse bus ilgesnė dėl mažesnio šilumos srauto poveikio. Dėl šios priežasties tikslinga skaičiuoti apanglėjimo greitį pagal tokią priklausomybę, kur išorinio šilumos srauto poveikis būtų įvertinamas.

Išorinio šilumos srauto tankio dydis lemia medinės konstrukcijos užsidegimo bei tolesnio apanglėjimo greitį. Tačiau nemažą tam įtaką turi ir pačios medienos polinkis degti, kurį apibūdina šilumos kiekio, reikalingo medienos lakiesiems produktams išgarinti, charakteristika $L$ (kJ/g) – dar vadinama pirolizės (pirolizacijos) šiluma.

Keletas pirolizės šilumos duomenų pateikta 1.4 lentelėje šaltinyje [31]. Tačiau, deja, didžioji dauguma medienos rūšių nėra europinės, o pateiktos medienos tankio vertės neparodo aiškios pirolizės šilumos priklausomybės, išskyrus tai, kad padidėjus masės nuostoliams visoms be išimties medienos rūšims minėtoji šiluma padidėja.

**1.4 lentelė** $L$ vertės įvairioms medienos rūšims [31]

| Medienos rūšis | Tankis, kg/m$^3$ | Laidumas dujoms, cm/s | $L$ vertė, kJ/g, kai masės nuostoliai, % | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 10 | 30 |
| Raudonojo kedro | 360 | 2 | 5,61 | 7,11 |
| Eglės | 450 | 2 | 5,14 | 6,69 |
| Podo | 460 | 100 | 2,80 | 3,43 |
| Maumedžio | 510 | 2 | 5,23 | 5,44 |
| Aburos | 590 | 2000 | 1,80 | 2,59 |
| Makore | 640 | $10^{-3}$ | 4,73 | 6,28 |
| Uosio | 650 | 10 | 2,22 | 2,51 |

Minėtas pirolizės šilumos kiekis $L$ susideda iš šilumos kiekio, reikalingo visiškai sausos medienos pirolizės produktams ir vandeniui išgarinti. Šiluma, reikalinga pirolizės produktams sudaryti, sietina su medienos drėgniu $w$ [77], kai:

$$L = L_v + L_w \cdot w, \tag{1.24}$$

čia $L$ – šilumos kiekis, reikalingas medienos lakiesiems produktams išgarinti, kJ/g; $L_v$ – šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti, kJ/g, jos vertė skiriasi priklausomai nuo medienos, jos apdorojimo antipirenais ir anglies sluoksnio gylio; $L_w$ – vandens išgarinimo šiluma, lygi 2,258 kJ/g [31, 78]; $w$ – medienos drėgnis (šimtosiomis dalimis 0,01–0,99).

Dydžio $L_v$ – šilumos kiekio, reikalingo visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti, vertės literatūroje pateikiamos skirtingai. Pavyzdžiui, E. Mokkola [78] pateikia 2,25 kJ/g, tuo tarpu F. De Souza Costa ir D. Sandbergas [79] pateikia 0,3 kJ/g vertę. M. L. Jenssensas [62], kuris savo laboratorinių tyrimų kūginiu kalorimetru duomenis išanalizavo taikydamas integralinį šilumos sklidimo modelį parodė, kad visiškai sausos medienos pirolizės šiluma nėra konstanta, bet kinta priklausomai nuo storėjančio anglies sluoksnio. Kaip pavyzdį jis pateikia vienos iš tiriamosios medienos rūšių (uosio) duomenis, kai pirminė pirolizės šiluma buvo lygi 3 kJ/g, vėliau lėtai nukrito iki 1 kJ/g. Tai prieštarauja duomenims [31], kuriais nurodoma, kad pirolizės šiluma didėja didėjant masės

nuostoliams. Autorius pateikia tiriamųjų medienos rūšių nustatytas pirolizės šilumos vertes, iš kurių galima išskirti, kad spygliuočiams $L_v$ vidutiniškai lygi 3,2 kJ/g, o lapuočiams – 2,6 kJ/g, su viena išimtimi – $L_v$ Duglo eglei su dideliu dervų (sakų) kiekiu, kai $L_v$ lygi 2,64 kJ/g.

Visiškai tikslių duomenų apie pirolizės šilumos vertes medienai nėra, literatūroje šio parametro vertės svyruoja nuo 1 kJ/g iki 7 kJ/g [31]. Tai, be abejonės, priklauso nuo skirtingos medienos rūšių cheminės sudėties, kuri gana variantiška. Žinoma, kad medienos ar celiuliozės suirimo greitis labai jautrus mineraliniams junginiams, tokiems kaip antipirenai. Taigi pirolizacijos šilumos vertės skirtingo tankio medienai ar medienai su antipirenais nėra įvardytos (ypač kalbant apie europinės rūšies medieną). Ši problema nėra visiškai išspręsta ir reikalauja detalesnės analizės.

### 1.7. Medienos apanglėjimo greičiai, kai mediena apsaugota antipirenais

Medienos apanglėjimo teorija nėra nauja, ji aprašyta ir nagrinėta daugelyje čia minėtųjų mokslinių straipsnių ir, kaip pastebėta, prie bendros nuomonės neprieinama dėl daugelių veiksnių. Nepaisant to, pernelyg mažas dėmesys yra skiriamas medinių konstrukcijų, apsaugotų antipirenais, apanglėjimo procesams. Antipirenų panaudojimo paskirtis – mažinti liepsnos plitimą medienos paviršiumi ir giliau, kartu lėtinti medienos apanglėjimo greitį. Minėjome, kad medienos ar celiuliozės suirimo greitis labai priklauso nuo mineralinių junginių, tokių kaip antipirenai.

1.5 lentelėje parodyta, kaip galima daugiau nei 2 kartus padidinti anglinės liekanos susidarymą, apdorojant pušies medieną fosfatais ir boratais. Kartu kis ir lakiųjų produktų sudėtis: sumažės dervos degioji sudėtinė dalis, dėl to taip pat sumažės ir lakiųjų produktų sudegimo šiluma.

**1.5 lentelė.** Pušies pirolizės duomenys [17]

| Medienos apdorojimas siekiant padidinti atsparumą ugniai | Skiedinio koncentracija, % | Apdorojimo laipsnis, % | Anglis, % | Derva, % | Vanduo, % | Dujos[1], % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Neapdorota mediena | - | - | 19,8 | 54,9 | 20,9 | 4,4 |
| +$Na_2B_4O_7$ | 5 | 4,28 | 48,4 | 11,8 | 30,4 | 9,4 |
| +$(NH_2)_2HPO$ | 5 | 6,69 | 45,5 | 16,8 | 32,0 | 5,7 |
| +amonio polifosfatas | 5 | 5,0 | 43,8 | 19,0 | 34,6 | 2,6 |
| +$H_3BO_3$ | 5 | 3,9 | 46,2 | 10,7 | 33,9 | 9,2 |
| + amonio sulfatas [2] | 5 | 6,3 | 49,8 | 2,6 | 33,4 | 14,2 |
| +$H_3PO_4$ | 5 | 6,8 | 54,1 | 2,5 | 37,3 | 6,1 |

[1] Nekondensuojamos dujos CO, $CO_2$, $H_2$, $CH_4$.
[2] $NH_4 \cdot NH_2 \cdot SO_3$.

Visa tai sumažina ant medienos paviršiaus nuo liepsnos patenkantį šilumos kiekį. Todėl reikalingas didesnis šilumos, kiekis būtinas degimui palaikyti, pirolizės produktams išgarinti. Anglies sluoksnis

apsaugo po šiuo sluoksniu esančią medieną. Šiluminiam srautui, kuris būtinas, kad išsiskirtų lakieji produktai, bus reikalinga didesnė paviršiaus temperatūra ir didesni šilumos nuostoliai.

Šiuo požiūriu apanglėjimo proceso greitis nėra pakankamai ištirtas. Tai, be abejonės, lemia didelis įvairių antipirenų kiekis ir skirtinga reakcija į aukštos temperatūros poveikį. Darbe [80] ištirta vienos antipireno rūšies, gebančios padidinti medienos atsparumą apanglėjimui, įtaka. Nustatyta, kad medienos antipireno įtaka apanglėjimo greičiui yra tokia, kad jis šiek tiek pailgina laiką, kol mediena užsidegs, taip mažinamas liepsnos plitimas ir didinamas medienos atsparumas apanglėjimui. Keliamas uždavinys nustatyti, kokią įtaką galutiniam gaisro trukmės nustatymo rezultatui turi tiriamosios medienos impregnavimas antipirenais.

Antipirenų poveikis medinių statybinių konstrukcijų atsparumui ugniai, ypač kai buvo panaudotas vakuuminis impregnavimo būdas, išnagrinėtas Z. Bednarek darbe [81]. Čia akcentuojama, kad giluminiu būdu impregnuotų medinių konstrukcijų apanglėjimo greitis sulėtėja. Tačiau, žiūrint globaliu mastu, tokių medinių konstrukcijų stiprumas sumažėja dėl per didelio druskų kiekio medienos skerspjūvyje, o tai palengvina jos stiprumo praradimą, padidėjus apkrovoms, ne tik normaliomis sąlygomis, bet ir aukštesnėse temperatūrose.

Medinių konstrukcijų atsparumo ugniai skaičiavimo ypatumus priklausomai nuo medienos rūšies su apsaugos priemonėmis pateikė K. Delevas [82], tačiau juose vis dėlto yra tam tikrų trūkumų. Pateiktuose matematiniuose skaičiavimuose neįvertinamas laiko poveikis. Tai yra pagrindinis parametras, leidžiantis nors kokią prognozavimo galimybę, kad būtų galima nustatyti tikslų aukštos temperatūros poveikį medinėms konstrukcijoms.

Taigi problema aktuali, bet nepakankamai ištirta, norint tiksliau prognozuoti pagrindines gaisro charakteristikas, padedančias nustatyti tikslią gaisro kilimo vietą bei priežastį.

## 1.8. Literatūros analizės bendrosios išvados

Atlikus įvairių literatūros šaltinių analizę, apibendrinant galima pateikti tokias išvadas:

– Atliekant gaisravietės apžiūrą, būtina naudoti ne tik vizualiuosius, bet ir instrumentinius bei kompiuterinio modeliavimo metodus, nustatančius pagrindinius gaisro parametrus.

– Gaisro scenarijaus atkūrimas kompiuterinėmis programomis yra viena iš perspektyviausių gaisrinės saugos mokslo tyrimo ir plėtojimo krypčių. Jų pritaikymą praktikoje riboja didelė tyrimų įrangos bei pačių tyrimų kaina ir maža įrodomoji galia teismo procesuose.

– Gaisro trukmei bei gaisro kilimo vietai nustatyti naudojamo metodo problema yra ta, kad skaičiavimo lygtyse negalime įvertinti nei medienos tankio, nei jos drėgnio, nei apsaugos priemonių įtakos medienos degimo trukmei. Be to, akivaizdu, kad medienos su antipirenais „indukcinis laikas“ turi būti ilgesnis, kai mediena dega atitinkamose temperatūrose.

– Skirtingų šalių mokslininkai, atsižvelgdami į savo klimato zonose statybai naudojamas medienos rūšis, tiria jų degumo savybes įvairiomis kaitinimo kameromis. Naudodamiesi sudėtingais kompiuterinių programų paketais, siekia įvertinti daugelį medinių konstrukcijų degimą veikiančių veiksnių. Vis dėlto išlieka daug neaiškių klausimų, susijusių tiek su medienos tankio, tiek su jos drėgnio ar apsaugos priemonių (antipirenų) įtaka medinės konstrukcijos apanglėjimui.

– Paaiškėjo, jog, nustatant gaisro trukmę pagal pastato viduje sudegusių medinių konstrukcijų apanglėjimą, būtina atsižvelgti į išorinio šiluminio srauto tankio dydį, kuris skirtingoms pastato dalims (luboms, sienoms, grindims) yra skirtingas.

– Šilumos srauto kryptis bandinio (konstrukcijos) atžvilgiu taip pat svarbi, kadangi mediena yra anizotropiška medžiaga. Tai reikia papildomai įvertinti, kadangi mokslinių tyrimų ir lyginamųjų duomenų šiuo klausimu tiek ASTM E 119, tiek ISO 834 bandymų sąlygomis nėra daug. Be to, kaitinimo kamerų skirtumai gali lemti skirtingus medienos apanglėjimo greičio rezultatus, todėl kyla jų tarpusavio palyginimo problema. Tokią problemą reikia spręsti pritaikius pataisos koeficientą, leidžiantį įvertinti laisvojo oro pritekėjimo į degimo zoną įtaką gautiems rezultatams.

– Šilumos kiekio, reikalingo medienos lakiesiems produktams išgarinti, vertės, kaip pateikiama literatūroje, svyruoja nuo 1 kJ/g iki 7 kJ/g. Kadangi pirolizacijos šilumos vertės skirtingo tankio medienai ar medienai su antipirenais nėra įvardytos (ypač aktualu europinės rūšies medienai), šiai problemai spręsti būtini detalesni tyrimai.

Siekiant didesnio tikslumo bei objektyvumo, taikant supaprastintus inžinerinius metodus gaisrams tirti (šiuo atveju taikant instrumentinį metodą, skirtą gaisro kilimo vietai nustatyti, esant apdegusioms medinėms statinio konstrukcijoms), yra svarbu atlikti skirtingos rūšies medienos eksperimentinius bandymus įvairiomis gaisro sąlygomis bei įvertinti tiek teoriškai, tiek eksperimentiškai gautus tyrimo rezultatus, galiausiai ir medienos apanglėjimo greitį bei gaisro trukmę.

Literatūros apžvalgoje pateikti duomenys aptarti autoriaus publikacijose disertacijos tema [1A–9A].

## 2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS, METODIKOS BEI ĮRANGA

Atsižvelgiant į literatūros analizės išvadas, reikia atlikti skirtingos medienos rūšies degumo tyrimus. Eksperimentų tikslas – nustatyti apanglėjimo greičio vertes, apsaugos priemonių įtaką apanglėjimui, taip pat nustatyti tokius degumo parametrus, kurių vertės europinės rūšies medienai nėra pateiktos, rasti kitus parametrus, kurie leistų rasti tiriamųjų bandinių skirtumus arba panašumus.

### 2.1. Tyrimams naudotų medžiagų svarbiausios charakteristikos

Eksperimentiniams tyrimams panaudoti kelių rūšių medienos, spygliuočių (pušies ir eglės) bei lapuočių (ąžuolo ir uosio), apsaugotų ir neapsaugotų antipirenais, konstrukcijų fragmentai. Kaip apsaugos priemonės naudoti antipirenai „FLAMASEP“ arba „BAK1“. Nustatyto dydžio 300×300×50 mm bandiniai (2.1 pav.) buvo 10 val. mirkomi antipireno tirpale, natūraliai džiovinami iki bandymams reikalingos bandinių drėgmės, kuri neviršijo 15 % pagal masę (apskaičiuojama pagal (2.1) priklausomybę arba panaudojant drėgnomatį 2.2 paveiksle). Tiriamosios neimpregnuotos medienos rūšies tankis: pušies – 455 kg/m$^3$; ąžuolo – 720 kg/m$^3$; eglės – 435 kg/m$^3$; uosio – 680 kg/m$^3$.



**2.1 pav.** Eksperimentiniams tyrimams naudotos natūraliosios medienos (pušies) bandinys

Medienos drėgnis $w$ nustatomas pagal šią priklausomybę:

$$w = \frac{m_o - m}{m}, \tag{2.1}$$

čia $m_o$ – drėgno bandinio masė, kg; $m$ – bandinio masė be vandens (išdžiovinto ne mažesnėje kaip 100 °C temperatūroje), kg.

Medienos drėgnis gali būti nustatomas drėgnomačiu, rodančiu vertes, % (2.2 pav.).



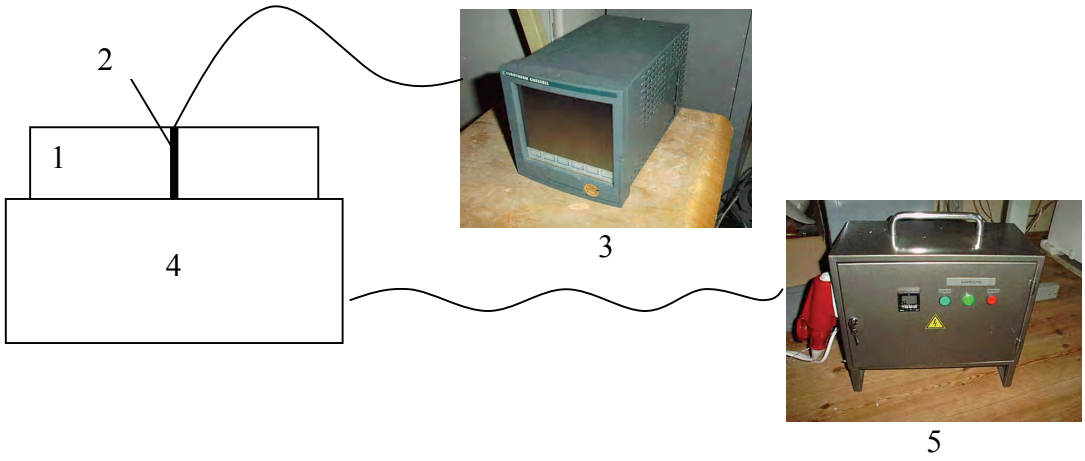

**2.2 pav.** Drėgnomatis

## 2.2. Bandymo metodas specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera

Siekiant nustatyti skirtingos rūšies apsaugotos ir neapsaugotos antipirenais medienos apanglėjimo greičio skirtumus ir jų įtaką gaisro trukmės apskaičiavimo rezultatui, buvo panaudota speciali vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera pagal šaltinį [42]. Tokia įranga užtikrino tiriamojo bandinio modeliuojamą kaitinimą iš vienos pusės iki 950 °C. Įrenginį sudarė vienpusio konstrukcijų kaitinimo prietaisas, termoreguliatorius, matavimo priemonės ir jų rodmenis fiksuojanti aparatūra (2.3 pav.).

Visų vienpusiu konstrukcijų kaitinimo metodu tirtų konstrukcijų fragmentų (2.3 pav., 1) plotis ir aukštis buvo 300×300 mm, o storis kito nuo 35 iki 70 mm.

Temperatūra buvo matuojama K tipo (Ni Cr – Ni Al) 0,8 mm skersmens termoporomis, kurių matavimo paklaida temperatūrų intervale nuo 40 °C iki 1300 °C buvo 0,7 %. Bandinio paviršiaus temperatūra buvo matuojama to paties tipo termopora, kurios jungtis pritvirtinta prie varinio diskelio plokščiojo paviršiaus vidurio. Pastarojo storis – 0,2 mm, o skersmuo – 12 mm. Termoporos diskelis prie tiriamojo konstrukcijos fragmento paviršiaus tvirtinamas 30×30×2 mm asbestine plokštele (tankis 1000 kg/m³), kuri prie bandinio buvo tvirtinama smeigtukais, juosta ar klijuojama. Tokios konstrukcijos bandinio paviršiaus temperatūros matavimo termoporas numato ISO 834 standartas [47].

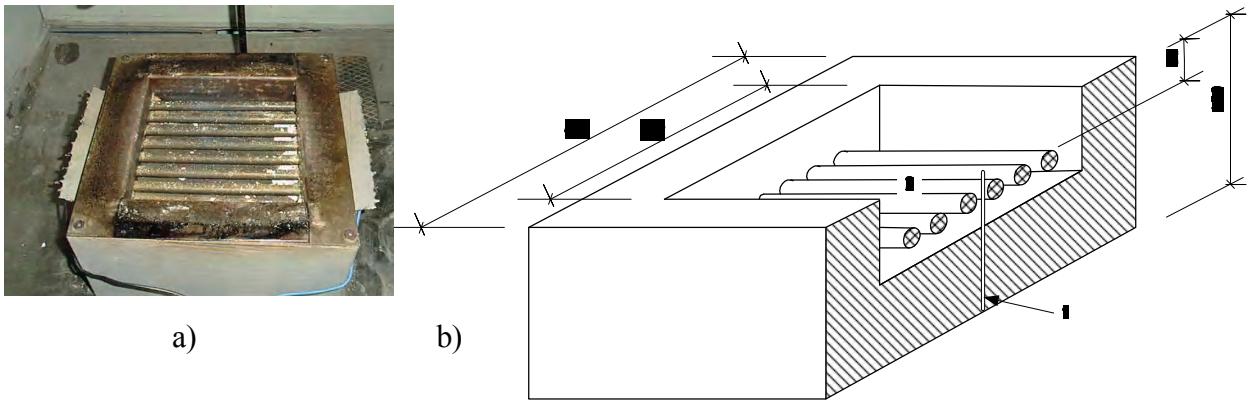



**2.3 pav.** Vienpusio konstrukcinių elementų kaitinimo tyrimams panaudotos įrangos principinė schema: 1 – tiriamosios konstrukcijos fragmentas; 2 – temperatūros ir šilumos srauto matavimo įranga; 3 – matavimo priemonių rodmenis fiksuojantis savirašis *Eurotherm* 401; 4 – vienpusio konstrukcinių elementų kaitinimo prietaisas; 5 – kaitinimo kameros temperatūrą reguliuojantis termoreguliatorius TR-5

Šilumos srautui išmatuoti buvo naudojamas 1000-1B tipo šilumos srauto matavimo jutiklis, kurio matavimo ribos yra nuo 0,1 kW/m² iki 80 kW/m², o gautų duomenų paklaida siekė 5 %. Šio tipo šilumos srauto jutiklio jautrumas, nurodytas metrologiniuose dokumentuose, yra 1,71 mV×m²/kW.

Visų termoporų bei šilumos srauto matavimo jutiklio rodmenys fiksuojami *Eurotherm* 401 tipo savirašiu (2.3 pav., 3). Savirašis *Eurotherm* 401 fiksuoja temperatūros rodmenis kas 1 s.

Specialiai suprojektuotas ir pagamintas vienpusio konstrukcijų kaitinimo prietaisas (2.3 pav.) sudarytas iš plieninio karkaso, ant kurio iš 2 mm storio nerūdijančio plieno lakštų suformuota 200×200×50 mm dydžio kaitinimo kamera. Iš vienos pusės kaitinimo kamera izoliuota aukštoms temperatūroms atsparia šiltinamąja izoliacija. Kaitinimo kamerai šildyti buvo naudojami 8 vnt. 32A13/0,7T220 tipo vamzdiniai elektriniai kaitinimo elementai (2.4 pav., 2), kurių kiekvieno galingumas buvo 0,7 kW, skersmuo – 13 mm, o ilgis – 200 mm. Visi kaitinimo elementai buvo lygiagrečiai sujungti.




**2.4 pav.** Vienpusio konstrukcijų kaitinimo prietaiso vaizdas (a) ir schema (b): 1 – kameros temperatūrą matuojanti termopora; 2 – 32A13/0,7T220 tipo vamzdiniai elektriniai kaitinimo elementai

Elektrinis vamzdinių kaitinimo elementų maitinimas tiekiamas per TR-5 tipo termoreguliatorių (2.4 pav.), kuriuo buvo reguliuojama temperatūra kaitinimo kameroje. Tokio tipo valdymo pultas buvo specialiai pagamintas AB „Uterna“, jis leidžia programuoti 10 laiko atkarpų temperatūros prieaugio spartą iki numatytos temperatūros vertės. Termoreguliatoriaus ribinis elektros srovės stipris buvo 5 A. Geometriniame kameros centre įmontuota termopora leidžia termoreguliatoriui reguliuoti temperatūrą kaitinimo kameroje (2.4 pav.). Šiam temperatūros matavimui taip pat buvo naudojama metrologiškai patikrinta K tipo [83] 1,0 mm skersmens termopora.

Anot autorius [42], kuriant vienpusį konstrukcijų kaitinimo metodą, siekta modeliuoti realius procesus, vykstančius medžiagoje gaisro metu aukštų temperatūrų poveikio sąlygomis tam, kad būtų galima tiksliau prognozuoti šilumos perdavimą laidumu. Tačiau tokio tipo prietaisas visiškai sėkmingai naudojamas ir kitiems moksliniams tyrimams, būtent įvairios rūšies medienos apanglėjimo procesams tirti, kartu siekiant didesnio gaisro trukmės nustatymo tikslumo. Taip pat siekta imituoti realias gaisro poveikio mediniams konstrukcijų fragmentams sąlygas ir atsparumą ugniai, kai fragmentai kaitinami iš vienos pusės pagal standartinę temperatūros-laiko kreivę. Kartu buvo numatyta tirti ir įvairaus realaus storio konstrukcijų fragmentus, sudarant artimas realiam gaisrui poveikio sąlygas.

Eksperimento principas – kaitinti bandinį iš vienos pusės numatyta ir standarte [47] reglamentuota temperatūros-laiko priklausomybe.

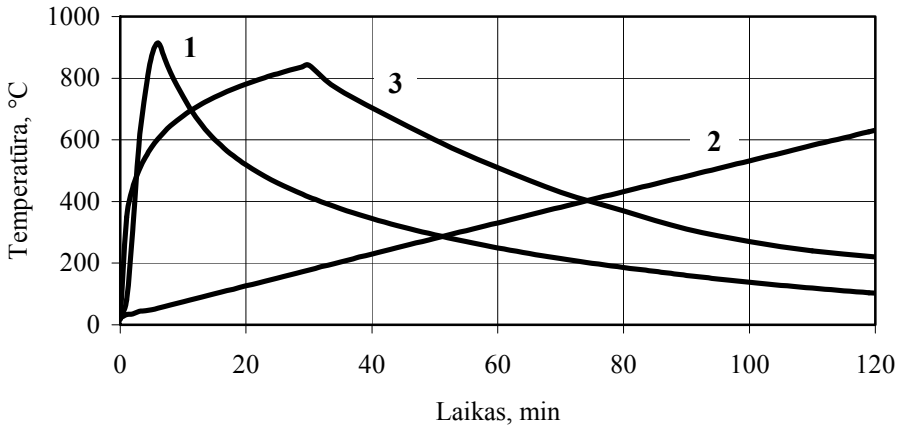
Bandymui atlikti anksčiau aprašyta įranga užtikrino pasirinktą šiluminę apkrovą. Be abejo, temperatūros pasiskirstymui konstrukcijos skerspjūvyje turi įtakos ir konstrukcijos paviršiui tenkanti šiluminė apkrova bei apkrovos vertės kaita priklausomai nuo kaitinimo trukmės. Minėtąja įranga įmanoma pasiekti 3 poveikių scenarijus (2.5 pav.). Pagrindinė pasirinkta šiluminė apkrova buvo reglamentuojama standartinio gaisro temperatūros-laiko priklausomybe (2.5 pav., 3), kuri imituoja išsiplėtusio gaisro stadiją (*post-flashover*). Naudojantis minėtąja priklausomybe, konstrukcijų atsparumo ugniai bandymai atliekami įvairiose pasaulio šalyse (pasirinktos temperatūros-laiko priklausomybės atveju temperatūra pradžioje kyla apie 100 °C/min).

Bandymams naudotos standartinės temperatūros-laiko kreivės (2.5 pav., 3) matematinė išraiška yra tokia:

$$T_f - T_0 = 345 \lg(8\tau + 1), \qquad (2.2)$$

čia $T_f$ ir $T_0$ – kaitinimo kameros ir pradinė bandymo temperatūros, °C; $\tau$ – bandymo trukmė, min.

Skirtinga temperatūros kaitos sparta kaitinimo kameroje svarbi keliais aspektais. Greitai pasiekta aukšta temperatūra imituoja pačias nepalankiausias medžiagai aplinkos sąlygas, kai joje prasideda nepertraukiamas šilumos sklidimo procesas, darantis įtaką fizikiniams-cheminiams procesų virsmams tiriamojoje medžiagoje.



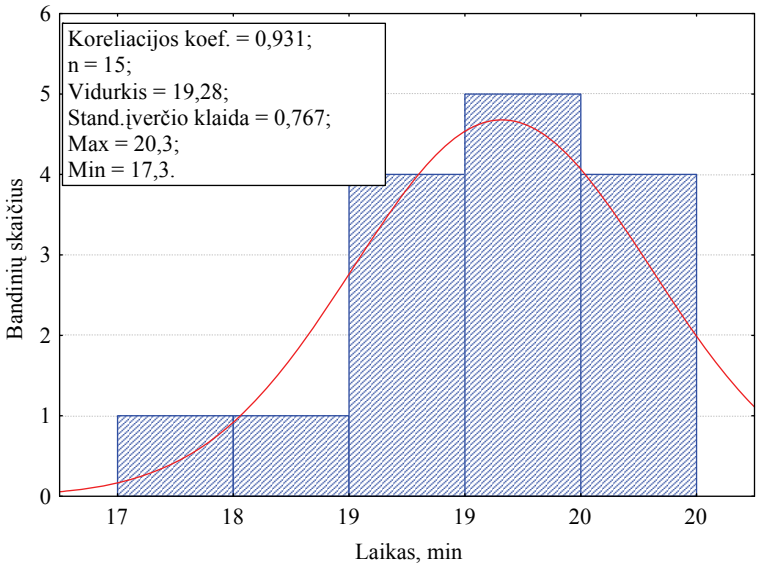

**2.5 pav.** Skirtingi kaitinimo kameros temperatūros-laiko režimai: 1 – nuo 0 iki 6 min temperatūros kilimo sparta 150 °C/min, nuo 6 iki 120 min natūralus kameros aušimas; 2 – nuo 0 iki 120 min temperatūros kilimo sparta 5 °C/min; 3 – nuo 0 iki 30 min temperatūra kyla pagal ISO 834 standarto reikalavimus, nuo 30 iki 120 min – natūralus kameros aušimas

Vienpusis konstrukcijų kaitinimo principas statybinių medžiagų degimo rodikliams nustatyti buvo naudojamas ir rusų mokslininkų darbe [84]. Pažymėtina, kad tokiu pačiu principu pagrįstas statybinių medžiagų tyrimo metodas aptiktas būtent tik šiuose dviejuose darbuose [42 ir 84]. Tarp rusų mokslininkų darbe [84] bei mūsų ir K. Lukošiaus [42] naudojamos įrangos yra keletas esminių

skirtumų. Rusų mokslininkų darbe [84] naudoti tik kontaktiniai ir plokštieji kaitinimo elementai, taip pat tiriamoji medžiaga lokalizuota, sandariai izoliuojamos bandinio šoninės kraštinės. Mūsų atveju bandyti fragmentus galima vertikaliai ir horizontaliai. Be to, papildomų apkrovų, turinčių įtakos medžiagos deformacijoms ir įtempių būviui medžiagoje, mūsų tyrimo įrangoje išvengiama, o konstrukcijos šoninės kraštinės nėra specialiai papildomai izoliuojamos. Darbe [84] numatytas tik tiesiškas temperatūros, priklausomai nuo laiko, tiriamojo objekto kaitinimo režimas bei jos rankinis valdymas. Mūsų naudojama įranga leidžia modeliuoti įvairias gaisro poveikio sąlygas ir kameroje temperatūrą kelti iki 150 °C/min greičiu. Su darbe [84] pateikta įranga buvo tirtos tik nedegiosios statybinės medžiagos (betonas, akytasis betonas, metalinių konstrukcijų elementai ir pan.). Su mūsų naudojama įranga buvo bandomi degūs natūraliosios medienos bandiniai. Taigi galime konstatuoti, kad mūsų naudota įranga yra daug universalesnė.

Siekdamas įsitikinti sumontuotos ir suderintos įrangos bandymų rezultatų pakartojamumu su anksčiau aprašyta įranga, K. Lukošius [42] atliko gipso kartono plokščių 15 bandymų. Bandinių matmenys buvo 300×300×12,5 mm. Tikrinimui pasirinktas laikas, per kurį bandinys perkaista iki pasirinktos (180 + aplinkos temperatūra $^{o}$C) temperatūros neveikiamoje bandinio pusėje.

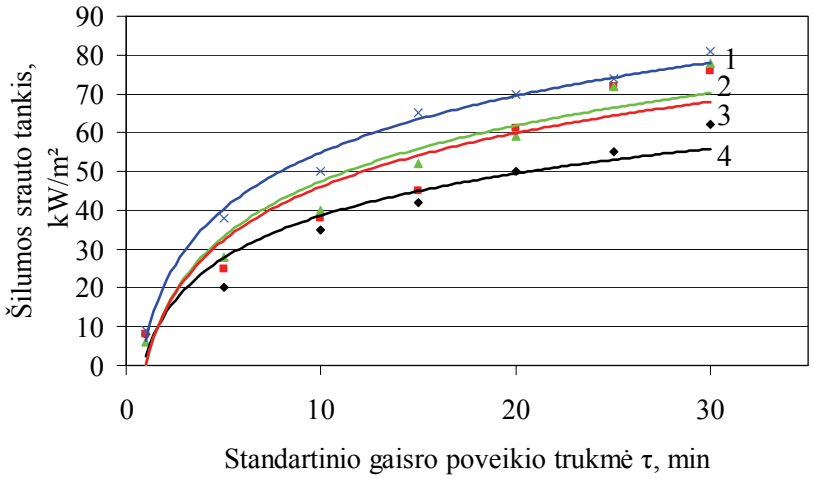
2.6 pav. pateikta šių bandymų metu nustatytų laikų histograma.



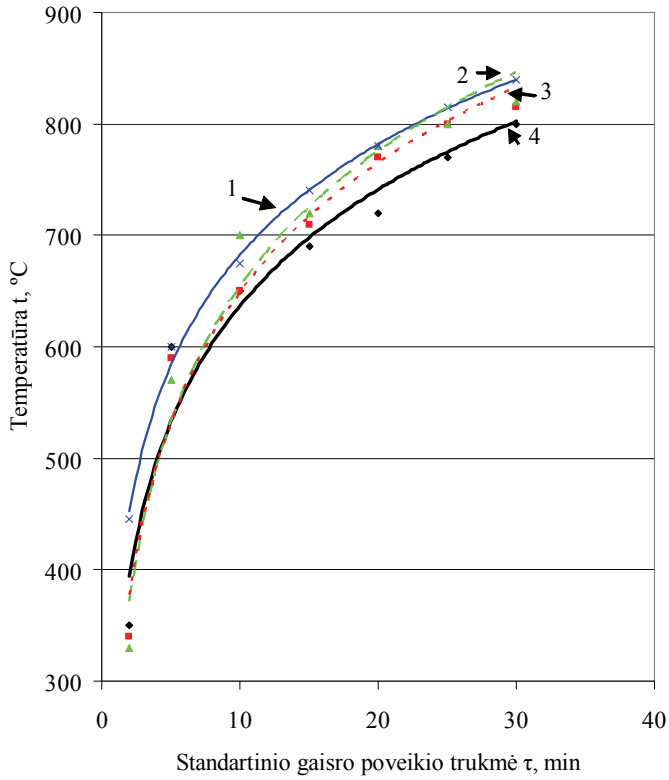

**2.6 pav.** Laiko, per kurį gipso kartonas perkaito iki 180 + aplinkos temperatūra $^{o}$C temperatūros neveikiamoje bandinio pusėje, histograma ir statistiniai rodikliai, pagal K. Lukošių [42]

Iš 2.6 pav. pateiktų duomenų matyti, kad duomenys pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Koreliacijos koeficiento (0,931) ir standartinio įverčio klaidos (0,767) vertės rodo, kad duomenys gerai atitinka normalųjį dėsnį ir jų išsibarstymas (dispersija $\sigma$ = 0,589) nėra didelis. Todėl mūsų naudojamos įrangos autorius [42] teigia, kad šia įranga išbandytų gipso kartono plokščių bandymų pakartojamumas yra pakankamas.

Taip pat svarbu ir tai, kad su mūsų naudota įranga yra modeliuojamos artimesnės standartiniam gaisrui sąlygos. Tai matyti iš 2.7 ir 2.8 pav. pateiktų lyginamųjų (tarp skirtingų laboratorijų) standartinio gaisro poveikio laiko bei šiluminio srauto tankio kreivių.

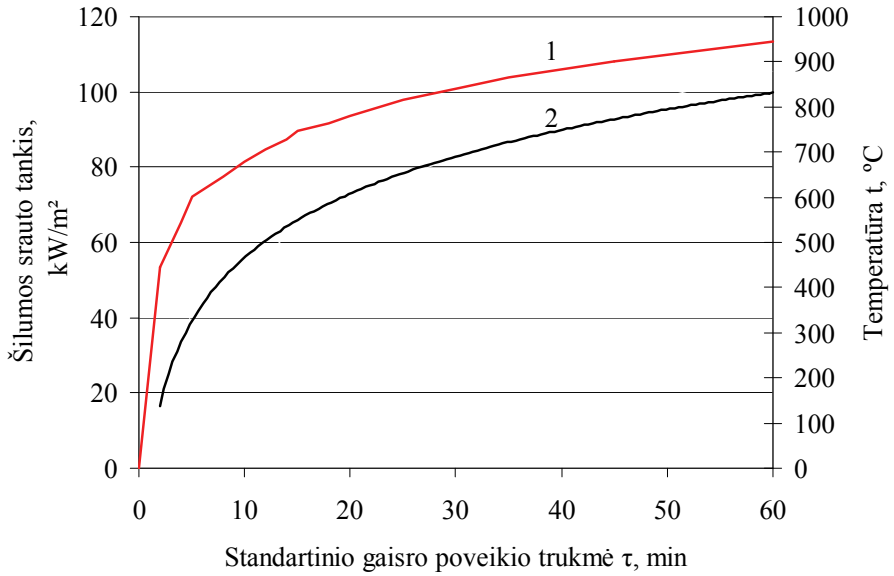



**2.7 pav.** Skirtingų laboratorijų kaitinimo kamerų šilumos srauto tankio lyginamieji duomenys standartinio gaisro sąlygomis: 1 – Lietuvos GTC; 2 – Suomijos VTT; 3 – Norvegijos NBL; 4 – Danijos DBJ




**2.8 pav.** Skirtingų laboratorijų temperatūrų lyginamieji duomenys standartinio gaisro sąlygomis: 1 – Lietuvos GTC; 2 – Suomijos VTT; 3 – Norvegijos NBL; 4 – Danijos DBJ

Gaisrinių tyrimų centre (GTC) (Lietuva) standartinio gaisro sąlygas imituojančio prietaiso išmatuotą temperatūrą ir šilumos srauto tankį (2.9 pav.) galima tarpusavyje susieti per standartinio gaisro trukmę. Taigi temperatūrą arba šilumos srauto tankį galima išreikšti vieną iš kito panaudojant priklausomybę 2.3 arba 2.4 (2.10 pav.).

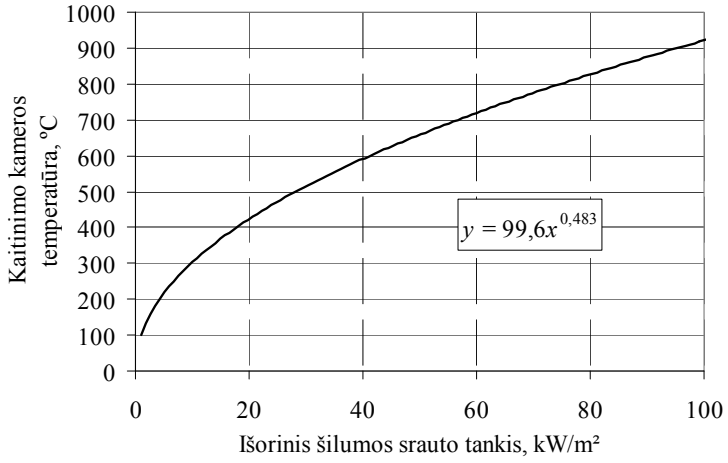



**2.9 pav.** Lietuvos GTC specialios vienpusės kaitinimo kameros išmatuotos temperatūros (1) ir išorinio šilumos srauto tankio (2) priklausomybės standartinio gaisro poveikio sąlygomis

$$T_s = 99{,}6 \cdot q_I^{\,0{,}483}, \tag{2.3}$$

$$q_I = \left(\frac{T_s}{99{,}6}\right)^{2{,}07}, \tag{2.4}$$

čia $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $T_s$ – kaitinimo kameros temperatūra, °C.




**2.10 pav.** Lietuvos GTC kaitinimo kameros temperatūros priklausomybė nuo išorinio šilumos srauto tankio standartinio gaisro sąlygomis

2.10 paveiksle gauta priklausomybė gerai atitinka literatūroje ir mūsų tyrimais gautą medienos pirolizės proceso pradžią – 245 °C ir atitinkamai 4–7 kW/m$^2$ šilumos srauto tankį [85, 86].

Minėtąja įranga bandinys kaitinimas tam tikrą laiko atkarpą τ, min, paskui metaline liniuote ar slankmačiu išmatuojamas tiriamosios medienos apanglėjimo gylis *H,* mm, galiausiai apskaičiuojamas medienos apanglėjimo greitis *β,* mm/min, pagal tokią lygtį:

$$\beta = \frac{H}{\tau}, \tag{2.5}$$

čia $\beta$ – medienos apanglėjimo greitis, mm/min; $\tau$ – degimo trukmė, min; $H$ – apanglėjimo gylis, mm.

### 2.3. SBI bandymo metodas

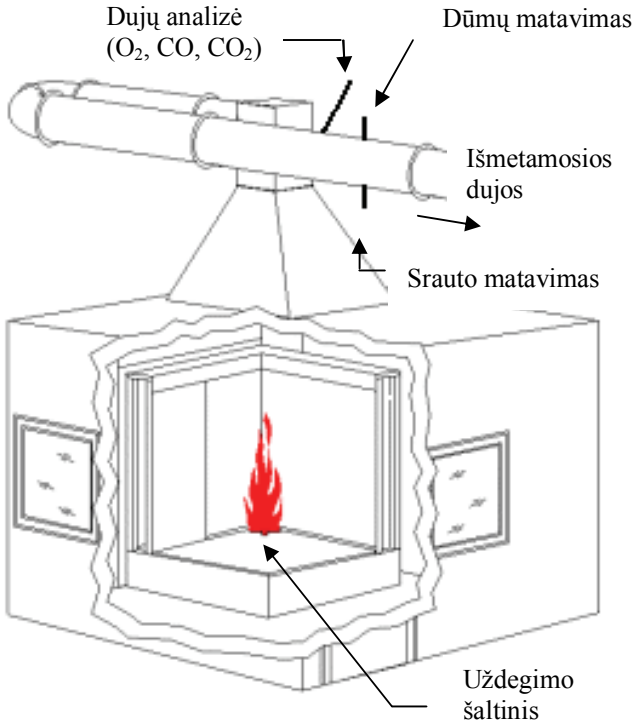
Tai visiškai naujas bandymo metodas, imituojantis gaisro sąlygas dideliems konstrukciniams elementams, maksimaliai priartindamas bandymų sąlygas prie realių gaisro sąlygų.

Gaisrinės saugos standartai Europoje leido sukurti naują statybos produktų degumo bandymą (vidutinio mastelio): vieną degantį objektą (*Single Burning Item*), t. y. SBI bandymą (2.11–2.12 pav.). Dauguma statybos produktų, gaminamų bei parduodamų Europoje, bandomi bei klasifikuojami naudojant LST EN 13823:2002 SBI bandymo metodą [87]. Klasifikuojant statybinių gaminių degumą, statybos produktų direktyva 89/109/EEB reikalauja, kad visos ES narės naudotų šią klasifikaciją vietoj nacionalinių metodų. LST EN 13823:2002 SBI metodas yra vienas iš pagrindinių bandymų metodų, kurių rezultatais remiantis statybos gaminiai klasifikuojami į degumo klases. Nors reikalaujama naudoti kitus metodus, SBI metodas būtinas klasifikuojant visus pagrindinius statybos produktus į A2, B, C ir D klases, kurios yra pagrindinės klasės, apimančios daugelį produktų, išskyrus tuos, kurie daugiausia yra neorganiniai ir priskiriami nedegiems.

Bandant pagal SBI, bandinį termiškai veikia kampo apačioje esantis 30,7 ± 2,0 kW galingumo degiklis (2.11 pav.). Degiklio liepsnos sukuriamos degant propano dujoms, kurios įleidžiamos pro smėlio dėžę. Bandinys lokalizuojamas žemiau išmetimo sistemos esančiame vežimėlyje. Bandinys susideda iš 2-jų vertikalių sparnų, kurie sudaro kampą (2.13–2.14 pav.). Trumpojo kampo matmenys: 495x1500 ± 5 mm, o ilgojo sparno: 1000x1500 ± 5 mm. Degimo kameros matmenys yra 3x3 m, bendrasis įrenginio aukštis yra apytiksliai 4,2 m. Bandymas trunka 20 min (prireikus bandymo laikas gali būti pailginamas). Išeinamosios dujos pašalinamos iš sistemos priverstine trauka. Didžioji dauguma matavimų atliekama išmetimo vamzdyje esančioje matavimų sekcijoje.

Naudojant šį bandymo metodą, galima nustatyti tokius pagrindinius degumo rodiklius: FIGRA (gaisro didėjimo spartos rodiklis), SMOGRA (dūmų kiekio didėjimo spartos rodiklis), TSP (suminis dūmų kiekis), LFS (šoninis liepsnos sklidimas ilguoju bandinio sparnu), THR (visa šiluma, išskirta bandinio per tam tikrą laiką nuo pagrindinio degiklio liepsnos veikimo pradžios) ir t. t. Šilumos ir dūmų išskyrimo greičio bei dydžio rodikliai matuojami tam skirtais prietaisais, o fizinės charakteristikos įvertinamos stebint.

Šiuo bandymo metodu galima nustatyti tokių statybos produktų degumą: impregnuotos medienos, medžio plaušo plokščių, medžio drožlių plokščių, termoizoliacinės apdailos plokščių (su mineralinės vatos, polistireno, poliuretano ir celiuliozės pluošto užpildais), dažais dengtų apdailos paviršių, PVC vamzdžių, daugiasluoksnių plokščių (su mineralinės vatos, akmens vatos, polistireno ir poliuretano sluoksniais) ir daugelio kitų medžiagų. Vienas iš didžiausių šio metodo trūkumų yra tas, kad jo diegimas reikalauja daug laiko sąnaudų, be to, labai brangi šio bandymo įranga.




**2.11 pav.** SBI bandymo įrenginio schema [87]



**2.12 pav.** SBI bandymo įrenginio bendras vaizdas



**2.13 pav.** Bandinio ilgojo ir trumpojo sparno vaizdas prieš bandymą



**2.14 pav.** Bandinio ilgojo ir trumpojo sparno vaizdas po bandymo

Nagrinėjant bei lyginant įvairius gaisrų scenarijus, pastebėta, kad bene svarbiausia yra išmatuoti šilumos išsiskyrimo greitį (toliau HRR – *Heat Release Rate*). HRR nustatymas yra pagrindinis keleto

gaisrinių bandymų tikslas. Todėl labai svarbu pasiekti kiek įmanoma tikslesnį šį dydį. Matavimai, reikalingi HRR nustatyti, yra gana sudėtingi. HRR nustatomas ne vienu matavimu, bet apskaičiuojamas iš keleto skirtingų dydžių, naudojant kelias skaičiavimo pakopas. HRR matavimas ir apskaičiavimas atliekamas taip pat ir SBI bandymo metu.

HRR apskaičiuoti naudojami 2 metodai, kurie vadinami deguonies suvartojimo bei anglies dioksido susidarymo principais. Pastarasis gali taip pat apimti anglies monoksido, angliavandenilių bei suodžių susidarymą [88]. Tačiau bene priimtiniausias yra deguonies suvartojimo principas [89, 90], kadangi dauguma medžiagų degdamos išskiria maždaug tą patį energijos kiekį priklausomai nuo sunaudoto deguonies kiekio. Tai suteikia galimybę naudoti vidutines vertes, kurios taikytinos daugumai medžiagų. Paprastai HRR skaičiuoti, taikant deguonies sunaudojimo principą, taikoma 2.6 lygtis:

$$Q = \frac{E \cdot \dot{m} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{oro}} \cdot (1 - X^0_{H_2O})}{\frac{\alpha - 1}{X^0_{O_2}} + \frac{1 - \frac{X_{O_2}}{1 - X_{CO_2}}}{X^0_{O_2} - \frac{X_{O_2} \cdot \left(1 - X^0_{CO_2}\right)}{1 - X_{CO_2}}}}, \tag{2.6}$$

čia $Q$ – šilumos išsiskyrimo greitis HRR, kW; $E$ – išskirtas energijos kiekis, kJ/kg; $\dot{m}$ – masės srautas išmetimo vamzdyje; $M_{O_2}$ – deguonies molekulinė masė, g/mol.; $M_{oro}$ – oro molekulinė masė, faktiškai dujų srauto išmetimo vamzdyje molinė masė, g/mol; $\alpha$ – degimo produktų molių skaičiaus, įskaitant azotą, santykis su reagentų molių skaičiumi, įskaitant azotą (išsiplėtimo koeficientas); $X^0_{O_2}$ – $O_2$ molinė dalis aplinkos ore, kai matuojamos sausos dujos; $X^0_{CO_2}$ – $CO_2$ molinė dalis aplinkos ore, kai matuojamos sausos dujos; $X^0_{H_2O}$ – $H_2O$ molinė dalis aplinkos ore; $X_{O_2}$ – $O_2$ molinė dalis dūmtakio dujose, kai matuojamos sausos dujos; $X_{CO_2}$ – $CO_2$ molinė dalis dūmtakio dujose, kai matuojamos sausos dujos.

2.7 lygtimi [87] apskaičiuojamas gaisro didėjimo spartos rodiklis, kuris yra lemiamas klasifikuojant statybos produktus pagal *EUROCLASS* sistemą [91].

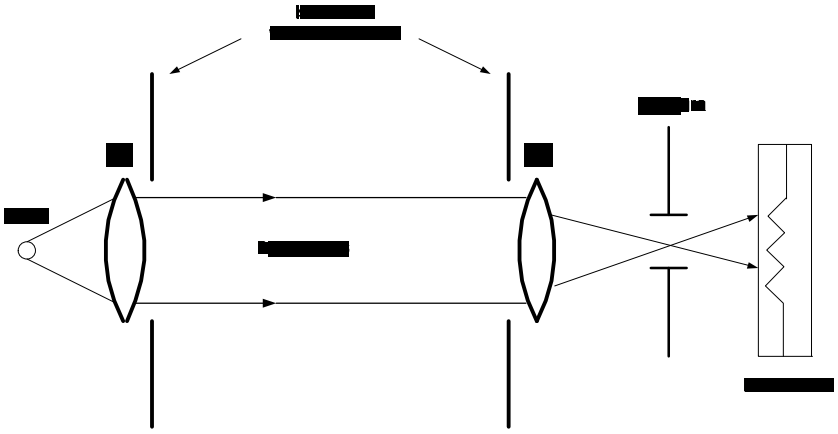
$$\text{FIGRA} = 1000 \times \max\left(\frac{\text{HRR}_{\text{av}}(t)}{t - 300}\right), \tag{2.7}$$

čia FIGRA – gaisro didėjimo spartos rodiklis, W/s; HRR(t) – šilumos išsiskyrimo greitis tam tikru laikotarpiu; $\text{HRR}_{\text{av}}(t)$ – HRR(t) vidutinė vertė, kW.

Santykis apskaičiuojamas tik tai ekspozicijos laikotarpio daliai, kai buvo viršytos $HRR_{av}$ ir THR ribinės vertės. Jei viena arba abi FIGRA rodiklio ribinės vertės ekspozicijos laikotarpiu neviršijamos, tai FIGRA rodiklis yra lygus nuliui. Naudojamos 2 skirtingos *THR* ribinės vertės, gaunant $FIGRA_{0,2MJ}$ ir $FIGRA_{0,4MJ}$.

Gaisrų metu išsiskiriantis dūmų kiekis gali būti išmatuotas dviem būdais. Vienas būdas yra surinkti bei perfiltruoti tam tikrą kiekį dujų su dūmais ir tada išmatuoti dalelių svorį. Kitas būdas – panaudoti šviesos sistemą, t. y. matuoti šviesos perėjimą per dūmus. Toks dūmų kiekio matavimo principas buvo panaudotas SBI bandymų metode. Kaip ir HRR, SPR (*smoke production rate*) ir skaičiuojamas naudojant kelis skirtingus parametrus.

SBI bandymo metu dūmai gaubto surenkami ir įtraukiami į išmetimo vamzdį, kur atliekami HRR bei dūmų matavimai (2.15 pav.). Dūmų perėjimo matavimai atliekami, kaip parodyta 2.15 paveiksle, t. y. šviesos sistemą sudaro šviesos šaltinis vienoje vamzdžio pusėje bei fotoelementas priešingoje išmetimo vamzdžio pusėje. Šviesos šaltiniui naudojama baltos šviesos lempa. Šviesos dinaminiai matavimai atliekami registruojant išėjimo signalą iš fotoelemento. Šviesos sistema kalibruojama optiniais filtrais, be to, prieš kiekvieną bandymą „aiškaus matomumo“ yra registruojama bazinė linija. Lempą ir fotoelementą nuolat apipučia oro srautas, kad būtų galima išvengti suodžių susikaupimo ant optinių paviršių.



2.15 pav. Baltos šviesos optinė dūmų matavimo sistema [87]

Signalas, išeinantis iš fotoelemento, naudojamas SPR skaičiuoti, SPR dimensija $m^2/s$. SPR skaičiuojamas pagal čia pateiktas lygtis [87]:

$$SPR = k \cdot V_{T_s}, \tag{2.8}$$

$$k = \frac{1}{l} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \tag{2.9}$$

$$V_{T_s} = \frac{V_{298} \cdot T_s}{298}, \tag{2.10}$$

čia $k$ – išnykimo koeficientas, 1/m; $V_{T_s}$ – tūrinio srauto greitis, kai temperatūra $T_s$, $m^3/s$; $l$ – šviesos kelias, t. y. išmetimo vamzdžio diametras, m; $I_0$ – signalo perdavimo nulinė vertė, t. y. be dūmų, V; $I$ – fotoelemento perdavimo signalas, V; $T_s$ – dujų temperatūra išmetimo vamzdyje, K.

SMOGRA apibrėžiamas kaip $SPR_{av}(t)/(t - 300)$ santykio didžiausia vertė, padauginta iš 10 000 [87]. Santykis apskaičiuojamas tik tai ekspozicijos laikotarpio daliai, kai yra viršijamos $SPR_{av}$ ir *TSP* ribinės vertės. Jei kuri nors viena iš ribinių verčių arba abi ekspozicijos laikotarpiu neviršijamos, *SMOGRA* lygus nuliui.

$$SMOGRA = 10000 \times \max\left(\frac{SPR_{av}(t)}{t - 300}\right), \tag{2.11}$$

čia *SMOGRA* – dūmų kiekio didėjimo rodiklis, $m^2/s^2$; SPR(t) – dūmų susidarymo greitis tam tikru laikotarpiu; $SPR_{av}(t)$ – SPR(t) vidurkis, $m^2/s$.

## 2.4. Medžio anglies elektrinės varžos matavimo įranga

Kiekvieno anglies mėginio elektrinė varža (R, Ω) buvo išmatuojama, panaudojant tam skirtą specialią įrangą (2.16 pav.).




**2.16 pav.** Anglies elektrinės varžos matavimo įranga

Priemonės, reikalingos medienos anglies varžai išmatuoti:

1. Džiovinimo kamera (2.17 pav.), kurioje galima palaikyti ne aukštesnę kaip 105 °C temperatūrą.

2. Porcelianinė piesta su grūstuvu anglies bandiniams smulkinti (2.18 pav.).

3.Varžos matavimo įrenginys, kurio matavimo ribos yra $1–10^{8\text{-}10}$ Ω.

4. Specialus presas (2.19 pav.), kuriame sudaromas 3500–5000 $kg/cm^2$ spaudimas.

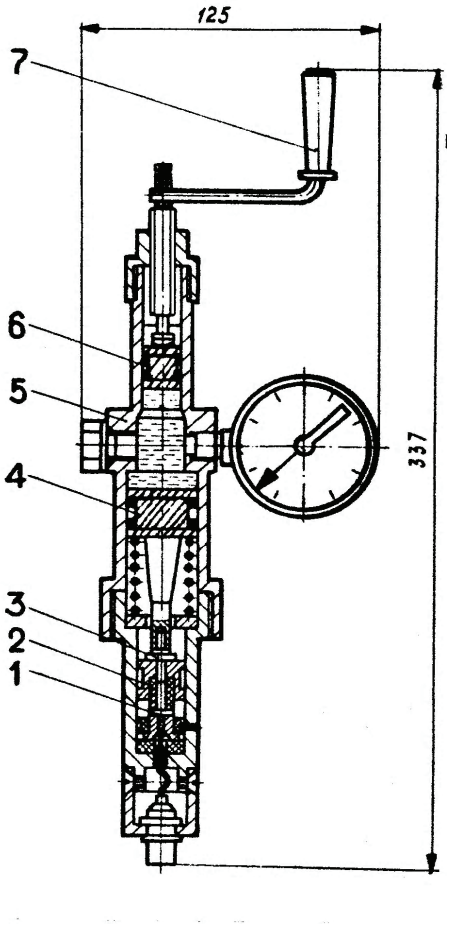
5. Presforma, kurios schema pateikta 2.20 paveiksle.



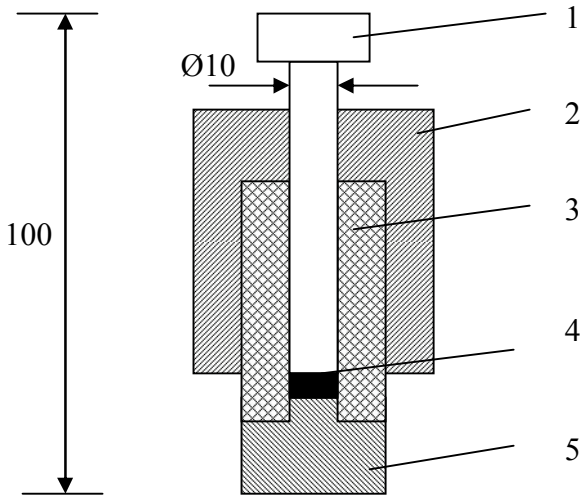
**2.17 pav.** Džiovinimo kamera



**2.18 pav.** Porcelianinė piesta su grūstuvu




**2.19 pav.** Preso sudėtinės dalys, pagal [9]:
1, 2, 3 – presforma; 4, 5, 6 – slėgio kamera;
7 – rankena




**2.20 pav.** Presforma, skirta angliai sudėti,
pagal [9]: 1 – puansonas (HRC 55-60);
2 – nukreipiamoji; 3 – ebonitinis intarpas;
4 – anglis; 5 – pagrindas (HRC 55-60)

Siekiant išmatuoti atrinkto anglies bandinio elektrinę varžą, būtina laikytis nustatyto eiliškumo. Visų pirma iš atrinktų bandinių reikia išvalyti šiukšles. Vieno bandinio masė turi būti ne mažesnė kaip 1 g. Bandinys įdedamas į atskirą atvirą indelį. Šis su bandiniu kondicionuojamas kamerinėje laboratorinėje krosnyje. Krosnies temperatūra neturi viršyti 105 °C. Bandinius kondicionuojame iki pastoviosios masės. Tada kiekvienas bandinys porcelianinėje piestoje su grūstuve sutrinamas iki reikiamos frakcijos. Sutrintų dalelių skersmuo turi būti ne didesnis nei 250 μm.

Paruošiamas varžos matavimo prietaisas (ommetras), kuriuo matuojama anglies bandinių elektrinė varža *R,* Ω.

Presas gnybtais sujungiamas su varžos matavimo prietaisu, kaip parodyta 2.16 paveiksle Toliau vyksta kiekvieno anglies bandinio elektrinės varžos matavimas. Šios procedūros veiksmų seka yra tokia: į presformą (2.20 pav.) įdedamas sutrintas anglies bandinys (300–600 mg) tiek, kad presformos pradinis aukštis be anglies (esantis GTC – 34 mm) padidėtų 4 mm; presforma įstatoma į presą ir suspaudžiama iki 3500–5000 kg/cm$^2$ slėgio. Užrašomi varžos matavimo prietaiso rodmenys. Presforma išimama iš preso ir iš jos išvaloma anglis. Procedūra kartojama tiek kartų, kiek yra paruošta bandinių.

Apanglėjusios medienos mėginių varžos matavimo rezultatai rašomi į matavimų žurnalą.

## 2.5. Tyrimų rezultatų statistinio apdorojimo ypatumai

Vienpusio konstrukcijų kaitinimo įranga (2.3 pav.), pakaitinus medienos bandinius, buvo išmatuotas apanglėjimo gylis, vėliau skaičiuojamas apanglėjimo greitis, atliekami elektrinės varžos matavimai, kiti reikalingi tyrimai. Tokiu būdu buvo gautos rodiklių vertės priklausomai nuo temperatūros, laiko ir pan. Siekiant ištirti statistinę priklausomybę tarp apskaičiuotų rodiklių, buvo naudojama duomenų regresinė analizė. Kad būtų galima gauti funkciją, kuri geriausiai atitiktų turimus duomenis, naudotas mažiausiųjų kvadratų metodas.

Tarkime, kad funkcija $y = f(x)$ nusakyta reikšmių lentele $(x_i, \tilde{y}_i)$; čia $i = \overline{1,m}$. Simbolis $\tilde{y}_i$ rodo, kad $f(x)$ reikšmės taškuose $x_i$ yra apytikslės [92]. Taip pat žinoma, kad aproksimuojančiosios funkcijos $F(x)$ analitinė išraiška yra $F(x, a_0, \ldots, a_n)$; čia $a_i$ $(i = \overline{0,n})$ – nežinomieji koeficientai, kuriuos reikia apskaičiuoti taip, kad $f(x_i)$ ir $F(x_i)$ skirtumų kvadratų suma būtų pati mažiausia, t. y. reikia minimizuoti funkciją [92]:

$$z = \sum_{i=1}^{m} (F(x_i, a_0, \ldots, a_n) - \tilde{y}_i)^2 \ . \tag{2.12}$$

(2.12) formule nusakyta tikslo funkcija turi vienintelį ekstremumą, kuris apskaičiuojamas iš lygčių sistemos [92]:

$$\frac{\partial z}{\partial a_i} = 0\,. \tag{2.13}$$

Paprastosios tiesinės regresijos atveju, kai tiesinės priklausomybės forma yra $y = a_0 + a_1 x$, koeficientai $a_0$ ir $a_1$ nustatomi taip [92]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\overline{xy} - \overline{x} \cdot \overline{y}}{\overline{x^2} - \overline{x}^2}; \\ a_0 &= \overline{y} - a_1 \overline{x}. \end{aligned} \tag{2.14}$$

Netiesinės regresijos atveju daugelis netiesinės regresijos lygčių, atlikus pertvarkymus, yra pakeičiamos į tiesinę regresiją, o tada atliekamas jų sprendimas.

Gautų statistinių priklausomybių ryšio su eksperimentiniais duomenimis stiprumui įvertinti buvo atlikta statistinė analizė. Jos metu nustatyti koreliacijos koeficientas, determinacijos koeficientas bei standartinė įverčio klaida. Determinacijos ir koreliacijos koeficientai buvo taikomi nustatant, ar regresinė kreivė atitinka eksperimentinius duomenis. Determinacijos koeficientas, kai regresinės kreivės ordinatės reikšmės $\hat{y}_i$, apskaičiuotos pagal šią lygtį [93]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \overline{y})^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}\,, \tag{2.15}$$

o koreliacijos koeficientas – pagal lygtį [92]:

$$R = \sqrt{R^2}\,. \tag{2.16}$$

Apibūdinti eksperimentinių duomenų nuokrypiui nuo regresinės kreivės naudotas standartinio įverčio klaidos rodiklis, kuris nustatomas pagal lygtį [93]:

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-2}}\,, \tag{2.17}$$

čia $n$ – bandinių skaičius.

Eksperimentiniams duomenims statistiškai apdoroti naudota kompiuterinė programa „STATISTICA 6.0“ [93]. Su šia programa atliktos eksperimentinių duomenų regresinė analizė bei gautos regresinės kreivės patikimumo statistinė analizė.

2 skyriuje išvardyta bandymų įranga sudarė sąlygas gauti tokius eksperimentinius duomenis, kuriuos apdorojus buvo nustatyta apanglėjimo greičio priklausomybė, skirta tikslesnei gaisro trukmei bei gaisro kilimo vietai nustatyti.

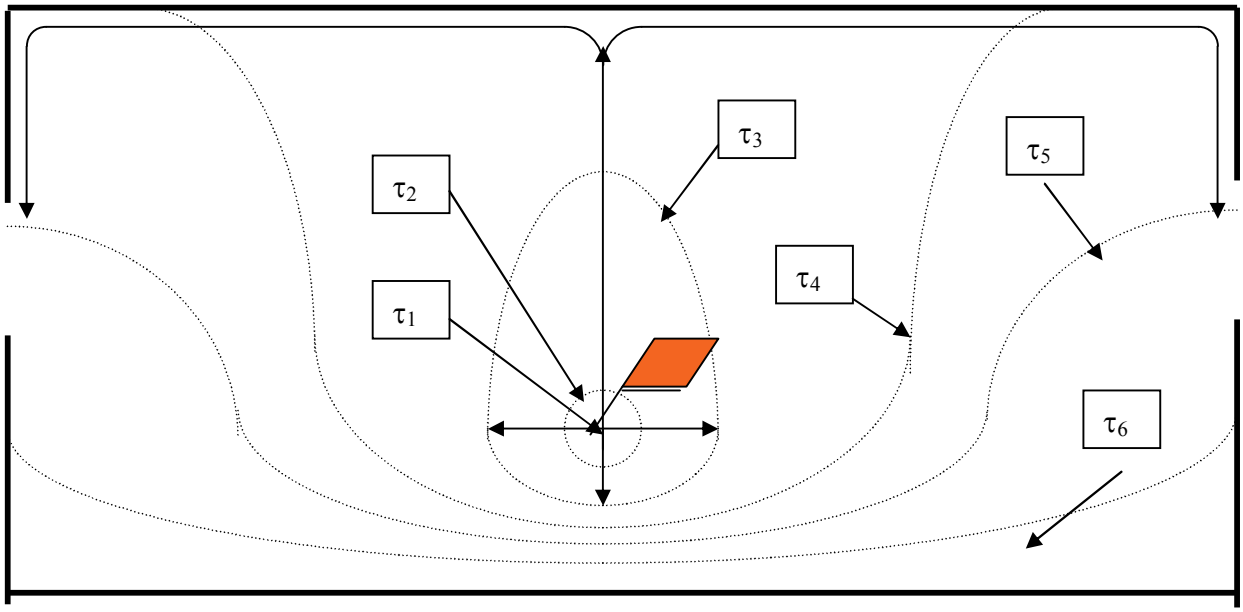
## 3. GAISRO KILIMO VIETOS NUSTATYMO TYRIMAI

Gaisro kilimo vietos (židinio) požymiai – tai būdingi medžiagų, įrenginių, konstrukcijų elementų, baldų, pastatų ir statinių terminiai pažeidimai, pagal kuriuos nustatomas gaisro židinys, kuriame pažeidimai yra didžiausi.

Pagrindiniai židinio požymiai gaisro metu pasireiškia degimo zonoje. Degimo zona – tai erdvė, kurioje vyksta degiųjų organinių medžiagų terminis skilimas ir skilimo produktų oksidavimas iki CO, $CO_2$, $H_2O$ ir t. t. Erdvėje, kurioje plinta gaisras, reikia skirti terminio poveikio zoną – čia temperatūra pakyla nuo aplinkos temperatūros iki medžiagų užsiliepsnojimo temperatūros, kai šilumos sugėrimas viršija šilumos atidavimą, bei uždūminimo zoną, kurioje temperatūra stipriai nesikeičia, bet į ją patenka degimo produktai. Šios dvi zonos turi joms būdingus požymius.

Ryškių ribų tarp degimo, terminio poveikio ir uždūminimo zonų nėra.

Gaisruose šios zonos yra nestabilios. Iš pradžių gaisro plėtimosi greitis turi tendenciją didėti, o baigiamojoje gaisro plitimo stadijoje – mažėti. Gaisro plitimas erdvėje sudaro sąlygas gaisro židinio požymiams atsirasti (3.1 pav., kaip nurodoma patvirtintoje metodikoje [7]).




**3.1 pav.** Degimo zonos patalpoje formavimosi etapai [7]

Veikiant degiąsias medžiagas mažam uždegimo šaltiniui ($\tau_1$) tam tikrą laiką, plečiasi degimo zona, kuri iš pradžių laike ($\tau_2$) turi formą, panašią į apskritimą. Laikui bėgant, jis didėja ir jo formos didėjimui pradeda daryti įtaką žemės gravitacinis laukas. Dėl jo veikimo virš užsidegimo taško atsiranda konvekcinis degimo produktų srautas. Konvekcinio srauto egzistavimą ir jo poveikį formos ($\tau_2$) plėtimuisi galima apibūdinti skirtingais degimo zonos plitimo greičiais skirtingomis kryptimis: į apačią plitimo greitis mažiausias, horizontaliai greitis didesnis, vertikaliai į viršų – didžiausias. Greičių

skirtumas paaiškinamas gryno oro patekimu į degimo zoną. Jis kaista, mažindamas degiųjų medžiagų perkaitinimą. Toks oras taip pat mažina degimo zonos fronto plitimo greitį jos apatinėje dalyje ir perkelia šilumą į viršutinę degimo zonos dalį, skatindamas degimą šioje zonos dalyje. Tuo metu ($\tau_3$) degimo zonos pjūvis įgauna kūgio formą.

Laiko momentu ($\tau_4$) degimo zona pasiekia lubas, todėl ji plis ir į šonus nuo gaisro židinio epicentro. Tada degimo zonos forma bus apverstas kūgis, kurio kraštai vėliau, pasiekus laiką ($\tau_5$), o vėliau ir laiką ($\tau_6$), nusileis prie grindų. Taip degimo zona apims visą patalpą.

Anksčiau buvo pažymėta (1.2 poskyris), kad degimo zona atpažįstama pagal pagrindinius židinio požymius. Todėl būtina patikslinti, kad židinio požymiai degimo zonoje atsiranda dėl ugnies plėtimosi erdvėje per tam tikrą laiko trukmę.

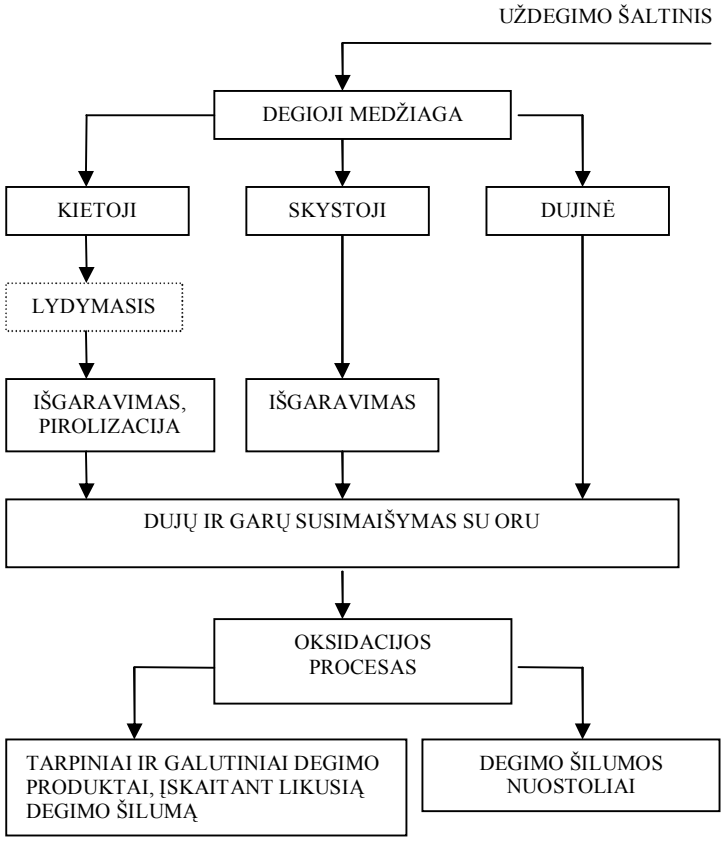
Gaisro plėtimosi ir jo likvidavimo metu gaisro židinys gali būti nustatytas pagal degimo zonos paliktus būdinguosius požymius.

Kita vertus, degimo zonai kintant erdvėje susidaro degimo krypties plitimo pėdsakai, pagal kuriuos galima spręsti apie degimo fronto plitimo kryptį ir apie gaisro židinio vietą.

Gaisro plitimo laiko veiksnys formuoja pažeidimo pėdsakus, kuriuos apibūdina būtent laikas. Vienodi pažeidimų dydžiai su nustatytomis koordinatėmis bus apibrėžti degimo zonos formos tam tikru laiko momentu, o nevienodi pažeidimų dydžiai – degimo plėtimosi kryptimi.

Kad būtų galima įvertinti čia paminėtus gaisro židinio nustatymo parametrus, neužtenka tik žinoti konstrukcijų elgseną gaisro metu, vizualiai remtis terminiais jų pažeidimais. Šiam tikslui pasiekti daugelis mokslininkų ėmėsi įvairių tyrinėjimų, kaip matematiškai apibrėžti gaisro procesus, gaisro poveikį pastato konstrukcijoms bei pačioms statybinėms medžiagoms ir įvertinti jų struktūrinių elementų kaitą gaisro metu. Empirinėmis formulėmis pagrįsti kietųjų medžiagų pirolizės, taip pat šilumos perdavimo mechanizmai leidžia kurti naujus prognozavimo metodus skaitinėmis priemonėmis. Apie tai jau rašyta 1.4 poskyryje. Šie metodai labai sėkmingai diegiama Vakarų šalyse. Čia panagrinėsime pagrindinius, laboratoriniais tyrimais nustatytus veiksnius, lemiančius medienos apanglėjimo greitį: temperatūrą, šilumos srauto tankį, deguonies kiekį, medienos drėgnį, medienos tankį ir kt.

Bet kokiame gaisre vyksta sudėtingi degimo procesai, aprėpiantys skirtingos agregatinės būsenos medžiagų degimą bei gaisro plitimą jomis (3.2 pav.). Vienas iš pagrindinių gaisre vykstančių procesų yra šilumos mainai, nuo kurių daugiausia ir priklauso gaisro plėtimosi erdvėje spartumas, jo temperatūros režimas ir pan. Nagrinėjant šilumos mainus, galima nustatyti gaisro temperatūrą, gaisro plotą, uždūminimo lygį, pavojingą atstumą nuo įkaitinto paviršiaus ir kitas reikalingas gaisro charakteristikas. Tik turėdami reikiamus pradinius duomenis, galime apytiksliai nusakyti gaisro tolesnę eigą. Dėl šios priežasties šilumos mainai yra neatsiejami nustatant reikalingus gaisro parametrus (temperatūrą ir jos poveikio trukmę).




**3.2 pav.** Supaprastinta degimo proceso schema

Norint atlikti išsamią degimo proceso analizę, būtina aptarti kai kuriuos šilumos mainų ir aerodinamikos aspektus.

Egzistuoja 3 pagrindiniai šilumos mainų mechanizmai [15–17, 23, 31]:

– šilumos laidumas;

– konvekciniai šilumos mainai;

– šiluminis spinduliavimas radiacija.

Visus šiuos išvardytus pagrindiniai šilumos mainų mechanizmus aprašo šiluminio balanso lygtis:

$$q_g = q_l + q_k + q_s, \tag{3.1}$$

čia $q_g$ – degimo šilumos srauto tankis, W/m$^2$; $q_l$ – laidumo šilumos srauto tankis, W/m$^2$; $q_k$ – konvekcijos šilumos srauto tankis, W/m$^2$; $q_s$ – radiacijos šilumos srauto tankis, W/m$^2$.

Gaisro metu vyksta visų šių rūšių šilumos mainai, bet dažnai vienoje ar kitoje gaisro plėtimosi fazėje arba kokioje nors gaisro atkarpoje vyrauja viena šilumos mainų rūšis.

Šilumos laidumas – tai šilumos mainų rūšis, būdinga kietiesiems kūnams. Jis svarbus sprendžiant uždavinius, susijusius su užsiliepsnojimu ir liepsnos plitimu kietomis degiosiomis medžiagomis, taip pat uždavinius, susijusius su atsparumu ugniai, kai būtina žinoti šilumos srautus statinio konstrukcijų elementuose.

Kadangi šilumos srautas kryptingai sklinda iš šiltesnės pusės į šaltesnę, tai pakanka nagrinėti vienmatį šilumos sklidimo uždavinį. Tada šilumos srautas $q$, patenkantis į elementarųjį sluoksnį $x$, bus lygus [15–17, 31, 94–95]:

$$q_l = -k_L \frac{\Delta T}{\Delta x}, \tag{3.2}$$

čia $\Delta T$ – temperatūrų skirtumas $\Delta x$ atstumu.

Šis santykis vadinamas Furjė šilumos laidumo dėsniu. Konstanta $k_L$ vadinamas šilumos laidumo koeficientas, W/Km. Medžiagos, gerai laidžios šilumai, yra geri elektros laidininkai. Tai paaiškinama tuo, kad šilumos mainai iš esmės vyksta dėl laisvųjų elektronų, kurių kryptingas judėjimas, esant įtampai, sukuria elektros srovę. Izoliatoriuose laisvųjų elektronų nėra. Šiuo atveju šilumos mainai juose gali vykti dėl molekulių gardelės mechaninių svyravimų, tai yra ne toks efektyvus procesas kaip elektronų judėjimas.

Konvekciniai šilumos mainai vyksta tarp skysčių (dujų) bei kietųjų kūnų ir yra susiję su skystosios (dujinės) aplinkos judėjimu (pvz., aušinant degantį daiktą šalto oro srove). Konvekciniai šilumos mainai yra visose gaisro stadijose, bet svarbiausi gaisro pradžioje, kai šiluminio spinduliavimo lygis yra žemas. Gaisre realiomis sąlygomis dujų judėjimą, susijusį su konvekciniais šilumos mainais, nusako keliamoji galia, daranti įtaką difuzinės liepsnos formai ir charakteristikoms, nes fakelą formuoja kylančios srovės. Šis procesas yra aprašomas priklausomybe, kurią pirmasis pasiūlė I. Niutonas [15–17, 31, 94–95]:

$$q_k = h_k \Delta T, \tag{3.3}$$

čia $h_k$ – konvekcinių šilumos mainų koeficientas, W/Km$^2$, $\Delta T$ – temperatūrų skirtumas.

Iš šios priklausomybės galima nustatyti koeficientą $h_k$, kuris, skirtingai nei šilumos laidumo koeficientas, nėra pastovus pasirinktai medžiagai. Jo dydis priklauso nuo sistemos charakteristikų, kietojo kūno geometrijos, skysčio savybių, srauto parametrų, temperatūrų skirtumo $\Delta T$. Konvekcinių šilumos mainų koeficiento nustatymas yra pagrindinis šilumos mainų ir hidrodinamikos teorijos uždavinys. Tipiški konvektyvinių šilumos mainų koeficiento dydžiai, esant laisvajai konvekcijai, kinta nuo 5 iki 25 W/Km$^2$, o priverstinei konvekcijai ore – nuo 100 iki 500 W/Km$^2$.

Skirtingai nei šilumos laidumas ir konvekcija, spinduliavimui nereikalinga terpė tarp šilumos šaltinio ir imtuvo (degiosios medžiagos). Šiuo atveju energija pernešama elektromagnetinėmis bangomis, kurias, panašiai kaip ir matomą šviesą, gali sugerti, praleisti arba atspindėti kūno paviršius. Spinduliavimas tampa pagrindine šilumos mainų rūšimi, jei gaisro židinio skersmuo yra daugiau kaip 0,3 m ir daro įtaką gaisro dydžiui ir plitimui patalpose. Vykstant spinduliavimo šilumos mainams, objektai, nutolę nuo gaisro, įkaista iki užsiliepsnojimo temperatūros, taip pat gaisrai plinta atvirose

vietovėse (pvz. miške) ir gretimuose pastatuose. Vykstant radiacijai, perduodama didelė dalis gaisro metu išsiskiriančios šilumos. Pagal Stefano ir Bolcmano lygtį, bendra kūno išspinduliuojama energija yra proporcinga absoliutinei kūno temperatūrai. Tuomet bendra išspinduliuojama energija lygi [15–17, 31, 94–95]:

$$E = \varepsilon_s \sigma T^4, \tag{3.4}$$

čia $\varepsilon_s$ – koeficientas, nusakantis spinduliuojamųjų kūnų paviršiaus efektyvumą; pats idealiausias spinduliuojamasis kūnas yra juodasis kūnas, kurio spinduliavimo efektyvumas lygus 1; σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, lygi $5{,}67 \cdot 10^{-8}$, $W/m^2K^4$; $T$ – absoliutinė temperatūra, K.

Nuo spinduliuojančio kūno nutolusio spinduliavimo energijos intensyvumas yra nustatomas naudojant tam tikrą spinduliavimo koeficientą Φ, kuris įvertina ryšį tarp spinduliuojančio kūno ir kūno, sugeriančio spindulius [15–17, 31, 94–95]:

$$q_s = \Phi \varepsilon_s \sigma T^4, \tag{3.5}$$

čia Φ – apspinduliavimo koeficientas; $\varepsilon_s$ – koeficientas, nusakantis spinduliuojamųjų kūnų paviršiaus efektyvumą; pats idealiausias spinduliuojamasis kūnas yra juodasis kūnas, kurio spinduliavimo efektyvumas lygus 1; σ – Stefano-Bolcmano konstanta, lygi $5{,}67 \cdot 10^{-8}$, $W/m^2K^4$; $T$ – absoliutinė temperatūra, K.

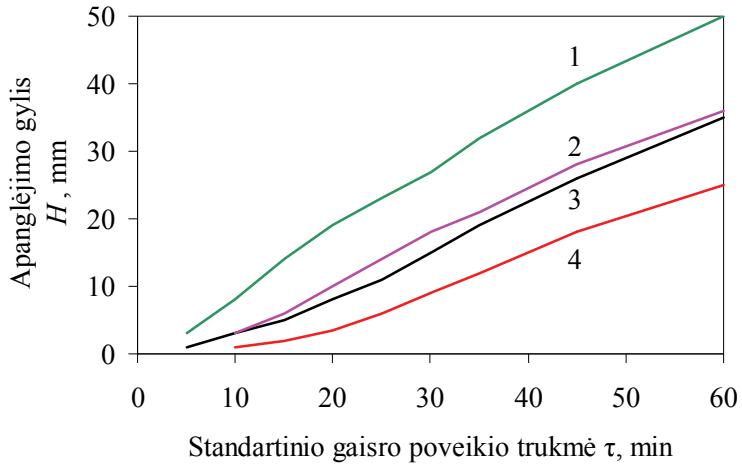
Nors anksčiau pateikta informacija yra gerai žinoma iš senųjų literatūros šaltinių, tačiau prie jos būtina dar kartą grįžti, kad būtų galima suvokti ir įvertinti pagrindinius medienos apanglėjimui įtakos turinčius parametrus.

## 3.1. Medienos apanglėjimo greičio ir senojo gaisro kilimo vietos nustatymo metodo patikimumas

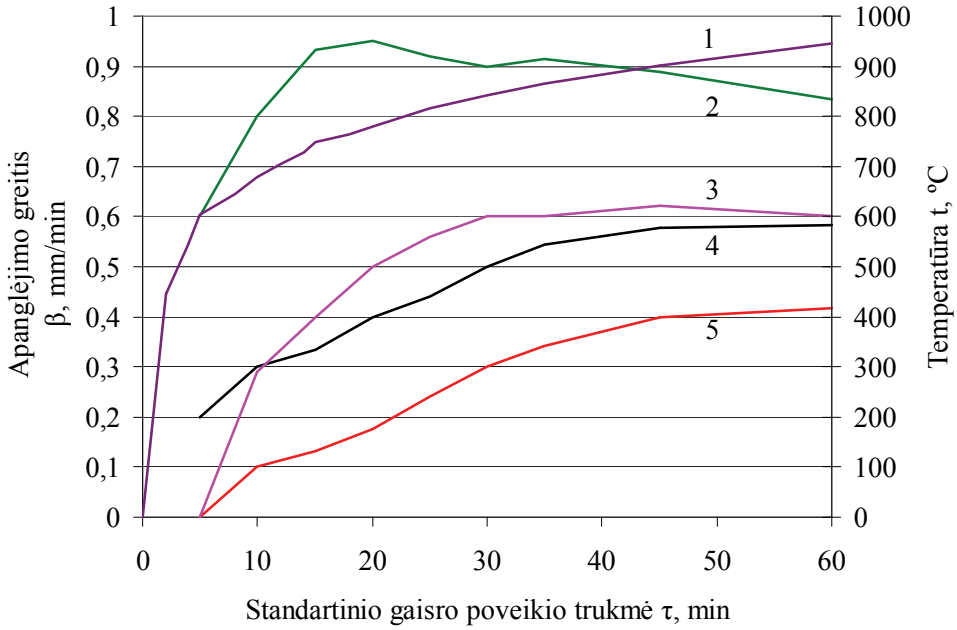
### 3.1.1. Specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera gauti tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Šiame skyriuje pateikti tyrimų rezultatai aptarti autoriaus publikacijose disertacijos tema [1A–9A]. Naudojantis 2.2 skyriuje aprašyta bandymų įranga, nustatyta, kad medienos apanglėjimo gylis standartinio gaisro sąlygomis skirtingoms medienoms rūšims tuo pačiu laiko momentu yra nevienodas (3.3 pav.) ir vyksta skirtingu greičiu. Spygliuočių medienos apanglėjimo greitis yra 0,8–0,9 mm/min, lapuočių ir impregnuotos spygliuočių medienos apanglėjimo greitis yra 0,5–0,6 mm/min, o impregnuotos lapuočių medienos apanglėjimo greitis yra 0,3–0,4 mm/min. Kaip matyti iš šių duomenų, skirtingos rūšies medienos apanglėjimo greitis skiriasi, yra efektyvu naudoti medienai antipirenus apanglėjimo greičiui mažinti (3.4 pav.). Apanglėjimo greičio skirtumai tarp spygliuočių medienos (pušies ir eglės) arba lapuočių medienos (ąžuolo ir uosio) yra nežymūs ir patenka į jau minėtas apanglėjimo greičio ribas (1 priedas).

Bandymų metu gauti apanglėjimo greičio duomenys gana panašūs į *Eurocode* 5 [26] pateiktus spygliuočių (minkštosios medienos) ir lapuočių (kietmedžio) tariamuosius apanglėjimo greičius (1.2 lentelė). Čia pateikiamos tokios apanglėjimo greičio vertės: spygliuočių medienai, kurios tankis $\geq$ 290 kg/m$^3$ – $\beta_n$ = 0,8 mm/min, o lapuočių medienai (kietmedžiui), kurios tankis $\geq$ 450 kg/m$^3$ – $\beta_n$ = 0,55 mm/min. Taigi įsitikinome, kad standartinio gaisro poveikio medinių konstrukcijų fragmentams naudota bandymo įranga yra tam tinkama, o rezultatai pakankamai patikimi.




**3.3 pav.** Apanglėjimo gylio pokytis standartinio gaisro sąlygomis: 1 – spygliuočių medienai; 2 – spygliuočių medienai su apsaugos priemonėmis; 3 – lapuočių medienai; 4 – lapuočių medienai su apsaugos priemonėmis




**3.4 pav.** Apanglėjimo greičių skirtumai standartinio gaisro sąlygomis: 1 – standartinio gaisro temperatūros pokytis; 2 – spygliuočių medienai; 3 – spygliuočių medienai su apsaugos priemonėmis; 4 – lapuočių medienai; 5 – lapuočių medienai su apsaugos priemonėmis

Svarbu pažymėti, kad impregnavimo efektyvumas spygliuočių medienai yra daug didesnis nei lapuočių medienai. Po 10 min standartinio gaisro poveikio pušies apanglėjimo greitis siekia

0,8 mm/min, o kai ji yra impregnuota, tuo pačiu laikotarpiu apanglėjimo greitis nesiekia ir 0,3 mm/min. Taigi 0,5 mm/min skirtumas yra pakankamai didelis. Ąžuolo medienos atveju po 10 min apanglėjimo greitis siekia 0,3 mm/min, o impregnuoto ąžuolo – 0,1 mm/min, o skirtumas sudaro 0,2 mm/min. Tai galima paaiškinti tuo, kad skiriasi šių medienų antipireno sugėrimo galimybės (po 10 val. mirkymo spygliuočių medienos (pušies ir eglės) impregnavimo gylis buvo 7–10 mm, o lapuočių medienos (ąžuolo ir uosio), kurių tankis daug didesnis, impregnavimo gylis siekė tik 3–5 mm). Didžiausias apanglėjimo greičių skirtumas tarp impregnuotos ir neimpregnuotos medienos yra standartinio gaisro poveikio pradžioje, tuomet antipirenų apsauginės savybės pasireiškia labiausiai. Kaip matyti 3.4 paveiksle, apanglėjimo greitis nepriklausomai nuo to, kokia yra mediena, didėja tolygiai temperatūros augimo atžvilgiu. Ir tik vėliau, po 30–35 min. standartinio gaisro poveikio apanglėjimo greitis tampa beveik pastovus. Po 45 min pušies apanglėjimo greitis sparčiai mažėja, kadangi apanglėjimo procesui pradeda daryti įtaką susidariusio anglies sluoksnio apsauginis poveikis.

Palyginkime gautus eksperimentinius duomenis su duomenimis, gautais iš literatūros šaltiniuose pateiktų lygčių, pvz., (1.23), naudojant skirtingas kaitinimo kameras. Pavyzdžiui, kai $\rho$ = 455 kg/m$^3$, $\tau$ = 60 min, ir jeigu laikoma, kad vidutinis šilumos srautas yra toks, kurį gavome ir mes (naudotos kaitinimo kameros srautas 100 kW/m$^2$), apskaičiuotas apanglėjimo greitis gaunamas $\beta$ = 0,58 mm/min, o mūsų išmatuotas yra 0,8 mm/min. Kai $\rho$ = 680 kg/m$^3$, tai pagal (1.23) priklausomybę apskaičiuotas apanglėjimo greitis bus 0,39 mm/min, o mūsų išmatuotas yra 0,5 mm/min. Taigi, skirtumai akivaizdūs ir įrodo, jog pateikta skaičiavimo formulė mažina apanglėjimo greičio vertes ir nevisiškai atspindi mūsų faktinius tyrimų rezultatus.

Lygindami mokslininkų [8–10] gautus eksperimentinius apanglėjimo gylio duomenis pastoviose kaitinimo temperatūrose (1.5 pav.), kada 1 mm/min apanglėjimo greitis pastebimas, esant vidutinėms temperatūroms daugiau kaip 540 °C, su mūsų duomenimis, gautais standartinio gaisro sąlygomis (3.3 pav. ir 3.4 pav.), ypač per pirmąsias standartinio gaisro 30 min, kai 1 mm/min apanglėjimo greitis pasiekiamas esant vidutiniam 650 °C temperatūros poveikiui, pastebėsime, jog duomenys panašūs ir atitinka spygliuočių medienas, kurių tankis yra 435–455 kg/m$^3$ (eglės ir pušies). Tačiau mūsų atlikti apanglėjimo greičio nustatymo bandymai su skirtingos rūšies mediena akivaizdžiau parodo, jog gaisro kilimo vietos nustatymas tik pagal apanglėjimo gylį gali būti labai netikslus ir netgi klaidingas, kadangi, kaip jau pastebėjome iš 3.3 paveikslo, medienos apanglėjimo gylis standartinio gaisro sąlygomis tuo pačiu laiko momentu yra skirtingas skirtingoms medienoms rūšims. Vadinasi, ir esant pastovaus temperatūros režimo poveikiui anglies gylis skirsis.

Mūsų atliktų eksperimentų metu gauti skirtingi apanglėjimo greičiai (3.4 pav.) leidžia manyti, kad skirsis ir senuoju gaisro kilimo vietos nustatymo metodu apskaičiuotos temperatūros vertės bei standartinio gaisro poveikio trukmė medinių konstrukcijų elementams, kai prognozė atlikta naudojantis 1.1–1.8 lygtimis.

Apskaičiuojant gaisro temperatūrą, svarbu matuoti medienos anglies elektrinę varžą *R,* Ω, kadangi tyrimais pastebėta, jog anglies varžos vertės kinta priklausomai nuo temperatūros dydžio. Mums atliekant bandymus standartinėmis gaisro sąlygomis anglies elektrinės varžos vertės buvo išmatuotos skirtingais standartinio gaisro (3.4 pav., 1) poveikio laikotarpiais (3.1 lentelė). Gautos vertės atitinka 3.5 paveikslo, 2 pateiktus duomenis (laipsninės regresijos lygties koreliacijos koeficientas lygus $R = 0{,}9548$).

Lygiai taip pat nesudėtingai galime išreikšti tokią anglies elektrinės varžos sąsają su standartinio gaisro temperatūra, kokia pavaizduota 3.5 paveiksle, 1 (logaritminės regresijos lygties koreliacijos koeficientas lygus $R = 0{,}9552$).

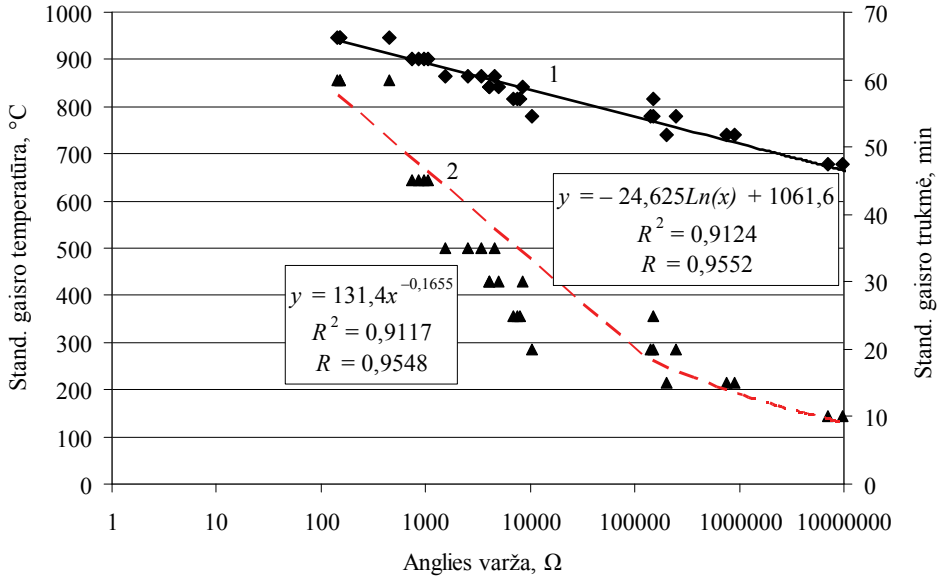
3.1 lentelė. Faktinės ir apskaičiuojamos standartinio gaisro poveikio temperatūrų palyginimas bei pamatuota anglies bandinio elektrinė varža

| Standartinio gaisro poveikio laikas, min | Medienos rūšis | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Lapuočių (ąžuolo, uosio) | Spygliuočių (pušies, eglės) | Impr. lapuočių | Impr. spygliuočių |
| | *t*/ t**, R*, Ω | | | |
| 5 | 605/1132, $20\cdot10^6$ | 605/755, $20\cdot10^6$ | 605/ -, - | 605/ -, - |
| 10 | 680/906, $15\cdot10^6$ | 680/618, $7\cdot10^6$ | 680/1202, $9{,}6\cdot10^6$ | 680/798, $13\cdot10^6$ |
| 15 | 750/691, $10{,}5\cdot10^6$ | 750/633, $2\cdot10^5$ | 750/1104, $7{,}5\cdot10^5$ | 750/752, $9\cdot10^5$ |
| 20 | 780/758, $1{,}5\cdot10^5$ | 780/673, 10500 | 780/967, $2{,}45\cdot10^5$ | 780/710, $1{,}43\cdot10^5$ |
| 25 | 815/811, 7 560 | 815/646, 8 000 | 815/830, $1{,}5\cdot10^5$ | 815/756, 6 800 |
| 30 | 840/754, 5 000 | 840/641, 4 000 | 840/858, 8 560 | 840/722, 4 000 |
| 35 | 865/717, 3 450 | 865/626, 2 550 | 865/813, 4 550 | 865/730, 1 550 |
| 45 | 900/705, 960 | 900/619, 1 050 | 900/796, 850 | 900/701, 750 |
| 60 | 945/740, 143 | 945/613, 450 | 945/818, 150 | 945/730, 150 |

Pastaba: t* – faktinė standartinio gaisro temperatūra, °C; t** – apskaičiuota temperatūra, °C (naudojantis PAMTI (Rusija) metodika [3, 9, 10]); R – anglies bandinių elektrinė varža, Ω (2.4 poskyris).

Kaip matyti 3.5 paveiksle, standartinio gaisro sąlygomis atliktų tyrimų duomenys sutampa su šaltiniuose [9–10] deklaruojamais teiginiais, jog anglies bandinių elektrinė varža mažėja didėjant temperatūros poveikiui. Tai aiškinama tuo, kad degant medinėms konstrukcijoms anglies sluoksnis ir jos sudėtis keičiasi priklausomai nuo gaisro plėtimosi greičio. Kadangi skirtinga anglies sluoksnių sudėtis, skiriasi ir pasipriešinimas elektros srovei, todėl labai svarbu, kokiame sluoksnyje matuojama anglies varža (būtina atrinkti mėginius nuo anglies sluoksnio paviršiaus ne giliau kaip 3–5 mm).

Taigi, nustatę anglinės liekanos varžą, tiesioginiu būdu galime nustatyti standartinio gaisro temperatūrą arba išorinį šilumos srauto tankį, atsižvelgdami į pastarųjų abipusį sąryšį standartinio gaisro sąlygomis, pagal (2.9) priklausomybę.




**3.5 pav.** Standartinio gaisro temperatūros (1) ir standartinio gaisro trukmės (2) ryšys su tiriamosios anglinės liekanos elektrine varža

Tačiau, deja, toks standartinės temperatūros prognozavimas nėra tikslus realaus gaisro sąlygomis. Remiantis šaltinių [17, 31, 48–51] duomenimis, mediena pradeda apanglėti 200–250 °C temperatūroje, tačiau panašaus efekto galime sulaukti ir daug mažesnėje 130 °C temperatūroje, jei toks kaitinimo procesas ilgai trunka. Vadinasi, tam tikras apanglėjimo gylis gali būti pasiektas esant skirtingoms temperatūroms, skirtingu metu (1.5 pav.). Dėl to, siekiant tiksliau prognozuoti temperatūras tam tikrose gaisravietės vietose, svarbu ne tik matuoti elektrinę varžą, įvertinančią anglies struktūrinius skirtumus, susiformavusius skirtingose temperatūrose, bet ir atsižvelgti į medinio elemento ar konstrukcijos storį bei apanglėjimo gylį, o tai ir įvertina mokslininkų [8–10] pateikta temperatūros nustatymo lygtis (1.1).

Atlikę tyrimus standartinio gaisro sąlygomis nustatėme, kad nėra žymaus skirtumo tarp lapuočių ir spygliuočių medienos „indukcinio laiko“ $\tau_o$, min, kurio priklausomybė nuo temperatūros atitinka mokslininkų pateikiamą (1.6) lygtį. Nutatyta, kad medienos su apsaugos priemonėmis apanglėjimo procesas dėl apsauginių priemonių poveikio prasideda daug vėliau. Vadinasi, šis faktas turi būti įvertintas skaičiuojant medienos apanglėjimo greitį. Medienai su apsaugos priemonėmis (antpirenais) „indukcinį laiką“ $\tau_{oi}$, min, gerai aprašo žemiau mūsų tyrimo duomenis (2 priedas) atitinkanti priklausomybė:

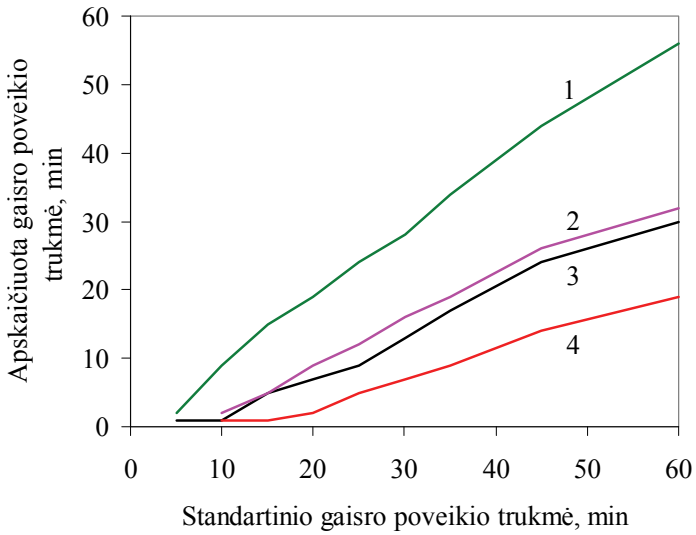
$$\tau_{oi} = 94 – 0{,}101 \cdot T, \qquad (3.6)$$

čia $\tau_{oi}$ – impregnuotos medienos „indukcinis laikas“, t. y. laiko atkarpa, trunkanti iki momento, nuo kurio apanglėjimo į gylį procesas pradeda vykti greičiu, artimu pastoviajam; $T$ – temperatūra, K.

Kaip matyti tiek (1.6), tiek (3.6) priklausomybėse, tarp „indukcinio laiko“ $\tau_o$, min, ir skirtingos poveikio temperatūros $T$, K, yra tiesinė priklausomybė. Taip pat atkreiptinas dėmesys, kad „indukcinis laikas“ $\tau_{oi}$, min, turi lemiamos įtakos medienos su antipirenais apanglėjimo trukmei nustatyti, kai temperatūros poveikis medinėms konstrukcijoms yra mažesnis nei $T \leq 900$ K (627 °C).

Tęsdami eksperimentinių duomenų analizę, toliau bandysime prognozuoti, kokia būtų standartinio gaisro poveikio trukmė pagal senajam metodui [9–10] sukurtas apskaičiavimo (1.1–1.8) lygtis, taip pat sieksime patikrinti šio metodo patikimumą.

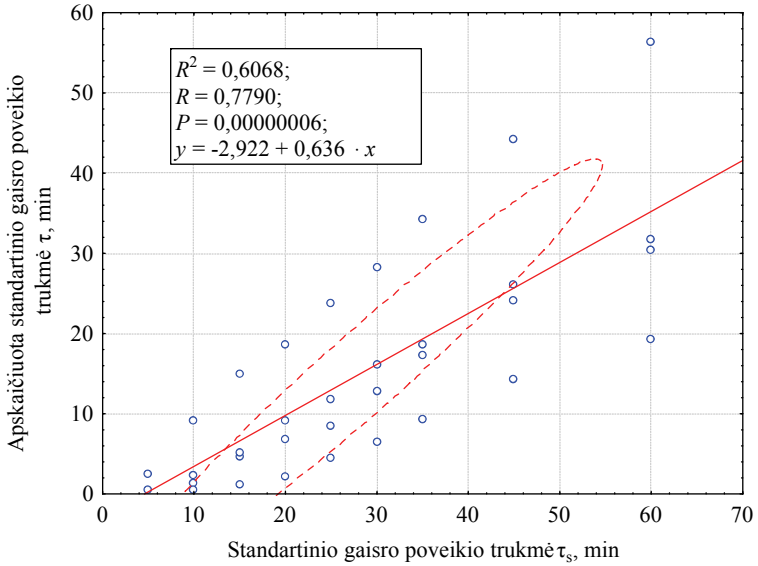
Atlikę gaisro trukmės apskaičiavimą senuoju metodu iš duomenų, pateiktų 3.6 pav., nustatėme, kad tik spygliuočių medienos atveju apskaičiuota gaisro poveikio trukmė (56 min) praktiškai sutampa su realia standartinio gaisro poveikio trukme po 60 min. Tuo tarpu lapuočių medienai, ypač tada kai pastaroji apsaugota antipirenais, skaičiavimo tikslumas sumažėja. Tuomet po 60 min standartinio gaisro poveikio apskaičiuota gaisro poveikio trukmė lygi 18 min. Taigi jau per 1 val. susidaro daugiau nei 40 min skirtumas.




**3.6 pav.** Mūsų nustatytas senuoju metodu apskaičiuotos ir eksperimentinės gaisro trukmės ryšys: 1 – spygliuočių medienai; 2 – spygliuočių medienai su apsaugos priemonėmis; 3 – lapuočių medienai; 4 – lapuočių medienai su apsaugos priemonėmis

Atlikę pagal seną metodiką apskaičiuotos ir išmatuotos standartinio gaisro poveikio trukmės lyginamąją statitistinę analizę skirtingoms medienos rūšims (3.7 pav.), nustatėme, kad apskaičiuoti rezultatai yra išsidėstę nenuosekliai, o koreliacijos koeficientas $R$ tėra lygus 0,779. Tai įrodo senojo metodo apskaičiuotų duomenų nepakankamą patikimumą.

Dėl šios priežasties, didinant apskaičiuotų rezultatų tikslumą, iškyla būtinybė atlikti tyrimo objektų diferenciaciją pagal aptartus rodiklius. Ši būtinybė ypač išryškėja pastaruoju laikotarpiu, nes didėja reikalavimai medinių konstrukcijų atsparumui ugniai [96]. Didesnio apsaugos lygio reikalaujančiuose statiniuose medinės konstrukcijos turi būti sunkiai degios, o tai gali būti pasiekiama tik jas apsaugant įvairiais antipirenais.

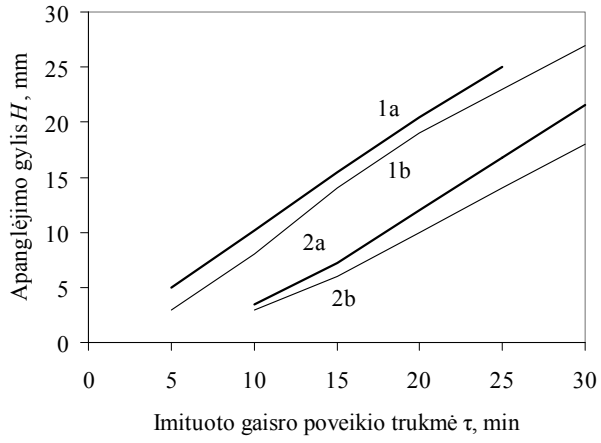



**3.7 pav.** Pagal seną metodiką mūsų apskaičiuotos ir išmatuotos standartinio gaisro poveikio trukmės lyginamoji statistinė analizė: — – tiesinės regresinės analizės kreivė; ---- – vidutinės apskaičiuotos vertės 95 % pasikliautinosios ribos

Vadinasi, būtina sukurti tokį matematinį medienos apanglėjimo greičio, gaisro trukmės apskaičiavimo modelį, pagal kurį įvardyti veiksniai (medienos tankis, drėgnis, deguonies kiekis, apsaugos priemonės), veikiantys apanglėjimo procesą, bus tinkamai įvertinti.

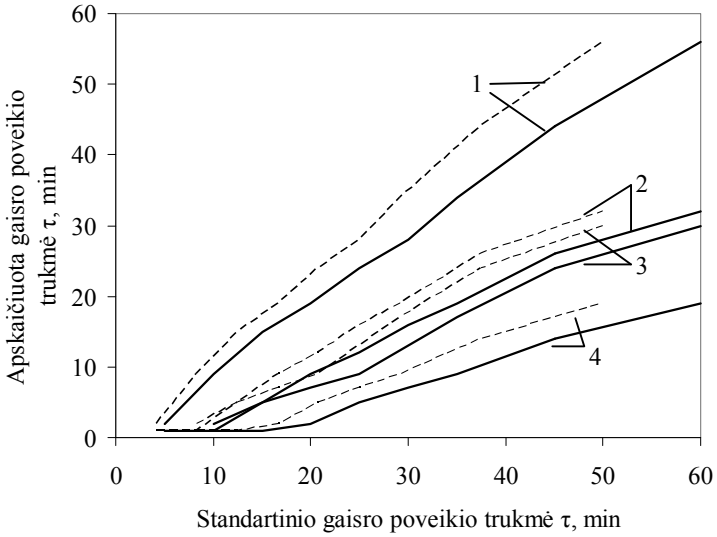
### 3.1.2. SBI įranga gautų rezultatų aptarimas

Tolesni medienos apanglėjimo tyrimai, naudojantis SBI metodo įranga [87], verčia prieš tai gautas anglies gylio ir apanglėjimo greičio vertes pakoreguoti, kadangi nustatyta, kad nepriklausomai nuo to, kokia mediena ir ar ji apsaugota antipirenais, ar ne, apanglėjimo greitis aktyvesnis 20 %. Pavyzdžiui, per 25 min pušinių lentų apanglėjimo greitis buvo lygus 0,95–1,1 mm/min, o impregnuotų pušinių lentų per 25 min apanglėjimo greitis buvo lygus 0,6–0,75 mm/min. SBI metodu ir specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo įranga gauti anglies gylio laiko atžvilgiu lyginamieji duomenys (3.8 pav.).




**3.8 pav.** Skirtingais metodais tirtos medienos apanglėjimo gylio priklausomybė nuo laiko: 1 – pušies; 2 – pušies, apsaugotos antipirenu „BAK 1“; a – SBI metodu; b – specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo įranga

Be abejonės, tokie skirtumai susidaro dėl papildomo deguonies kiekio, kadangi SBI metodas realizuojamas maksimaliai natūralioje aplinkoje, bandinių dydžiai taip pat yra natūralaus dydžio. Todėl būtina įvesti koeficientą ($k_d$ = 1,2), įvertinantį deguonies kiekį bandymo sąlygoms prognozuojant kaitinimo kamerų eksperimentinius duomenis. Įvertinus pataisos koeficientą $k_d$ matyti, kad skirtumas tarp realaus gaisro poveikio trukmės ir senuoju metodu apskaičiuotos trukmės yra didelis (3.9 pav.).




**3.9 pav.** Mūsų nustatytas senuoju metodu apskaičiuotos ir eksperimentinės gaisro trukmės ryšys: 1 – spygliuočių medienai; 2 – spygliuočių medienai su apsaugos priemonėmis; 3 – lapuočių medienai; 4 – lapuočių medienai su apsaugos priemonėmis. Punktyrinė linija žymi pakoreguotus ($k_d$ = 1,2) standartinio gaisro poveikio laiko duomenis

SBI metodu gautų pagrindinių rodiklių vertės pateiktos 3.2 lentelėje. Kaip matyti, SBI metodu gauti duomenys yra skirti degumo ar dūmų susidarymo klasei nustatyti ir duomenų vertės nėra tiesiogiai taikomos tolesnėje apanglėjimo greičio skaičiavimo išraiškoje.

**3.2 lentelė.** SBI metodu gautų pagrindinių rodiklių vertės

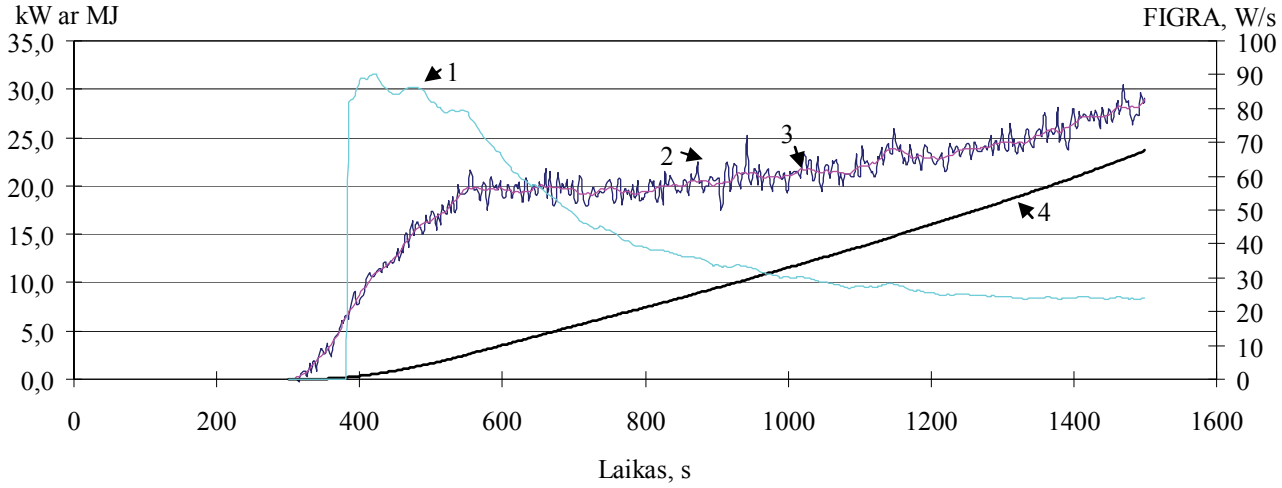
| Medienos rūšis | Nr. | Bandymo rodiklis | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | FIGRA 0,2, W/s (laikas, s) | FIGRA 0,4, W/s (laikas, s) | THR (600), MJ | Degumo klasė* | SMOGRA, $cm^2/s^2$ (laikas, s) | TSP (600), $m^2$ | Dūmų susid. klasė* |
| Spygliuočių su apsaugos priemonėmis | 1 | 233,4 (345) | 224,8 (363) | 15,3 | D | 81,3 (345) | 206,4 | s3 |
| | 2 | 133,1 (354) | 122,1 (393) | 11,7 | C | 75,8 (354) | 235,1 | s3 |
| | 3 | 90,3 (420) | 90,3 (420) | 9,5 | C | 91,9 (348) | 233,7 | s3 |
| | 4 | 212,1 (408) | 212,1 (408) | 12,2 | C | 12 (399) | 54,2 | s2 |
| | 5 | 22,3 (396) | 224,3 (396) | 9,1 | C | 2,3 (870) | 37,0 | s1 |
| | 6 | 122,0 (408) | 122,0 (408) | 6,3 | C | 1,0 (1305) | 35,1 | s1 |
| Spygliuočių be apsaugos priemonių | 7 | 340,4 (322) | 350,8 (335) | 17,3 | D | 86,3 (339) | 226,4 | s3 |
| | 8 | 360,3 (334) | 343,7 (358) | 15,7 | D | 96,2 (331) | 258,3 | s3 |
| | 9 | 359,6 (320) | 331,3 (356) | 17,6 | D | 93,5 (325) | 240,4 | s3 |
| Lapuočių su apsaugos priemonėmis | 10 | 225,6 (412) | 225,6 (412) | 9,3 | C | 2,4 (870) | 39,2 | s1 |
| | 11 | 34,1 (482) | 17,3 (1523) | 2,5 | A2/B | 1,2 (1490) | 25,4 | s1 |
| Lapuočių be apsaugos priemonių | 12 | 355,3 (330) | 345,1 (363) | 15,2 | D | 81,2 (340) | 218,5 | s3 |
| | 13 | 360,9 (345) | 336,7 (390) | 15,9 | D | 97,8 (331) | 237,3 | s3 |

* Degumo ir dūmų susidarymo klasės nustatomos pagal šaltinį [97]

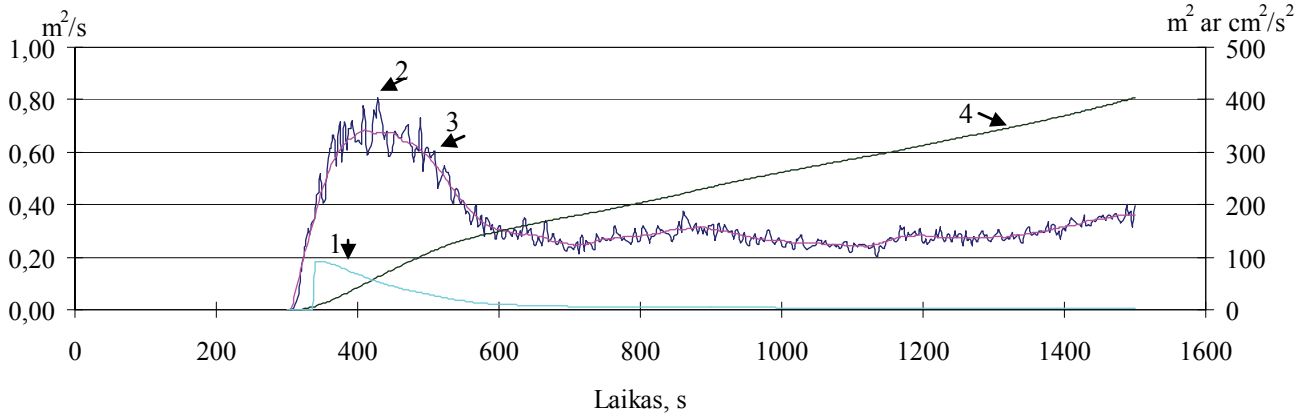
Tačiau tai dar nereiškia, kad ateityje nebus galimybės to padaryti. Tam tiesiog reikalinga atlikti sistemingą nagrinėjamu požiūriu tyrimą, kaupiant gautus eksperimentinius duomenis (ieškant aiškaus apanglėjimo greičio bei kitų rodiklių koreliacinių ryšių, darančių įtaką tolesniam gaisro trukmės bei gaisro kilimo vietos nustatymui) per ilgesnį laiką, nei mums teko su šiuo prietaisu dirbti. Gaisrinių tyrimų centre jis buvo pradėtas naudoti tik 2004 m. antrojoje pusėje. Be to, bandymų gausą riboja didelė bandymų atlikimo kaina. Nepaisant to, SBI metodu gauti duomenys iš esmės jau dabar preliminariai patvirtina nustatytus dėsningumus. Kaip matyti 3.2 lentelėje, bandymų duomenys medienai su antipirenais pakankamai skirtingi. Tai galima paaiškinti skirtingu apsauginės priemonės efektyvumo lygiu.

Remiantis mūsų sukauptais bandymų rezultatais, be apanglėjimo greičio $\beta$, mm/min, matavimų, pastebėti tokie esminiai skirtumai tarp tiriamosios medienos bandinių: gaisro didėjimo spartos rodiklis FIGRA bei suminės šilumos THR (600) vidutinės vertės bandiniams su antipirenais (149 W/s ir 9,5 MJ atitinkamai) daug mažesnės nei bandiniams be jų (348,4 W/s ir 16,3 MJ atitinkamai). Be to, ribinės FIGRA vertės natūraliajai medienai pasiekiamos daug greičiau, vidutiniškai per 345 s, o antipirenais apsaugotai medienai – vidutiniškai per 500 s. Dūmų kiekio didėjimo rodiklio SMOGRA vidutinė vertė taip pat natūraliai medienai yra didesnė – lygi 91 $cm^2/s^2$, o medienai su antipirenais – tik 33,5 $cm^2/s^2$.

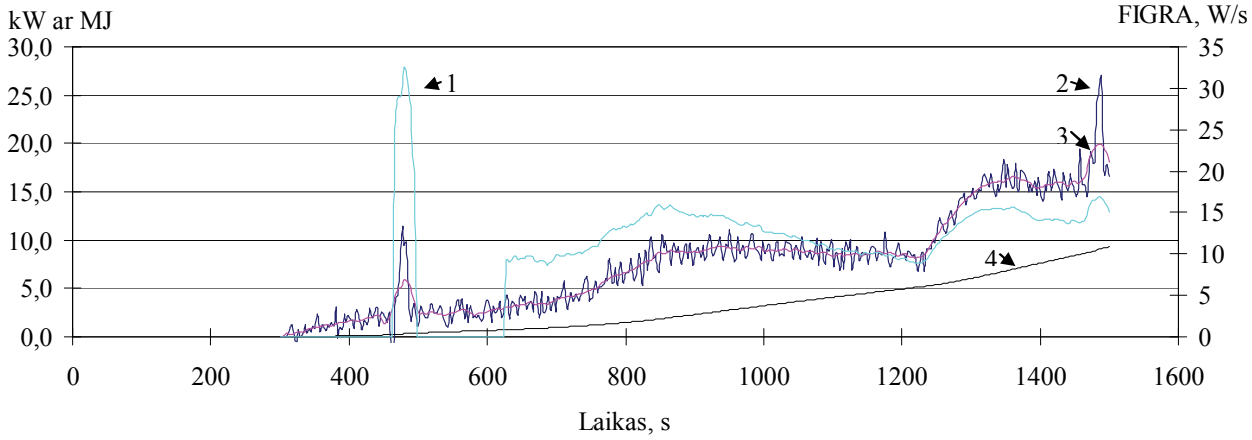
3.10–3.13 pav. pateikti SBI metodu gautų tyrimo rezultatų pasiskirstymo grafikai. Remiantis šiomis priklausomybėmis, kaip jau minėta, įvertinama tiriamosios medžiagos degumo klasė. Iš šių kreivių galime matyti skirtingas medienos apanglėjimo greitį veikiančių kriterijų tendencijas. Šiuo požiūriu išlieka galimybė tirti gaisravietėje išlikusias konstrukcijas, gaunant kriterijų vertes, būdingas tik tam konkrečiam tiriamajam atvejui.



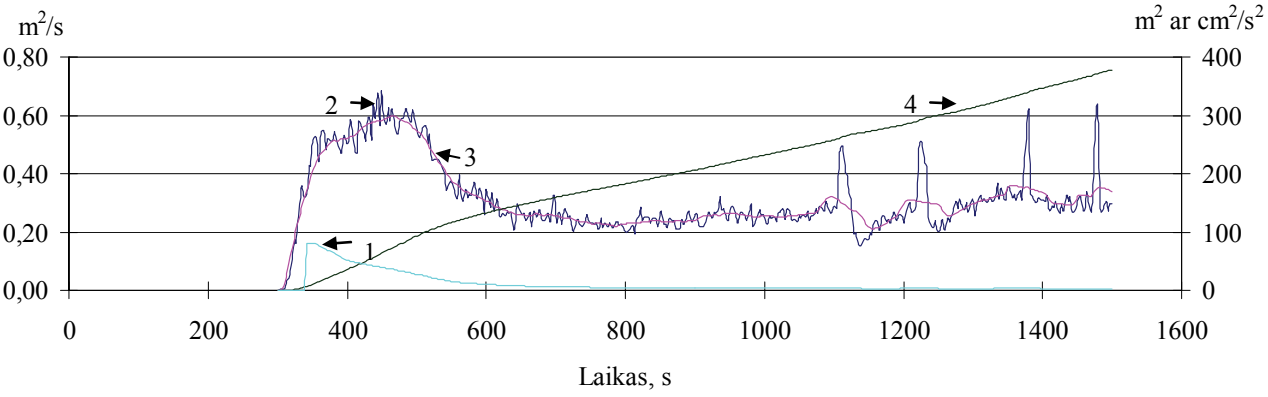

**3.10 pav.** Pušies medienos su apsaugos priemonėmis eksperimentiniai duomenys, išvesti pasinaudojant SBI tyrimo įranga (bandinys Nr.3 3.2 lentelėje): 1 – FIGRA 0,4 MJ, W/s; 2 – $HRR_{av}(t)$, kW; 3 – $HRR_{av}(t)/(t - 300)$, kW; 4 – THR (t), MJ




**3.11 pav.** Pušies medienos be apsaugos priemonių eksperimentiniai duomenys, išvesti pasinaudojant SBI tyrimo įranga (bandinys Nr.9 3.2 lentelėje): 1 – SMOGRA, $cm^2/s^2$; 2 – $SPR_{av}(t)$, $m^2/s$; 3 – $SPR_{av}(t)/(t - 300)$, $m^2/s$; 4 – TSP (t), $m^2$




**3.12 pav.** Uosio medienos su apsaugos priemonėmis eksperimentiniai duomenys, išvesti pasinaudojant SBI tyrimo įranga (bandinys Nr.11 3.2 lentelėje): 1 – FIGRA 0,4 MJ, W/s; 2 – $HRR_{av}(t)$, kW; 3 – $HRR_{av}(t)/(t - 300)$, kW; 4 – THR (t), MJ




**3.13 pav.** Uosio medienos be apsaugos priemonių eksperimentiniai duomenys, išvesti pasinaudojant SBI tyrimo įranga (bandinys Nr.12 3.2 lentelėje): 1 – SMOGRA, $cm^2/s^2$; 2 – $SPR_{av}(t)$, $m^2/s$; 3 – $SPR_{av}(t)/(t–300)$, $m^2/s$; 4 – TSP (t), $m^2$

Palyginę 3.11 ir 3.13 paveikslus, matome, kad dūmų susidarymo greičio vidurkiai skirtingos rūšies medienai skiriasi. Pastebima nežymi tendencija, kad lapuočių medienai toks greičio vidurkis yra žemesnis nei spygliuočių. Minėtieji pastebėjimai yra tik iš kelių bandymų rezultatų, todėl remiantis pateiktais duomenimis kol kas nėra galimybių nustatyti ryškius kokius nors esminius skirtumus tarp spygliuočių ir lapuočių medienos tiek natūraliai medienai, tiek impregnuotai. Tai būtų galima padaryti tik atlikus daugiau bandymų.

Nagrinėjamuoju metodu gauti duomenys leistų ateityje taikyti progresyvųjį gaisrų tyrimą, kurio pagrindą sudarytų įvairių duomenų fiksavimas ne tik po gaisro, kaip yra šiuo metu, bet ir gaisro metu, atvykus pirmosioms ugniagesių komandoms. Šalia ugniagesių pagrindinės funkcijos – užgesinti gaisrą patartina numatyti papildomą funkciją, nereikalaujančią ypatingų gebėjimų, fiksuoti įvykių eigą gaisravietėje skaitmeninėmis fotografavimo ar filmavimo kameromis. Gautą medžiagą, pasinaudojus sukaupta patirtimi, apdorojus (pagal išdegimą, pagal dūmų susidarymą, pagal liepsnos spalvą ir pan.) įmanoma išspręsti daugelį gaisrų tyrimo problemų, tiek atkuriant pagrindinius gaisro kriterijus (gaisro trukmę, išdegimo greitį, apanglėjimo greitį, plitimo kelius, gaisro kilimo vietos suradimą ir pan.), tiek nustatant tikslią gaisro kilimo priežastį. Be to, svarbu paminėti, kad tokia perspektyvi gaisro tyrimo kryptis aktuali įvairios sudėties konstrukcijų pastatams, ne vien tik medinėms konstrukcijoms.

## 3.2. Naujojo gaisro trukmės ir gaisro kilimo vietos nustatymo metodo sukūrimas ir pagrindimas

Kaistant gamtiniams polimerams, tokiems kaip mediena, kurių makromolekulės pirolizės metu susiriša, susiformuoja anglinė liekana. Tokiu atveju mažėja degiosios medžiagos lakiųjų produktų, išsiskiriančių iš medienos, kiekis. Tokiu būdu anglėjantys gamtiniai polimerai (ypač mediena), turi reikalingas atsparumo ugniai savybes. Medienos molekulės net ir normaliomis sąlygomis turi aukštą tarpusavio susirišimo laipsnį ir pirolizės metu jos makromolekulės gali toliau susirišti. Degiųjų medžiagų kai kurias charakteristikas lemia lakiųjų produktų, išsiskiriančių iš tiriamosios medžiagos, savybės. Atsparumas karščiui gali būti išreikštas kiekybiškai įvertinant skilimo greičio priklausomybę nuo temperatūros. Tai gali būti atlikta keliais būdais. Labiausiai paplitęs metodas pagrįstas prielaida, kad pirolizės procesas vyksta remiantis paprasta kinetine schema [31, 94–95]:

$$m^o = \frac{dm}{d\tau} = km, \tag{3.7}$$

čia $m$ – medienos masė, g; $k$ – reakcijos greičio konstanta; $\tau$ – laikas, s; $m^o$ – masės išdegimo greitis, g/s.

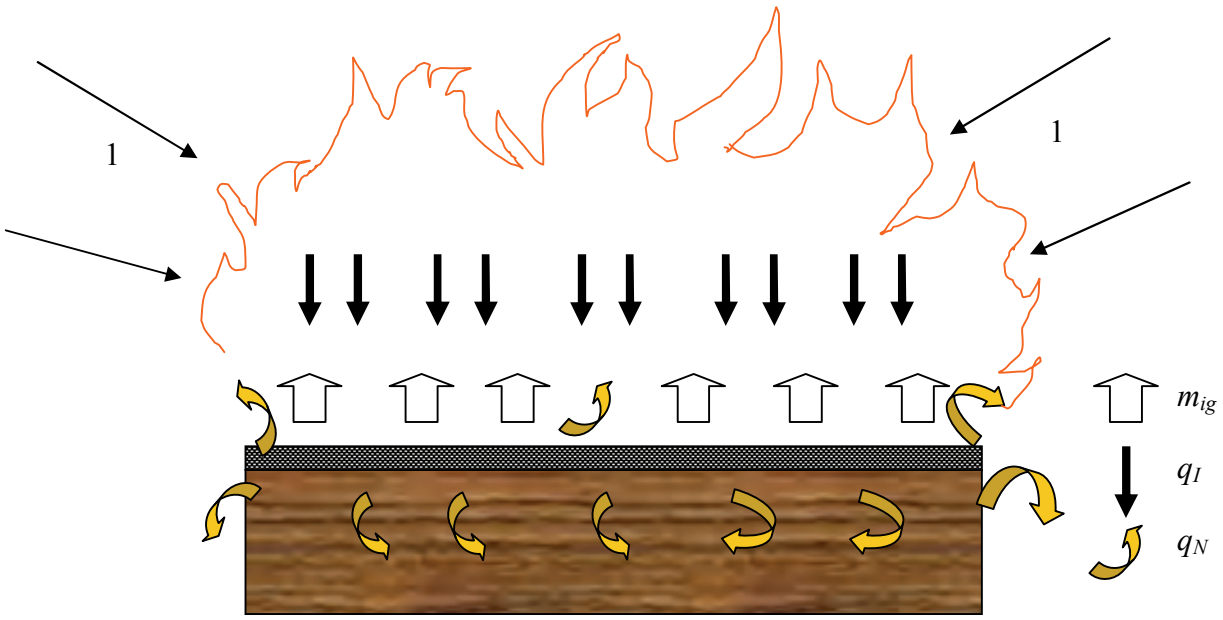
Tokia prielaida supaprastina realų vaizdą, tačiau leidžia nustatyti reakcijos greičio konstantą $k$ tiesioginiu keliu, panaudojant žinomą Arenijaus lygtį.

Degant kietosioms medžiagoms, lakiųjų medžiagų, kurios susiformuoja pirolizės metu degiųjų medžiagų paviršiuje, pritekėjimo į degimo zoną greitis tiesiogiai susijęs su šiluminių mainų intensyvumu tarp liepsnos ir degiosios medžiagos (3.14 pav.). Masės išdegimo greitis $m_{ig}$, g/m$^2$s, bendruoju pavidalu gali būti išreikštas tokiu būdu [15–17, 31, 77]:

$$m_{ig} = \frac{q_I - q_N - q_C}{L}, \tag{3.8}$$

čia $m_{ig}$ – masės išdegimo greitis, kg/m$^2$s; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $q_N$ – šilumos srauto tankio nuostolis dėl spinduliavimo ir konvekcijos, kW/m$^2$; $q_C$ – šilumos srauto tankio nuostolis, sugeriamas anglies sluoksnio, kW/m$^2$; $L$ – šilumos kiekis, reikalingas lakiesiems produktams išgarinti, kJ/g (pirolizės šiluma).

Šilumos srauto tankio nuostoliai $q_C$, sugeriami medienos ar kokio kito polimero anglies sluoksnio, kaip teigiama literatūros šaltinyje [78], yra labai maži bei sunkiai apčiuopiami, palyginti su kitais šilumos nuostoliais, todėl tolesniuose skaičiavimuose šie nuostoliai nėra įvertinami.




**3.14 pav.** Paviršiaus degimo schema, iliustruojanti šilumos ir masės mainų procesus [17, 31]: $m_{ig}$ – masės srautas nuo kūno paviršiaus; $q_I$ – šilumos srautas nuo liepsnos į kūno paviršių; $q_N$ – šilumos nuostoliai (tarp jų ir šilumos srautas, atsispindintis nuo kūno paviršiaus); 1 – oro srautas, patenkantis į degimo zoną

Remiantis 3.7 priklausomybe, nesudėtinga masės išdegimo greitį išreikšti per medžiagos tankį $\rho$, kg/m$^3$ ir jos apanglėjimo greitį $\beta$, mm/min, todėl siūlome pirolizės procesui apibūdinti taikyti tokią išraišką:

$$m_{ig} = \frac{\rho\beta}{60}, \tag{3.9}$$

čia $\beta$ – medienos apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $m_{ig}$ – masės išdegimo greitis, g/m$^2$s.

Sulyginę (3.8) ir (3.9) lygtis, galime apskaičiuoti medienos apanglėjimo greitį, susietą su medienos tankiu, išoriniu šilumos srauto tankiu bei šilumos kiekiu, reikalingu pirolizės produktams susidaryti, pagal tokią priklausomybę:

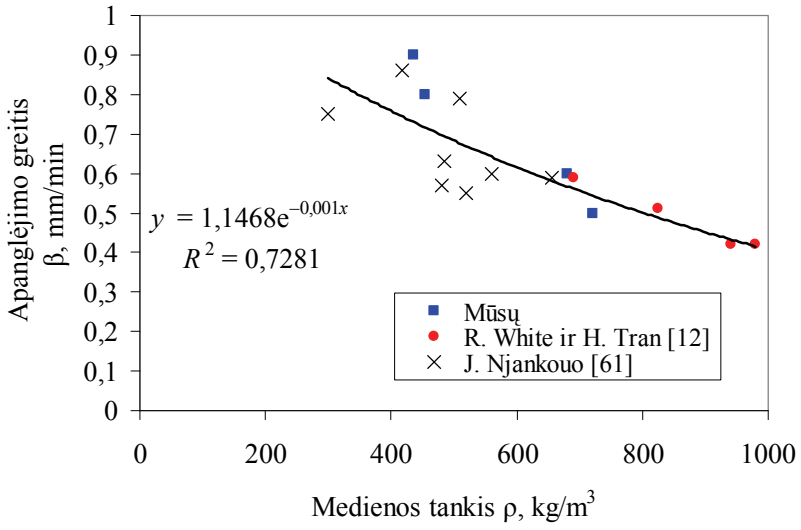
$$\beta = 60 \cdot \frac{q_I - q_N}{\rho L}, \tag{3.10}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $q_N$ – šilumos srauto tankio nuostolis, atspinduliuojamas nuo medžiagos paviršiaus, kW/m$^2$; $L$ – šilumos kiekis, reikalingas lakiesiems produktams išgarinti, kJ/g.

Mūsų pasiūlyta apanglėjimo greičio priklausomybė (3.10), yra pamatinė lygtis taikoma apanglėjimo greičiui apskaičiuoti, ji sudaro visas sąlygas įvertinti mums svarbius ir aktualius kriterijus, darančius įtaką apanglėjimo greičiui, kartu ir visam medienos pirolizės procesui. Belieka tik įvertinti minėtoje išraiškoje esančius charakteristikų dydžius, kad būtų galima lengviau atlikti skaičiavimus.

### 3.2.1. Medienos tankio įtaka

Remiantis mūsų atliktų tyrimų rezultatais, matuojant apanglėjimo greitį skirtingos rūšies medienai (3.4 pav.), taip pat H. C. Trano ir R. H. Whito [12] bei naujausiais J. M. Njankouo [61] tyrimų rezultatais, kuriuose medienos bandinių drėgnis neviršijo 8–10 %, matyti (3.15 pav.), kad medienos tankis yra atvirkščiai proporcingas apanglėjimo greičiui, nors ta priklausomybė nėra tiesinė.




**3.15 pav.** Medienos tankio ir apanglėjimo greičio priklausomybės statistinė analizė, remiantis mūsų, H. C. Trano ir R. H. Whito [12] bei J. M. Njankouo [61] bandymų rezultatais

Tuo įsitikinome atlikę gautų duomenų lyginamąją statistinę analizę, siekdami nustatyti regresijos lygtį, kurios koreliacijos koeficientas būtų didžiausias. Tyrimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

**3.3 lentelė.** 3.15 paveiksle pateiktų tyrimo duomenų regresinė analizė

| Regresijos modelis | Regresijos lygtis | Determinacijos koeficientas $R^2$ | Koreliacijos koeficientas $R$ |
|---|---|---|---|
| Tiesinis | $y = 1{,}0073 - 0{,}0006x$ | 0,6624 | 0,8139 |
| Laipsninis | $y = 29{,}807x^{-0{,}6109}$ | 0,6954 | 0,8339 |
| Logaritminis | $y = 3{,}0039 - 0{,}3736Ln(x)$ | 0,6483 | 0,8052 |
| Eksponentinis | $y = 1{,}146e^{-0{,}001x}$ | 0,7281 | 0,8533 |

Kaip matyti 3.3 lentelėje, gautus tyrimo duomenis geriausiai aprašo eksponentinis regresijos modelis, kurio koreliacijos koeficientas $R$ didžiausias bei lygus 0,8533.

### 3.2.2. Šilumos srauto tankio įvertinimas

Išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai $q_N$ konvekciniu ir radiaciniu būdais gali būti išreikšti per kaitinimo kameros temperatūrą $T_s$ [16–17, 23, 31]:

$$q_N \approx h_s \cdot (T_s - T_a) + \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4, \tag{3.11}$$

čia $q_N$ – išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai, kW/m$^2$; $T_a$ – aplinkos temperatūra (tariamai lygi 20 °C); $h_s$ – konvekcnių šilumos mainų koeficientas, W/Km$^2$; $\varepsilon_s$ – spinduliuojančio kūno paviršiaus efektyvumą nusakantis koeficientas, t. y. kūno juodumo koeficientas; σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, lygi $5{,}67 \cdot 10^{-8}$, W/m$^2$K$^4$.

Du šilumos mainų koeficientai $\varepsilon_s$ ir $h_s$ nėra tiksliai žinomi, kadangi, pvz., $h_s$ dydis priklauso nuo sistemos charakteristikų, kietojo kūno geometrijos, srauto parametrų, temperatūrų skirtumo $\Delta T$. Tipiški konvekcinių šilumos mainų koeficiento dydžiai, esant laisvai konvekcijai, kinta nuo 5 iki 25 W/Km$^2$, o priverstinei konvekcijai ore – nuo 100 iki 500 W/Km$^2$. Pats geriausias spinduliuotojas yra absoliučiai juodas kūnas, kurio spinduliavimo geba lygi vienetui ($\varepsilon_s$ = 1). Remiantis literatūros šaltiniuose [31, 59, 78] aptartais tyrimais, medienai $\varepsilon_s$ vidutiniškai lygi 0,75, o $h_s$ dydis varijuoja nuo 11 W/Km$^2$ iki 15 W/Km$^2$, vidutiniškai 13 W/Km$^2$.

Įrašę (2.3) į (3.11) priklausomybę, įvertinančią šilumos nuostolius, gausime mūsų apskaičiuotą išorinio šilumos srauto tankio nuostolių priklausomybę (3.12), išreikštą per išorinį šilumos srauto tankį (3.16 pav., 2):

$$q_N = 1{,}4694 \cdot q_I^{\,0{,}8229}, \tag{3.12}$$

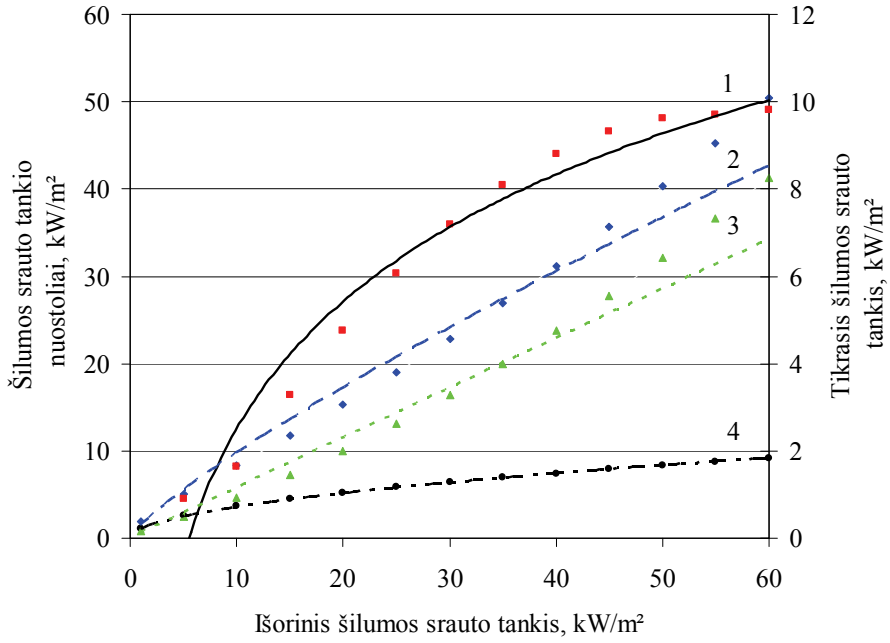
čia $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $q_N$ – išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai, kW/m$^2$.

Apskaičiavę išorinio šilumos srauto tankio nuostolius ir juos atėmę, nesudėtingai apskaičiuosime tikrąją išorinio šilumos srauto tankio vertę pagal (3.13) priklausomybę (3.16 pav., 1):

$$q_T = q_I - q_N = \vartheta \cdot q_I^p = 1{,}234 q_I^{0{,}5012}, \tag{3.13}$$

čia $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $q_N$ – išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai, kW/m$^2$; $q_T$ – tikrasis šilumos srauto tankis, patenkantis ant bandinio paviršiaus, kW/m$^2$; $\vartheta$ – atspindi neapibrėžtus šilumos mainų koeficientus (t. y. atsitiktinę konvekcinių šilumos mainų koeficiento $h_s$ prigimtį); $p$ – laipsnio rodiklis.

Atlikę duomenų (3.16 pav.) regresinę analizę (3.4 lentelė), įsitikinome, kad tikrojo šilumos srauto tankio (3.16 pav. 1) ir išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai (3.16 pav. 2), susieti su išoriniu šilumos srauto tankiu, atitinka laipsninės regresijos modelį. Kaip matyti (3.13) priklausomybėje, parametras $\vartheta$ bei laipsnio rodiklis $p$ atitinkamai lygūs 1,234 bei 0,5 vertėms. Parametras $\vartheta$ atspindi neapibrėžtus šilumos mainų koeficientus (t. y. atsitiktinę konvekcinių šilumos mainų koeficiento $h_s$ prigimtį); taigi $\vartheta$ atitinkamai $h_s$ reikšmėms varijuoja nuo 1,081 kW/m$^2$ (kai $h_s$ = 15 W/Km$^2$) iki 1,387 kW/m$^2$ (kai $h_s$ = 11 W/Km$^2$) vidutiniškai 1,234 kW/m$^2$ (kai $h_s$ = 13 W/Km$^2$). Tokiu būdu parodome galimybę įvertinti skaičiavimuose kitokią $\vartheta$ vertę nei vidutinė.




**3.16 pav.** Išorinio šilumos srauto tankio nuostolių ir tikrojo šilumos srauto tankio, patenkančio ant bandinio paviršiaus, ryšys su išoriniu (nuo kaitinimo kameros) šilumos srauto tankiu standartinio gaisro sąlygomis: 1 – ant bandinio paviršiaus patenkantis tikrasis šilumos srauto tankis, kai $h_s$ = 13 W/Km$^2$; 2 – bendrieji šilumos srauto tankio nuostoliai; 3 – spinduliavimo nuostoliai; 4 – konvenciniai nuostoliai

**3.4 lentelė.** 3.16 paveiksle pateiktų duomenų regresinė analizė

| Nr. | Regresijos modelis | Regresijos lygtis | Determinacijos koeficientas $R^2$ | Koreliacijos koeficientas $R$ |
|---|---|---|---|---|
| 1* | Tiesinis | $y = 0{,}1716x + 1{,}0327$ | 0,9231 | 0,9608 |
| 2** | | $y = 0{,}8105x - 0{,}242$ | 0,9752 | 0,9875 |
| 1 | Laipsninis | $y = 1{,}234x^{0{,}5012}$ | 0,9678 | 0,9838 |
| 2 | | $y = 1{,}4694x^{0{,}8229}$ | 0,9824 | 0,9912 |
| 1 | Logaritminis | $y = 4{,}1782\mathrm{Ln}(x) - 7{,}0744$ | 0,9621 | 0,9809 |
| 2 | | $y = 11{,}555\mathrm{Ln}(x) - 10{,}796$ | 0,7289 | 0,8538 |
| 1 | Eksponentinis | $y = 1{,}6093e^{0{,}0375x}$ | 0,7707 | 0,8779 |
| 2 | | $y = 4{,}3612e^{0{,}0465x}$ | 0,8719 | 0,9338 |

* – tikrasis šilumos srauto tankis, patenkantis ant bandinio paviršiaus, kW/m$^2$; ** – išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai, kW/m$^2$.

Remdamiesi išorinio šilumos srauto tankio nuostolių, matomų (3.12) išraiškoje, įvertinimu bei atlikta analize, galime pasiūlyti labiau supaprastintą apanglėjimo greičio skaičiavimo priklausomybę:

$$\beta = 60 \cdot \frac{\vartheta q_I^{\,0,5}}{\rho L}, \tag{3.14}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $L$ – yra šilumos kiekis, reikalingas lakiesiems produktams išgarinti, kJ/g; $\vartheta$ = 1,234 kW/m$^2$ (kai $h_s$ = 13 W/Km$^2$).

### 3.2.3. Šilumos, reikalingos pirolizės produktams susidaryti, apskaičiavimas

Mūsų pateikiamoje apanglėjimo greičio skaičiavimo išraiškoje (3.14) liko neaptartas vienintelis dydis $L$ (kJ/g). Tai yra šilumos kiekis, reikalingas lakiesiems produktams išgarinti, kJ/g (pirolizės šiluma). Šio dydžio verčių praktiškai nėra galimybių išmatuoti, jos yra tik apskaičiuojamos. Todėl šis dydis skirtingai medienai buvo nustatytas iš kitų mokslininkų atliktos gautų tyrimų duomenų analizės. (1.24) lygtyje matyti, kad pirolizės šilumą sudaro dvi komponentės: šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti $L_v$, kJ/g, bei vandens išgarinimo šiluma $L_w$, kJ/g, kurios vertė yra žinoma ir lygi 2,258 kJ/g [31, 78], be to, įvertinamas medienos drėgnis $w$ (šimtosiomis dalimis nuo 0,01 iki 0,99) pagal (2.1) lygtį, arba pamatuojamas drėgnomačiu (2.2 pav.). Įvertinant pirolizės šilumos nustatymo ypatumus pagal (1.24) lygtį, siūlome naudoti tokią apanglėjimo greičio skaičiavimo priklausomybę standartinio gaisro sąlygomis:

$$\beta = 60 \cdot \frac{\vartheta q_I^{0,5}}{\rho(L_v + L_w \cdot w)}, \tag{3.15}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $L_v$ – šilumos kiekis, reikalingas

visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti, kJ/g; $L_w$ – vandens išgarinimo šiluma, lygi 2,258 kJ/g [31, 78]; $w$ – medienos drėgnis (šimtosiomis dalimis nuo 0,01 iki 0,99).

Kaip minėta literatūros šaltinių analizėje, visiškai tikslių duomenų apie pirolizės šilumą sausai medienai $L_v$ nėra: literatūroje šio parametro vertės svyruoja nuo 1 kJ/g iki 7 kJ/g [31]. Taigi tikslinga šį parametrą apsiskaičiuoti remiantis mūsų naujai išvesta apanglėjimo greičio skaičiavimo priklausomybe (3.15) standartinio gaisro sąlygomis. Kadangi tokiu atveju minėtoje lygtyje šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti $L_v$, nėra tiksliai žinomas, pasinaudojome galimybe šį dydį apskaičiuoti pagal (3.15) priklausomybę, nes visų likusių šioje lygtyje dydžių vertės žinomos prieš atliekant standartinius bandymus (drėgnis, tankis), bandymo metu (šilumos srauto tankį) ir po jo (apanglėjimo greitį). Taigi belieka šilumos kiekį, reikalingą visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti $L_v$, apskaičiuoti pagal tokią lygtį:

$$L_v = 74{,}04\frac{q_I^{0,5}}{\rho\beta} - L_w w\,, \tag{3.16}$$

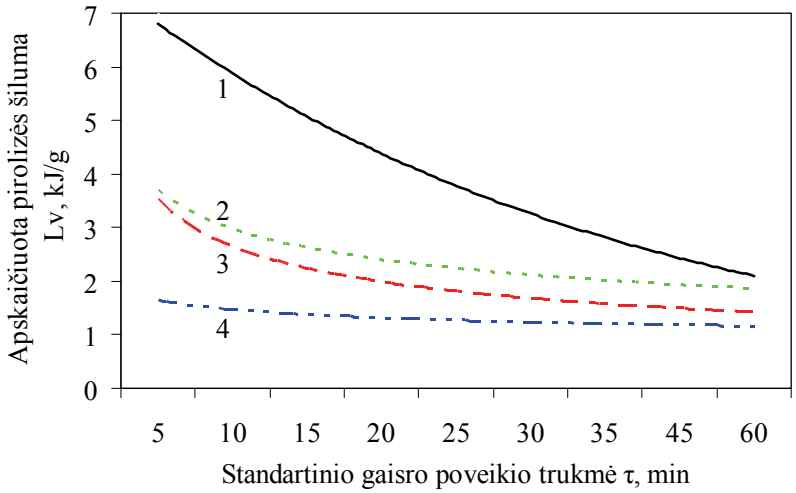
čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $L_v$ – šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti, kJ/g; $L_w$ – vandens išgarinimo šiluma, lygi 2,258 kJ/g [31, 78]; $w$ – medienos drėgnis (šimtosiomis dalimis).

Apskaičiuotos vidutinės skirtingos rūšies medienos su antipirenais ir be jų pirolizės šilumos vertės atitinka M. L. Jenssenso [62] pateiktus duomenis kuomet matyti aiškus $L_v$ vertės kritimas didėjant anglies gyliui, t. y. ilgėjant gaisro poveikiui (3.17 pav.). Tačiau mūsų duomenys nesutampa su M. L. Janssenso duomenimis tuo, kad spygliuočių $L_v$ yra didesnis nei lapuočių. Mūsų apskaičiuotos pirolizės šilumos visiškai sausai medienai $L_v$ vidutinės vertės pateiktos 3.5 lentelėje.

**3.5 lentelė.** Apskaičiuotos vidutinės $L_v$ vertės skirtingos rūšies medienai be ir su antipirenais

| Bandiniai | Tankis $\rho$, kg/m$^3$ | Pirolizės šiluma $L_v$, kJ/g |
|---|---|---|
| Spygliuočių (eglės, pušies) | 435–455 | 1,34 |
| Lapuočių (uosio, ąžuolo) | 680–720 | 2,07 |
| Impregnuotų spygliuočių | 435–455 | 2,47 |
| Impregnuotų lapuočių | 680–720 | 4,11 |

Gauti skaičiavimo rezultatai, be abejo, priklauso nuo skirtingos medienos rūšių cheminės sudėties bei impregnavimo antipirenais įtakos. Žinoma, kad medienos ar celiuliozės suirimo greičiui didelės įtakos turi mineraliniai junginiai, tokie kaip antipirenai, tai ir matyti mūsų atliktuose tyrimuose (3.17 pav., lyginant 1 ir 2 kreives su 3 ir 4 kreivėmis). Maži kaitinimo greičiai ar sąlyginai mažos temperatūros daro įtaką reakcijai, kuriai vykstant formuojasi anglis. Panašiai veikia dauguma apsaugančių nuo ugnies poveikio priedų, paprastai naudojamų medienos atsparumui ugniai padidinti.

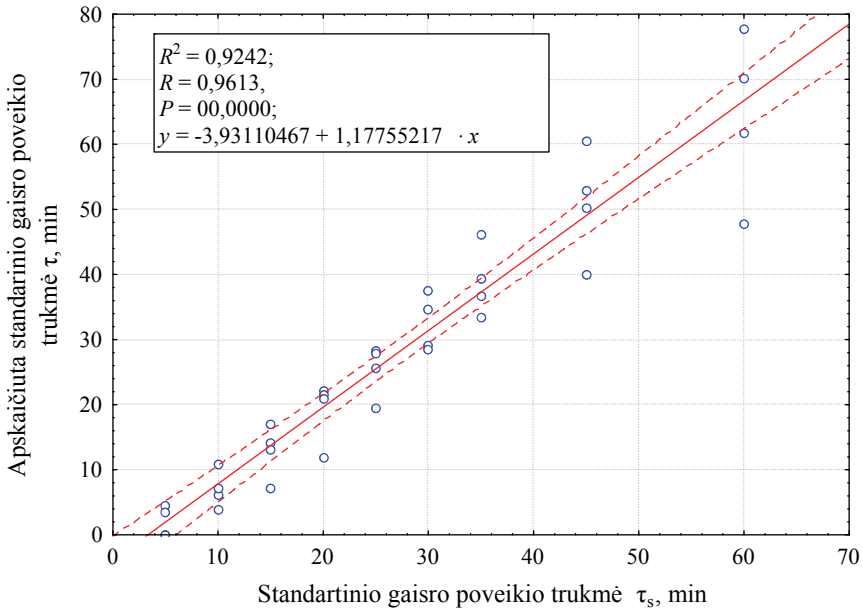



**3.17 pav.** Mūsų apskaičiuoto šilumos kiekio, reikalingo visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti, pokytis standartinio gaisro sąlygomis: 1 – impregnuotai lapuočių medienai; 2 – impregnuotai spygliuočių medienai; 3 – lapuočių medienai; 4 – spygliuočių medienai

Kaip minėta analizuojant literatūros šaltinius, fosfatai ir boratai (druskos) mažina lakiųjų produktų, išsiskiriančių degimo metu, sudegimo šilumą, o tai mažina šilumos kiekį, patenkantį ant medienos paviršiaus nuo uždegimo šaltinio. Todėl reikalingas didesnis šilumos kiekis, būtinas degimui palaikyti, pirolizės produktams išgarinti. Šiluminiam srautui, kuris būtinas lakiųjų produktų išsiskyrimui, bus reikalinga didesnė temperatūra. Vadinasi, atsiras didesni išorinio šilumos srauto tankio nuostoliai – taip patvirtinamas mūsų atliktais skaičiavimais gautų visiškai sausos medienos pirolizės šilumos $L_v$ verčių logiškumas. Kaip matyti iš 3.17 paveikslo, lapuočių medienai tiek be antipirenų, tiek su antipirenais šilumos kiekis, reikalingas pirolizacijai, yra didesnis nei spygliuočių medienai. Tam įtakos turi spygliuočių medienos sakuotumas, kadangi sakuota mediena, lydantis sakams, išskiria itin degias lakiąsias medžiagas. Šių medžiagų degimo šiluma kompensuoja išorinio šilumos srauto nuostolius, taip palengvinamas medienos pirolizacijos procesas. Visų tirtų rūšių medienos pirolizės šiluma nepriklausomai nuo impregnavimo ar natūralumo laipsniškai mažėja, ir tai reiškia, kad storėjant anglies sluoksniui vis mažiau reikia medienos pirolizei reikalingo šilumos kiekio. Toks pirolizacijos proceso aiškinimas lyg ir prieštarauja anksčiau išdėstytiems teiginiams, kadangi anglies sluoksnis turi atlikti apsauginę funkciją, trukdančią pirolizacijai ir todėl reikalaujančiai didesnio šilumos kiekio. Tačiau iš pateiktų duomenų matyti, kad pirolizacijos šiluma, laipsniškai mažėdama, artėja prie pastovaus dydžio, pasiekus pakankamą apsauginį anglies sluoksnio storį. Be to, reikšmingas šiuo atveju yra ir pačios degančios medienos išskiriamas šilumos kiekis, kuris, kaip minėjome, kompensuoja išorinio šilumos srauto nuostolius, ir tuo galima būtų paaiškinti tokias skirtingas priklausomybes. Spygliuočių mediena išskiria didesnį šilumos kiekį (18,7–20,9 kJ/g) nei lapuočiai (18,2–19,9 kJ/g) [97]. Vadinasi, jos pirolizacijai reikės mažesnio šilumos kiekio nuo išorinio uždegimo šaltinio. Pirminėje gaisro stadijoje išskiriamos šilumos kiekis yra nedidelis, vadinasi, šilumos kiekio, reikalingo medienos pirolizei, reikia daug daugiau nei išsiplėtusio degimo stadijoje.

Norėdami įvertinti nustatytos skaičiavimo eigos pagrįstumą ir teisingumą, atlikome standartinio bandymo duomenų ir atliktų skaičiavimų analizę. Atlikę visus tarpinius bei galutinius skaičiavimus nustatėme, kad gauta (3.15) priklausomybė gerai koreliuoja su eksperimentiniais duomenimis standartinio gaisro sąlygomis.

Pateikta apskaičiuotų pagal (3.15) priklausomybę įvairios rūšies medienos ir išbandytų apanglėjimo greičio statistinė analizė (3.18 pav.) parodė, kad skaičiavimo duomenys gerai dera tarpusavyje (koreliacijos koeficientas $R$ = 0,9613) ir atitinka standartinio gaisro trukmės vertes ± 4 min 95 % pasikliovimo ribose. Skaičiuojamųjų duomenų analizė atlikta skirtingos rūšies medienai su apsaugos priemonėmis ir be jų, kai yra parinktos vidutinės pirolizės šilumos vertės kiekvienam bandiniui, nurodytam 3.5 lentelėje, o išorinį šilumos srauto tankį atitinka įrangos šilumos srauto tankis standartinio gaisro sąlygomis (2.9 pav.).




**3.18 pav.** Pagal naują skaičiavimo metodiką apskaičiuoto ir išmatuoto standartinio gaisro poveikio laiko lyginamoji statistinė analizė: — – tiesinės regresinės analizės kreivė; — — – vidutinės apskaičiuojamosios vertės 95 % pasikliautinosios ribos ·

Analizuodami eksperimentinių tyrimų rezultatus, gautus bandant SBI įranga, nustatėme, kad apanglėjimo greičiui turi įtakos visiškai laisvas deguonies pritekėjimas į degimo zoną, tokiu atveju apanglėjimo greitis padidėja 20 %. Dėl to būtina įvesti pataisą ($k_d$ = 1,2), leidžiančią įvertinti laisvąjį oro deguonies pritekėjimą ir nevaržomą konvekciją bandymo sąlygomis nustatant kaitinimo kamerų, atitinkančių ISO 834 sąlygas, eksperimentinius apanglėjimo greičio duomenis bei tokiu būdu apskaičiuojant kitus realaus gaisro parametrus. Tuomet mūsų gauta medienos apanglėjimo greičio priklausomybė (3.15) bus tokia:

$$\beta = 60 \cdot \frac{1{,}234 q_I^{0,5}}{\rho(L_v + L_w \cdot w)} \cdot k_d , \qquad (3.17)$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $L_v$ – šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti, kJ/g; $L_w$ – vandens išgarinimo šiluma lygi 2,258 kJ/g [31, 78]; $w$ – medienos drėgnis šimtosiomis dalimis; $k_d$ – pataisos koeficientas, įvertinantis oro deguonies laisvą pritekėjimą bei nevaržomą konvekciją ($k_d$ = 1,2).

Analizuodami, skaičiuodami bei įvertindami bandymų rezultatus, priėjome prie galutinės mūsų siūlomos apanglėjimo greičio skaičiavimo išraiškos, pagal kurią įvertinami visi mūsų tyrimų pradžioje pasirinkti kriterijai:

– medienos tankis $\rho$, kg/m$^3$;

– išorinis šilumos srauto tankis $q_I$, kW/m$^2$;

– medienos drėgnis $w$ šimtosiomis dalimis;

– šilumos kiekis, reikalingas lakiesiems produktams išgarinti $L_v$, kJ/g;

– oro deguonies laisvą pritekėjimą bei nevaržomą konvekciją apibūdinantis pataisos koeficientas $k_d$ = 1,2, kurio įvertinimas pagrindžiamas, atsižvelgiant į realias gaisro sąlygas.

Būtina atkreipti dėmesį, kokiomis sąlygomis plečiasi gaisras. Jei medienos apanglėjimas vyksta pakankamai uždaroje aplinkoje, tarkime, apmūrytoje medžio rąstų sienoje, akivaizdu, jog minėtojo koeficiento apanglėjimo greičio skaičiavimo išraiškoje nereikėtų įvertinti.

Temperatūros $T$, K, nustatymas pagal (1.1) lygtį, šilumos srauto tankio $q_I$, kW/m$^2$, suradimas pagal (2.4) lygtį, apanglėjimo gylio $H$, mm, apskaičiavimas pagal (1.2) lygtį bei medinės konstrukcijos apanglėjimo greičio $\beta$, mm/min, nustatymas pagal (3.17) priklausomybę yra tik tarpiniai skaičiavimo etapai, siekiant nustatyti gaisro trukmę medinėms konstrukcijoms apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo vietose.

Radę apanglėjimo greitį, turime apskaičiuoti medienos apanglėjimo trukmę $\tau_a$, min, pagal tokią lygtį:

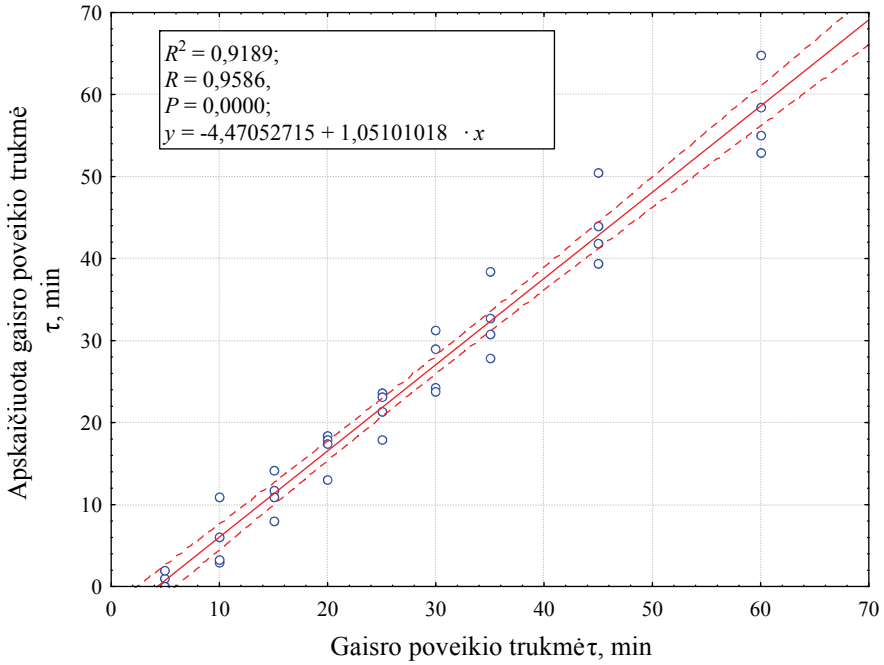
$$\tau_a = \frac{H}{\beta}, \tag{3.18}$$

čia $\tau_a$ – apanglėjimo trukmė, min; $H$ – apanglėjimo gylis, mm; $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min. Toliau skaičiuojame „indukcijos laiką“ $\tau_o$, min, remdamiesi atitinkamai (1.6) arba (3.6) priklausomybėmis, atsižvelgdami į tiriamosios medienos apsaugos priemonių (tokių kaip antipirenai) panaudojimą bei jau nustatytą temperatūros $T$, K, vertę.

Esant būtinybei, turime nepamiršti apskaičiuoti anglies sudegimo trukmės $\tau_{as}$, min, pagal (1.7) lygtį ir galiausiai nustatyti galutinę gaisro poveikio trukmę $\tau$, min, pagal (1.8) priklausomybę. Apskaičiuota gaisro poveikio trukmė leis įvertinti tas vietas gaisravietėje, kuriose gaisro poveikis truks ilgiausiai.

Norėdami įvertinti nustatytos skaičiavimo eigos pagrįstumą ir teisingumą, atlikome SBI bandymo duomenų ir atliktų skaičiavimų analizę. Išmatavę anglies bandinių elektrinę varžą, atlikę visus išvardytus tarpinius bei galutinius skaičiavimus, nustatėme, kad (3.17) priklausomybė taip pat gerai koreliuoja su eksperimentiniais duomenimis maksimaliai realaus gaisro sąlygomis.

Pateikta apskaičiuotų pagal (3.17) priklausomybę įvairios rūšies medienos ir išbandytų SBI metodu apanglėjimo greičio statistinė analizė (3.19 pav.) parodė, kad gauti skaičiavimo duomenys gerai dera tarpusavyje (koreliacijos koeficientas $R = 0{,}9586$).




**3.19 pav.** Pagal naują skaičiavimo metodiką apskaičiuoto ir išmatuoto SBI metodo gaisro poveikio trukmės lyginamoji statistinė analizė: — – tiesinės regresinės analizės kreivė; — — – vidutinės apskaičiuojamosios vertės 95 % pasikliautinosios ribos

Atlikę mūsų sukurtos apanglėjimo greičio ir gaisro poveikio trukmės skaičiavimo metodikos analizę (3.18 pav.) ir palyginę gautus duomenis su standartinio gaisro poveikio trukmės nustatymu senuoju metodu (3.7 pav.), įsitikinome, kad mūsų metodas daug tikslesnis. Vadinasi, gaisro poveikio trukmės apskaičiavimas, atlikus matavimus gaisravietėje, atrinktiems apanglėjusios medienos bandiniams taip pat bus tikslesnis.

Apskaičiavus kiekvieno iš gaisravietės atrinkto apanglėjusios medienos bandinio gaisro trukmę jų atrinkimo vietose, įvertinama, kuriose sudegusio medinio statinio vietose yra ilgiausias gaisro poveikis. Tose vietose, kur telkiasi ilgiausiai gaisro paveikti bandiniai, apibrėžiamos kaip gaisro kilimo vietos zona ar zonos, o kitų bandinių atitinkamos vertės nurodo gaisro plitimo kelius, kuriuose, tolstant nuo gaisro kilimo vietos (židinio), medinių konstrukcijų degimo trukmė mažėja.

Naujojo metodo (3 priedas) praktinę naudą pamatėme, pritaikę jį konkrečioms ikiteisminio tyrimo byloms, kai reikia surasti gaisro kilimo vietą, nustatyti gaisro poveikio trukmę ir įvardyti gaisro kilimo priežastis.

### 3.3. Skyriaus išvados

Specialia vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera standartinio gaisro sąlygomis nustatyta, kad skirtingos rūšies medienos bandiniai apanglėja skirtingu greičiu: spygliuočiai apanglėja vidutiniškai 0,8–0,9 mm/min, lapuočiai bei spygliuočiai su antipirenais – vidutiniškai 0,5–0,6 mm/min, lapuočiai su antipirenais – vidutiniškai 0,3–0,4 mm/min. Tačiau eksperimentiniais tyrimais SBI metodu buvo parodyta, kad tiriamųjų medžiagų apanglėjimo greičiai yra vidutiniškai 20 % didesni, todėl būtina taikyti pataisos koeficientą $k_d$ = 1,2, leidžiantį įvertinti laisvąjį deguonies pritekėjimą ir nevaržomą konvekciją bandymo sąlygoms, atitinkančioms ISO 834.

Tyrimais nustatyta, kad „indukcinis laikas“, t. y. laiko atkarpa, trunkanti iki momento, nuo kurio apanglėjimo į gylį procesas pradeda vykti greičiu, artimu pastoviajam, akivaizdžiai skiriasi tarp medienos be antipirenų ir su antipirenais. Norint įvertinti šį parametrą, reikia taikyti skirtingas tiesines priklausomybes. Skirtumą tarp impregnuotos ir neimpregnuotos medienos rodo nauji mūsų atliktų bandymų rezultatai, gauti taikant SBI bandymo įrangą. Pastebėta, kad gaisro didėjimo spartos rodiklis FIGRA bei suminės šilumos THR (600) vidutinės vertės bandiniams su antipirenais daug mažesnės nei bandiniams be jų. Dūmų kiekio didėjimo rodiklio SMOGRA vidutinė vertė natūraliajai medienai yra daugiau nei perpus didesnė nei medienai su antipirenais.

Taigi, siekiant tiksliau nustatyti temperatūras tam tikrose gaisravietės vietose, svarbu ne tik matuoti elektrinę varžą, įvertinančią anglies struktūrinius skirtumus, susiformavusius skirtingose temperatūrose, bet ir atsižvelgti į medinio elemento ar konstrukcijos storį bei apanglėjimo gylį.

Nustatėme, kad senasis metodas neįvertina daugelio aktualių medienos apanglėjimo greičiui parametrų, tokių kaip medienos drėgnis, šilumos srauto tankis, laisvasis deguonies pritekėjimas į degimo zoną, pirolizacijos šilumos dydis atsižvelgiant į medienos rūšį ar jos impregnavimą antipirenais.

Atsižvelgę į eksperimentinių tyrimų duomenis, pasiūlėme apanglėjimo greičio skaičiavimo lygtį, kurioje yra įvertinti anksčiau išvardyti parametrai.

Apskaičiavome pirolizės šilumos dydžio vertes, kurios skirtingos tiek atitinkamai medienos rūšiai, tiek medienai su antipirenais.

Pritaikius mūsų pasiūlytą apanglėjimo greičio išraišką, gaisro trukmės verčių apskaičiavimas standartinėmis sąlygomis yra daug tikslesnis nei nustatytas senuoju metodu, kadangi koreliacijos tarp apskaičiuotos ir standartinio gaisro trukmės verčių koeficientai atitinkamai lygūs 0,9613 ir 0,7790. Lygindami SBI duomenis ir naujuoju skaičiavimo metodu apskaičiuotas gaisro parametrų vertes, taip pat nustatėme, kad duomenys tarpusavyje gerai dera, koreliacijos koeficientas lygus 0,9586.

Eksperimentiniai tyrimai parodė senojo gaisro kilimo vietos nustatymo metodo patikimumo problemą. Netikslus iki šiolei taikomas metodas sudarė sąlygas klysti nustatant gaisro kilimo vietą.

# 4. NAUJOJO METODO, SKIRTO GAISRO KILIMO VIETAI NUSTATYTI, PRAKTINIO PRITAIKYMO PAVYZDŽIAI

Gaisro kilimo vietos nustatymas, kaip ir daugelis sudėtingų tyrimų, yra skirstomas į keletą svarbių darbo etapų:

1. Įvykio vietos apžiūra ir medinių konstrukcijų apanglėjimo temperatūros, greičio, taip pat degimo trukmei skaičiuoti reikalingų parametrų nustatymas gaisravietėje (bendras vizualus konstrukcijų įvertinimas, apanglėjusios medienos bandinių išėmimas, aprašymas, medinių konstrukcijų galimo drėgnio nustatymas ir kt.).
2. Minėtiesiems gaisro veiksniams apskaičiuoti reikalingų parametrų nustatymas laboratorijoje (paimto gaisravietėje apanglėjusios medienos bandinio elektrinės varžos matavimas).
3. Duomenų, surinktų įvykio vietos apžiūros metu bei nustatytų laboratorinio tyrimo metu, apdorojimas skaičiavimo formulėmis.
4. Tyrimo rezultatų vertinimas ir įforminimas.

Siekiant galutinio tikslo, skaičiavimo procesas taip pat dalijamas į keletą etapų:

1. Visų pirma apskaičiuojama gaisro poveikio temperatūra bandinio atrinkimo vietoje.
2. Toliau, remiantis nustatytomis priklausomybėmis, nustatomas šilumos srauto tankis bei pirolizės šiluma.
3. Apskaičiuojamas tiriamosios medinės konstrukcijos apanglėjimo greitis.
4. Galiausiai apskaičiuojamos apanglėjimo trukmė, o prireikus ir kitos tarpinės gaisro trukmės („indukcinis periodas“ bei anglies sudegimo trukmė), kurias susumavus nustatoma galutinė gaisro (degimo) trukmės vertė.

Vertinant gautus tyrimo rezultatus, atsižvelgiama į tas apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo vietas, kuriose gaisro (degimo) trukmė ilgiausia, taip apibrėžiamos gaisro kilimo vietos zonos.

Atsižvelgdami į šiuos darbo proceso ir skaičiavimo etapus, atlikime naujuoju metodu tikrų, anksčiau senuoju metodu tirtų gaisraviečių tyrimą. Archyvuose buvo rasti 2 aktualūs pavyzdžiai, padėsiantys atskleisti naujojo ir senojo metodų taikymo subtilybes.

## 4.1. Pirmasis pavyzdys

Gaisras kilo 2003-06-05 sodo name, Vilniuje. Pagal 2003-06-05 aktą dėl kilusio gaisro Nr.53/1008, pranešimas apie gaisrą priešgaisrinei gelbėjimo tarnybai gautas 2003-06-05 14 val. 00 min. Pirmasis ugniagesių padalinys atvyko 2003-06-05 14 val. 05 min. Gaisras lokalizuotas 2003-06-05 16 val. 49 min. Gaisras užgesintas 2003-06-05 18 val. 44 min. Gaisro tyrimo metu nustatyta, kad degė pastato medinių (ąžuolinių) rąstų sienos, kurios vietomis buvo apšiltintos akmens vata, ant kurios uždėta vėjo izoliacinė plėvelė, toliau nuo 1 iki 10 cm oro tarpas ir galiausiai – skaldytų plytų mūras. Taip pat

nustatyta, kad pastato palėpėje degė medinės stogo konstrukcijos – gegnės (patikrinus statybos dokumentaciją ir apklausus šeimininką, nustatyta, kad jos buvo impregnuotos antipirenu „BAK 1“). Nors pagal seną tyrimo metodiką medienos drėgnio nustatyti nereikėjo, tačiau jau tuo metu kai kuriems tyrimo atvejams įdomumo dėlei buvo atlikti medinių konstrukcijų drėgnio verčių matavimai gretimuose pastatuose, kad būtų galima prognozuoti medienos drėgnį gaisro kilimo dieną. Nustatyta, kad pastatų medinių konstrukcijų drėgnis tiek viduje, tiek išorėje gana panašus, svyruoja nuo 8 iki 15 %, vidutiniškai 12 % (tai lėmė palankios klimato sąlygos – oras gaisro kilimo dieną ir anksčiau buvo sausas, saulėtas). Gaisro tyrimo metu paaiškėjo, kad 2003-06-05 anksti rytą (nuo 5 iki 10 val.) vienos iš statybos bendrovių darbininkai, naudodami dujinį degiklį, pradėjo garažo, sutapdinto su gyvenamuoju namu, plokščiojo stogo dengimo ritinine danga darbus (garažo stogas ir antrojo aukšto grindys yra vienoje altitudėje). Kad būtų galima patvirtinti arba paneigti gaisro kilimo priežastį dėl darbininkų neatsargumo vykdant ugnies darbus buvo svarbu nustatyti tikslią gaisro kilimo vietą ir gaisro trukmę.

Vizualiai gaisro kilimo vietos nustatyti nebuvo galimybių. Todėl tam tikslui iš apdegusių medinių konstrukcijų reikėjo paimti apanglėjusios medienos bandinius ir aprašyti pirminius tyrimui reikalingus parametrus: pradinį konstrukcijos storį $h$, mm, kuris anglies gylio matavimo kryptimi gegnių buvo lygus 60 mm, o sienų rąstų – 160 mm, bei metaline liniuote išmatuotą anglies gylį $h_a$, mm, kurio vertės svyravo nuo 3 iki 30 mm. Iš gaisro zonos vietų buvo surenkama kiek galima daugiau apanglėjusios medienos bandinių, kad būtų galima sudaryti išsamesnį vaizdą apie gaisro plitimą. Ypatingas dėmesys buvo atkreiptas į atrinkimo vietose esantį anglies sluoksnį, kuris buvo nepažeistas ir nesutrūkinėjęs, o medinių konstrukcijų liekanos buvo išlikusios vietose. Bandinių atrinkimo vietas susiejome su statinio planu-schema (4 priedas), taip pat pateikėme papildomą informaciją apie bandinio atrinkimo vietą: aukštį nuo grindų, atstumus nuo sienų ar kitų statinio konstrukcinių elementų, atsižvelgiant į orientaciją pagal pasaulio kryptis. Visi užfiksuoti gaisravietėje parametrai buvo surašyti 4.1 lentelėje.

**4.1 lentelė.** Apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo lentelė

| Bandinio Nr. | Atrinkimo vieta | Pirminis konstrukcijos storis $h$, mm | Nudegusios konstrukcijos storis $h_n$, mm | Anglies gylis $h_a$, mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | A | 60 | – | 15 |
| 2 | A | 60 | – | 8 |
| 3 | A | 60 | – | 20 |
| 4 | A | 60 | – | 17 |
| 5 | A | 60 | – | 10 |
| 6 | A | 60 | – | 8 |
| 7 | A | 60 | – | 5 |
| 8 | A | 60 | – | 3 |
| 9 | B | 160 | – | 25 |
| 10 | A | 60 | – | 3 |
| 11 | B | 160 | – | 30 |
| 12 | B | 160 | – | 22 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| 13 | B | 160 | – | 23 |
| 14 | B | 160 | – | 17 |
| 15 | B | 160 | – | 18 |
| 16 | B | 160 | – | 10 |
| 17 | B | 160 | – | 15 |
| 18 | B | 160 | – | 5 |
| 19 | B | 160 | – | 20 |

Pastaba: A – Nr.1–8 ir Nr.10 iš sodo namo gegnių, esančių mansardoje šiaurinėje namo dalyje, apie 2 m aukštyje nuo grindų; B – Nr.9 ir Nr.11–19 iš sodo namo medinių sienos rąstų išorinės pusės, atitinkami apie 0,2 ir 0,5 m aukštyje nuo grindų ir žemės.

Įvykio vietos apžiūros metu bei iš vėliau gautos dokumentacijos bei apklausos duomenų buvo nustatyta: sudegusio pastato medinių konstrukcijų medienos rūšis, apsaugos priemonių panaudojimas bei galimas medinės konstrukcijos drėgnis $w$ gaisro kilimo dieną (be abejonės, svarbu atkreipti dėmesį į skirtingą drėgnį patalpos viduje ir išorėje, šalia esantiems nepažeistiems gaisro bei gesinimo pastatams šio parametro vertes nesudėtinga nustatyti drėgnomačiu (2.2 pav.)). Nustatę medienos rūšį naudodamiesi žinynais [95] galime sužinoti jų tankį $\rho$, kg/m$^3$, taip pat pagal 3.5 lentelę ir 3.17 paveikslą nustatyti šilumos kiekio, reikalingo visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti, vertes $L_v$ (kJ/g). Po šio tyrimo gauti duomenys surašomi 4.2 lentelėje.

**4.2 lentelė.** Medinę konstrukciją apibūdinantys parametrai, svarbūs naujajai skaičiavimo metodikai

| Bandinio Nr. | Medienos rūšis ir tankis $\rho$, kg/m$^3$ | Drėgnis $w$, šimt. dalimis | Pirolizės šiluma $L_v$, kJ/g | Aps. priemonių naudojimas |
|---|---|---|---|---|
| 1–8 ir 10 | Pušies (455) | 0,12 | 2,47 | Taip (BAK 1) |
| 9 ir 11–19 | Ąžuolo (720) | 0,12 | 2,07 | Ne |

Gaisravietėje išmatavę visus dydžius, paėmėme apanglėjusios medienos bandinius. Prieš paimant numatytoje vietoje bandinį, nuo apanglėjusios medinės konstrukcijos šepetėliu buvo nuvalytos šiukšlės. Peiliu ar skalpeliu nupjautas viršutinis 3–5 mm gylio anglies sluoksnis. Anglies kiekis buvo ne mažesnis kaip 1 g. Surinkti apanglėjusios medienos bandiniai buvo sudėti į atskiras dėžutes, užrašyti bandinių numeriai, paėmimo vietos pagal planą ir 4.1 lentelės eilės numeris. Atrinkti apanglėjusios medienos bandiniai laboratorijoje buvo išlaikyti džiovinimo kameroje iki pastoviosios masės, o vėliau išmatuota jų elektrinė varža $R$, Ω, kaip tai nurodyta 2.4 skyriuje. Matavimo rezultatai bvo fiksuojami specialiame matavimo žurnale. Pagal nustatytą (2.4 poskyris) varžos matavimo metodiką anglies stulpelio aukštis turi būti išmatuojamas arba iš anksto nustatomas reikalingas (GTC laboratorijoje šiuo atveju nustatytas 0,7 cm). Tarkime pirmajam bandiniui išmatuota 0,7 cm aukščio anglies stulpelio varža $R$, Ω, verčiama į savitąją varžą $R_s$, Ω·cm, tokiu būdu:

$$R_{s1} = R \cdot 0{,}7 = 1000 \cdot 0{,}7 = 700 \ \ \Omega\cdot\text{cm}. \tag{4.1}$$

Toliau apskaičiuojamas gautos savitosios varžos dešimtainis logaritmas $P$:

$$P_1 = \lg R_{s1} = \lg 700 = 2{,}845\,. \tag{4.2}$$

Išmatavome ir apskaičiavome vieną iš parametrų, naudojamų temperatūros nustatymo lygtyje (1.1) kiekvieno bandinio atrinkimo vietoje. Remiantis išmatuotais parametrais *h, $h_a$, $h_n$*, mm, apskaičiuojami kiti reikalingi lygties duomenys (*H* – apanglėjimo gylis, mm, ir *B* – koeficientas, įvertinantis pradinį medinės konstrukcijos storį). Apanglėjimo gylis *H*, mm, apskaičiuojamas taip:

$$H_1 = h_a + h_n = 15 + 0 = 15\,\text{mm}. \tag{4.3}$$

Koeficientas, įvertinantis pradinį medinės konstrukcijos storį, nustatomas pagal tokią priklausomybę:

$$B_1 = \frac{\sqrt{h}}{6} = \frac{\sqrt{60}}{6} = 1{,}291\,. \tag{4.4}$$

Apskaičiavę tarpinius parametrus, galime suskaičiuoti gaisro poveikio temperatūrą *T*, K, bandinio atrinkimo vietoje pagal lygtį:

$$T_1 = \frac{4540}{\ln\frac{B_1 \cdot H_1 \cdot P_1}{10 - P_1} + 2{,}15} = \frac{4540}{\ln\frac{1{,}291 \cdot 15 \cdot 2{,}845}{10 - 2{,}845}} = 1083\,\text{K}. \tag{4.5}$$

Kad būtų galima nustatyti šilumos srauto tankio vertę, reikalingą apanglėjimo greičiui $\beta$, mm/min, skaičiuoti, reikia gautą temperatūrą *T*, K, paversti į temperatūrą $T_s$, °C, pagal visiems gerai žinomą tarpusavio priklausomybę:

$$T_{s1} = T_1 - 273 = 1083 - 273 = 810\,^{\circ}\text{C}. \tag{4.6}$$

Apskaičiavome, kad 1-ojo bandinio atrinkimo vietoje medinę konstrukciją (šiuo atveju gegnę) veikė apytiksliai 810 °C temperatūra, o tai atitinka šilumos srauto tankį $q_I$, kW/m$^2$, apskaičiuojamą pagal priklausomybę:

$$q_{I1} = \left(\frac{T_{s1}}{99{,}6}\right)^{2{,}07} = \left(\frac{810}{99{,}6}\right)^{2{,}07} = 76{,}6\,\text{kW/m}^2. \tag{4.7}$$

Nustatę šilumos srauto tankį ir žinodami anksčiau nustatytus parametrus: drėgnį *w* (šiuo atveju 0,12), medienos tankį $\rho$, kg/m$^3$ – 1-ojo bandinio atrinkimo vietoje atitinka 455 kg/m$^3$, pirolizės šilumą $L_v$ = 2,47 kJ/g (spygliuočiui su antipirenais), nekintamąją vandens išgarinimo šilumą $L_w$ = 2,3 kJ/g, galime apskaičiuoti, koks buvo tiriamosios medinės konstrukcijos apanglėjimo greitis pagal tokią priklausomybę 1-ojo bandinio atrinkimo vietoje:

$$\beta_1 = 60 \cdot \frac{1{,}234 \cdot q_{I1}^{0,5}}{\rho_1 (L_{v1} + L_{w1} \cdot w_1)} \cdot k_d = 60 \cdot \frac{1{,}234 \cdot 76{,}6^{0,5}}{455 \cdot (2{,}47 + 2{,}3 \cdot 0{,}12)} \cdot 1{,}2 = 0{,}62 \text{ mm/min.} \quad (4.8)$$

Skaičiuojant medinių konstrukcijų apanglėjimo greitį, svarbu atsižvelgti į degančių konstrukcijų padėtį. Šiuo atveju visiškai aišku, kad mansardoje oro pritekėjimas yra pakankamas, todėl nekyla abejonių dėl koeficiento, įvertinančio laisvąjį deguonies pritekėjimą ir nevaržomą konvekciją degimo zonoje, dydžio $k_d$ = 1,2, kuris taikytinas bandiniams, pažymėtiems Nr. 1–8 ir 10. Tačiau bandiniai, paimti iš sienos rąstų Nr. 9 ir 11–19 degė visiškai uždaroje aplinkoje, kurioje nebuvo laisvos oro apykaitos, todėl koeficientas geriausiu atveju turi būti sumažintas iki 1. Tokiu būdu apanglėjimo greitis, tarkime 11-oje vietoje turėtų būti skaičiuojamas taip:

$$\beta_{11} = 60 \cdot \frac{1{,}234 \cdot q_{I11}^{0,5}}{\rho_{11} (L_{v11} + L_{w11} \cdot w_{11})} \cdot k_d = 60 \cdot \frac{1{,}234 \cdot 28^{0,5}}{720 \cdot (2{,}07 + 2{,}3 \cdot 0{,}12)} \cdot 1 = 0{,}23 \text{ mm/min.} \quad (4.8\text{ a})$$

Taip belieka apskaičiuoti medinės konstrukcijos apanglėjimo trukmę $\tau_a$, min, kuri 1-ojo bandinio atrinkimo vietoje atitiks gaisro trukmę $\tau$, min, kadangi šioje vietoje nėra „indukcinio laiko“ $\tau_o$ ($T$ = 1083 K > 900 K) bei anglies sudegimo trukmės $\tau_{as}$ (nėra šioje vietoje suanglėjimo per visą konstrukcijos storį ir nudegusios anglies sluoksnio). Bandiniui Nr.11 šiuo atveju būtina įvertinti galimą „indukcinį“ poveikį $\tau_o$ medienai, kadangi apskaičiuota temperatūra (T = 770 K < 900 K), taip pat įvertinti, kad toje vietoje mediena nėra impregnuota antipirenais. Taigi „indukcinis laikas“ (4.9), apanglėjimo trukmė (4.10 ir 4.10 a) ir gaisro trukmė (4.11 ir 4.11 a) apskaičiuojami taip:

$$\tau_{o11} = 77 - 0{,}086 \cdot T^{-1} = 77 - 0{,}086 \cdot 770^{-1} = 11 \text{ min}; \quad (4.9)$$

$$\tau_{a1} = \frac{H_1}{\beta_1} = \frac{15}{0{,}62} = 24 \text{ min}; \quad (4.10)$$

$$\tau_{a11} = \frac{H_{11}}{\beta_{11}} = \frac{30}{0{,}23} = 129 \text{ min}; \quad (4.10\text{ a})$$

$$\tau_1 = \tau_{b1} + \tau_{as1} = (\tau_{a1} + \tau_{o1}) + \tau_{as1} = (24 + 0) + 0 = 24 \text{ min}; \quad (4.11)$$

$$\tau_{11} = \tau_{b11} + \tau_{as11} = (\tau_{a11} + \tau_{o11}) + \tau_{as11} = (129 + 11) + 0 = 140 \text{ min}. \quad (4.11\text{ a})$$

Būtina atlikti atitinkamus matavimo ir skaičiavimo veiksmus kiekvienam atrinktam apanglėjusios medienos bandiniui ir surašyti gautus tarpinius ir galutinius skaičiavimo rezultatus į tyrimo rezultatų lentelę (5 priedas), kurią reikia išanalizuoti, ir pateikti tyrimo išvadas.

Kaip matyti, atlikus tyrimus išryškėja 2 viena šalia kitos esančios apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo vietos, pažymėtos Nr.11 ir 12, kuriose degimo trukmė ilgiausia, atitinkamai 140 ir 114 min

(t. y. apie 2,5 val.) (5 priedas). Tolstant nuo šių vietų, medinių konstrukcijų degimo laikas tolygiai mažėja. Taigi nustatyta gaisro kilimo vieta (pastato šiaurės rytiniame kampe, išorinėje pusėje, apatinėje dalyje) sutapo su vieta, šalia kurios statybos bendrovės darbuotojai atliko ugnies darbus. Matyt, užteko tik vieno neatsargaus judesio su atviru ugnies fakelu šalia ventiliacinės angos mūrinėje sienoje ir sienos oro tarpe esančios dulkės ar kitos degiosios medžiagos užsidegė. Tai vėliau galėjo lemti sienos medžio rąstų užsidegimą ir ugnies išplitimą į stogo konstrukcijas. Įvertinant šias užsidegimo aplinkybes ir gaisro plėtimosi sąlygas uždaroje erdvėje (sienoje), kurioje oro pritekėjimas yra ribotas, akivaizdu, kad degimo procesas užtruko pakankamai ilgai iki buvo pastebėtas. Nuo darbų pabaigos 10 val. iki gaisro pastebėjimo 14 val. praėjo 4 val., gaisro trukmė apskaičiuota naujuoju metodu siekia apie 2,5 val. Įvertinant galimybę įvesti deguonies nepriteklių, mažinant koeficientą $k_d$ iki 1, akivaizdu kad yra galimybė pasiekti realias gaisro plėtimosi sąlygas, ko deja, negalima pasakyti atlikus tyrimą senuoju metodu (6 priedas).

Analizuojant žinomu metodu gautus duomenis, aiškiai matyti, kad apskaičiuota gaisro trukmė, kuri siekia vos 1,5 val., yra gerokai trumpesnė, nors gaisro kilimo vieta nurodyta teisingai. Tačiau daugiau senasis metodas nepalieka jokių galimybių įvertinti realias gaisro sąlygas, siekiant gauti tikslesnę įrodomąją galią teisme, norint įvardyti pažeidėjus ir galimus patirtų nuostolių atlygintojus.

### 4.2. Antrasis pavyzdys

Siekiant paryškinti mūsų sukurto naujojo skaičiavimo metodo efektyvumą, šį kartą, peržiūrėjus archyvinę medžiagą, buvo pasirinktas tragiškas įvykis, kai gaisro metu žuvo du žmonės. Antrasis pavyzdys parodys, kaip svarbu turėti tikslesnius tyrimo duomenis, nes, tiriant gaisrą skirtingais metodais, nesutampa gaisro kilimo vieta ir priežastys.

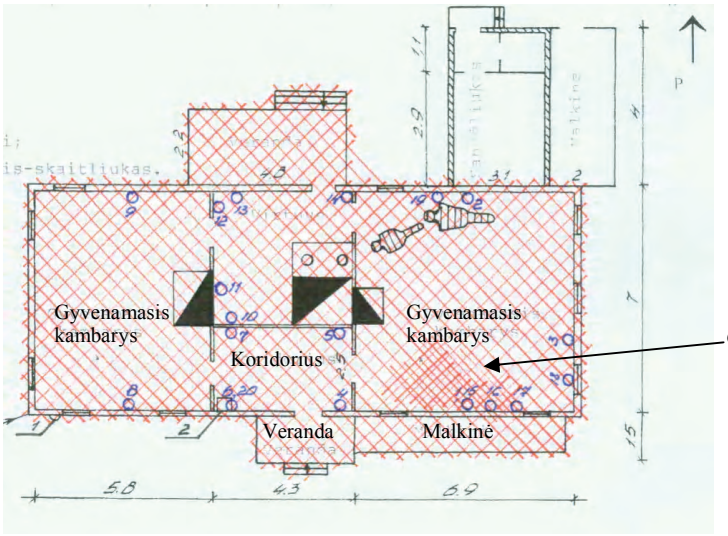
Nagrinėjamas gaisras kilo 2002-06-16 gyvenamajame name Dainavos kaime, Vydenių seniūnijoje, Varėnos rajone. Pagal 2002-06-16 aktą dėl kilusio gaisro Nr.187, gaisras pastebėtas 01 val. 16 min. Pranešimas apie gaisrą priešgaisrinei gelbėjimo tarnybai gautas 2002-06-16 01 val. 18 min. Pirmasis ugniagesių padalinys atvyko 01 val. 30 min. Šio ugniagesių padalinio atvykimo į gaisrą metu gyvenamasis namas degė atvira liepsna, stogas buvo įgriuvęs.

Gaisro metu sudegė pastato stogas, perdenginys, lentinės grindys, išdegė patalpų vidus, sunaikintas viduje buvęs turtas. Gyvenamajame kambaryje ant grindų, ties durimis, vienas šalia kito, rasti stipriai apdegę namo šeimininkų lavonai. Prie gyvenamojo namo pristatytos 2 verandos, malkinė ir sandėlis. Gyvenamojo namo sienos – spygliuočių medienos rąstai iš išorės apkaltos medinėmis dailylentėmis, išskyrus koridoriaus išorines sienas iš ąžuolinių rąstų su masyviomis ąžuolinėmis įėjimo durimis, ši išorinės sienos dalis buvo neapdailinta. Perdenginys – medinės sijos. Lentinės lubos pastogėje apšildytos molio ir spalių-šiaudų mišiniu. Stogą laikančiosios konstrukcijos taip pat medinės, stogo

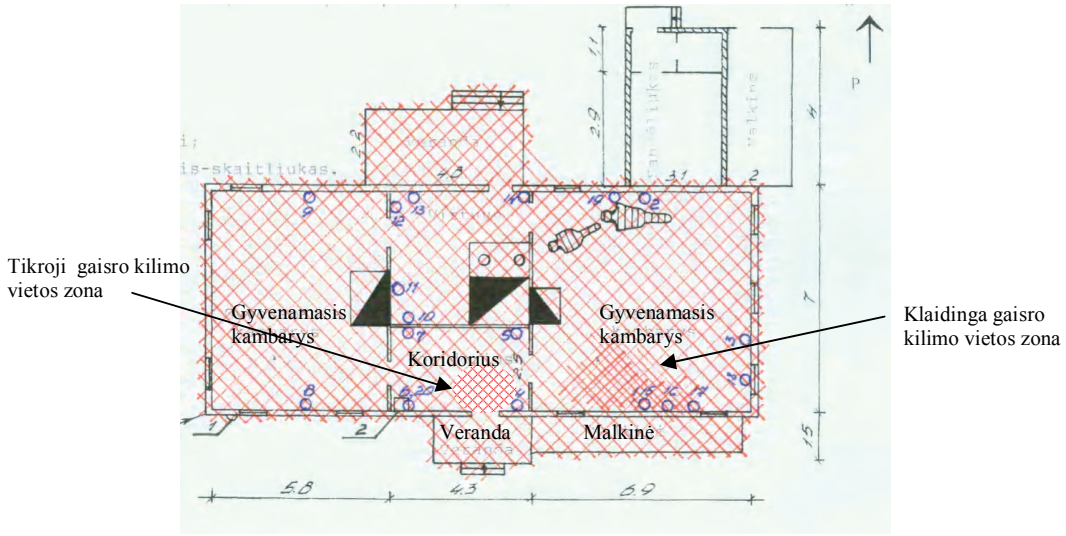
danga – asbestcemenčio lakštai. Medinių lentų grindys prikaltos prie medinių gulekšnių, uždėtų ant akmenų.

Šiam įvykiui ištirti buvo pradėtas ikiteisminis tyrimas. Atlikę įvykio vietos apžiūrą ir apklausę žmones, tyrėjai teigia, kad gaisras kilo pastato pietinėje dalyje, kurioje pastato konstrukcijas gaisras suniokojo labiausiai, apie tai jiems pranešė ir žuvusiųjų kaimynė, gyvenanti priešais, kitoje gatvės pusėje. Ši moteriškė liudytojo apklausos protokole teigia, kad „...apie 1 val. viduryje nakties pabudau dėl triukšmo. Priėjau prie lango pažiūrėti. Tuoj pat pamačiau, kad dega priešais mus kitoje kelio pusėje esantis kaimynų namas. Veranda ir malkinė jau degė atvira liepsna. Pažadinau vyrą ir puoliau skambinti gaisrinei ...“. Kadangi pastato medinės konstrukcijos pietinėje dalyje apanglėjo panašiai, tyrėjams iškilo keblumų tiksliai nustatyti gaisro kilimo vietą. Todėl, pasitelkdami apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo metodiką [98], jie aprašė apanglėjusias medines konstrukcijas, išmatavo reikalingų skaičiavimams pirminių parametrų vertes ir sužymėjo bandinių atrinkimo vietas statinio plane (7 priedas ir 4.1 pav.). Atsiuntę visą surinktą dokumentaciją ir atrinktus apanglėjusios medienos mėginius (20 vnt.) Gaisrinių tyrimų centrui, tyrėjai prašė nurodyti tikslią gaisro kilimo vietą. Minėtąja procedūrų seka atlikęs kiekvieno apanglėjusios medienos bandinio varžos matavimus ir senuoju metodu apskaičiavęs degimo trukmę (8 priedas), Gaisrinių tyrimų centras pateikė išvadą, kad gaisras kilo gyvenamojo kambario pietinėje dalyje, kadangi šioje vietoje telkėsi ilgiausią degimo trukmę rodę apanglėjusios medienos bandiniai, pažymėti Nr.1, 15–17 numeriais (4.1 pav.). Taigi gaisro tyrėjai, pasitelkę GTC išvadą, konstatavo, kad gaisras kilo šeimininkų gyvenamajame kambaryje netoli kušetės, ir įvardijo šiuo atveju įtikinamiausią gaisro kilimo priežastį – neatsargų rūkymą.

Gaisro kilimo vietos nustatymui naudodami naujai sukurtą metodą, prieš tai įvertinome nežinomų dydžių vertes. Mes šiuo atveju pritaikėme vėliau nustatytas medienos drėgnio vertes, atitinkančias sausą klimatą – 0,12. Taip pat pagal 3.5 lentelės duomenis pušies rąstams degimo šiluma, reikalinga pirolizės procesui, lygi 1,34 kJ/g, ąžuolo rąstams – 2,07 kJ/g. Atlikę skaičiavimus nustatėme, kad galutiniai duomenys yra visiškai kitokie (9 priedas). Tokiu atveju paaiškėjo, kad gautos didžiausios gaisro trukmės vertės yra visai ne gyvenamajame kambaryje, o koridoriaus patalpoje, prie lauko sienos, šalia įėjimo durų, apanglėjusios medienos mėginių paėmimo vietose, pažymėtose Nr.4 ir 20 (4.2 pav.). Išryškėja kitokie nei prieš tai nustatyti degimo patalpos viduje plitimo keliai. Matyti aiškios pagrindinės gaisro plitimo kryptys, iš kurių svarbiausioji nukreipta gyvenamojo kambario rytų pusės link. Be abejonės, šiuo atveju lemiamą įtaką turėjo senuoju metodu neįvertintos koridoriaus prieigose esančių ąžuolo rąstų lėtesnio apanglėjimo greičio vertės, palyginti su likusioje statinio dalyje esančių pušies rąstų vertėmis.




**4.1 pav.** Sudegusiame gyvenamajame name gaisro kilimo pradžios zona, nustatyta senuoju metodu




**4.2 pav.** Sudegusiame gyvenamajame name tikroji gaisro kilimo vietos zona, nustatyta mūsų sukurtu naujuoju metodu

Atsižvelgdami į nustatytas vertes galime teigti, kad ikiteisminio tyrimo pareigūnai (tyrėjai) buvo neatleistinai suklaidinti, kadangi tokie gaisrai, kurių kilimo vieta yra šalia įėjimo durų, verandos ar koridoriaus prieigose, dažniausiai patvirtina nusikalstamos veikos įtaką gaisro kilimo priežasties įvardijimui. Todėl tikėtina, kad nusikalstamą veiką padarę asmenys liko nesurasti ir nenubausti už nusikaltimą, kurio pėdsakus bandyta paslėpti ugnimi.

## 4.3. Skyriaus išvados

Šie būdingi atvejai (pavyzdžiai) parodo didelius naujojo metodo privalumus ir naudą. Pirmuoju atveju nukentėjusysis įgautų daug svaresnius argumentus civilinio proceso byloje dėl teisingo žalos atlyginimo. Kaip matyti, gaisro trukmė, nustatyta naujuoju metodu, pailgėjo 1 val. Tai labai stiprus argumentas, kadangi teisminio nagrinėjimo atveju svarbus net kelių minučių skirtumas.

Pirmuoju atveju yra tik tam tikrų laiko nuokrypių, tačiau dėl gaisro kilimo vietos ir gaisro kilimo priežasties abejonių nėra. Antrasis atvejis yra visiškai kitoks. Naujuoju metodu apskaičiavę pirminius gaisravietėje nustatytus parametrus, aiškiai nustatėme, kad galutinis prognozavimo rezultatas yra visiškai priešingas, iš esmės viską keičiantis ikiteisminio tyrimo procesą. Ankstesnėje atliktoje ekspertizėje buvo nurodoma visiškai kita gaisro kilimo vietos zona. Tai užkirto kelią teisingai tyrimo eigai ir išaiškinti galimą nusikaltimą.

Pateikti pavyzdžiai rodo, kad senojo metodo negebėjimas atkurti realias gaisro kilimo sąlygas sudaro galimybes klysti tiek apskaičiuojant gaisro trukmę, tiek nustatant gaisro kilimo vietą.

Be abejonės, vertinant gautą gaisro trukmę, reikia atsižvelgti, kad tai tik orientaciniai duomenys, jokiu būdu nenurodantys tikslių duomenų dėl skaičiavimuose taikomų vidutinių parametrų verčių ir dėl negalėjimo visiškai tiksliai įvertinti gaisro dinaminio pobūdžio ir proceso sudėtingumo. Taip pat vertinant gautus skaičiavimo rezultatus tiek senuoju, tiek naujuoju metodu, svarbu atkreipti dėmesį į galimas gaisro apkrovas, kurios gali sudaryti antrinius gaisro kilimo vietos požymius, kai kada net ryškesnius už pirminę gaisro kilimo vietą (pvz., užsidegus talpoms su lengvai užsiliepsnojančiais skysčiais ar sprogus degiųjų dujų balionui). Kad tyrėjas aptiktų ir įvertintų minėtuosius veiksnius, be abejonės, reikalinga pakankama jo kompetencija.

Taigi išanalizavus šiuos pavyzdžius išryškėja didelė naujojo metodo praktinė vertė. Jo taikymas padėtų nepagrįstai nukentėjusiems ir neteisingai apkaltintiems žmonėms, galbūt pakeistų jų likimus, be to, užtikrintų objektyvumą ir palengvintų ikiteisminio tyrimo pareigūnų, ekspertų ir teisėjų darbą.

## 5. ATLIKTŲ TYRIMŲ PALYGINIMAS SU KITŲ MOKSLININKŲ DARBAIS

Mūsų pasirinkta tyrimų sritis, be abejonės, yra aktuali tik tai visuomenės daliai, kuri susiduria su gaisrais, gaisrų nuostoliais, ikiteisminiu tyrimu, nusikalstamumo išaiškinimu ir pan. Specialistų grupė, besidominanti šia tema, yra dar mažesnė. Be to, kaip teko išgirsti viename tarptautiniame seminare Švedijoje, Revingės mieste 2005 m. birželio mėn. minėti specialistai retai publikuoja savo tyrimus populiariuose moksliniuose žurnaluose ar leidiniuose, apsiribodami tyrimų ataskaitų paruošimu savo laboratorijose ar įstaigose metodikų lygmenyje ir dažnai tik sava kalba. Tokia padėtis, be abejo, sunkina keitimąsi tyrimų duomenimis, be to, tampa sunku sekti gaisrų tyrimo metodikų raidos tendencijas.

Pastaruoju metu mokslinėje literatūroje labiausiai reiškiasi mokslininkai, tyrinėjantys tokias pačias problemas, kokias nagrinėjame ir mes, tačiau jie yra pasirinkę kitą problemos sprendimo kryptį, o būtent kompiuterinės analizės, naudojant kompiuterinių programų paketus [44–45]. Minėtieji kompiuterinių programų paketai taikomi gaisrams tirti, gaisro kilimo priežastims ieškoti, gaisro plitimo keliams nustatyti ar ginti atliktos gaisrų ekspertizės išvadas teisme. Teorinius gaisro plėtimosi parametrų apskaičiavimo matematinius modelius intensyviai kuria M. L. Janssensas [37], M. J. Sperpointas [99] ir J. A. Hietaniemis [100]. Pastarasis, taip pat kaip ir mes, stengėsi įvertinti tokių kriterijų, kaip medienos drėgnis ir tankis, įtaką medienos apanglėjimo greičiui (5.1) priklausomybė, tačiau jis neįvertino kitų svarbių kriterijų, tokių kaip šilumos srauto tankis ar pirolizės šiluma, įtakos. Savo tyrimuose jis neatliko jokių eksperimentinių tyrimų, naudojo tik kitų mokslininkų gautus duomenis ir apdorojo juos savo kuriama kompiuterine modeliavimo programa – tikimybiniu gaisro imituokliu (*Probabalistic Fire Simulator* (PFS)). J. A. Hietaniemis [100] nustatė tokią apanglėjimo greičio priklausomybę:

$$\beta = 60000 \frac{C \cdot h}{(\rho + \rho_o)(A + B \cdot w)}, \tag{5.1}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $w$ – drėgnis (šimtosiomis dalimis); $C$, $h$, $\rho_o$, $A$ ir $B$ mokslininko nustatytos vidutinės koeficientų vertės, atitinkamai lygios 3,93, 3,8, 465, 800 ir 2490.

J. A. Hietaniemio išvesta apanglėjimo greičio priklausomybė (5.1) gana tiksliai atitinka skirtingos rūšies medienos apanglėjimo greičio vertes, kokias gavome ir mes standartinio gaisro sąlygomis, įvedę pataisos koeficientą ($k_d$ = 1,2) pagal (3.17) priklausomybę. Mūsų skaičiavimais, 20 min pušies apanglėjimo greitis lygus 1 mm/min, o apskaičiuotasis pagal (5.1) lygtį = 0,93 mm/min. Tačiau ši lygtis neturi galimybės įvertinti apanglėjimo greičio žemose temperatūrose, kai vyksta medienos

smilkimas, arba įvertinti medienos apsaugos antipirenais. Mūsų pasiūlyta apanglėjimo greičio priklausomybė šiuos aspektus įvertina.

M. L. Janssenso [37] pateikiamas medienos pirolizės matematinis modelis išreiškiamas per šiluminio balanso (energijos tvermės) dėsnį (1.9) ir (1.10). Metodas galioja esant žemiau išvardytoms sąlygoms:

– medienos savybės tiriamosios, kai $T \leq 200\ ^{o}C$;

– anglies savybės tiriamosios, kai $T \geq 800\ ^{o}C$;

– masės svorio vidurkiai skaičiuojami, kai $200\ ^{o}C < T < 800\ ^{o}C$;

– vanduo išgaruoja, kai $T = 100\ ^{o}C$;

– pirolizės šiluma prilyginama 0;

– yra įvertinamas anglies susiformavimo veiksnys;

– pateikta lygtis yra apskaičiuota sprendžiant diferencialinę lygtį.

Kaip matome, šis modelis taip pat nėra idealus, kadangi pirolizės šiluma $L_v$, kJ/g, visiškai neįvertinama, ji, beje, turi lemiamos įtakos medienos degimui, ypač jei mediena apsaugota antipirenais, kaip mes ir nustatėme, atlikę savo tyrimus bei skaičiavimus. M. L. Janssensas, pateikdamas medienos matematinį modelį [37], pats neįvertino savo ankstesnių tyrimų rezultatų, o būtent pirolizės šilumos visiškai sausai medienai $L_v$, kJ/g [62]. M. L. Jenssensas [62] savo laboratorinių tyrimų kūginiu kalorimetru duomenis išanalizavęs integralinio šilumos laidumo modeliu parodė, kad visiškai sausos medienos pirolizės šiluma nėra konstanta, bet kinta priklausomai nuo storėjančio anglies sluoksnio. Kaip pavyzdį jis pateikė vienos iš tiriamosios medienos rūšių (uosio) duomenis, kai pirminė pirolizės šiluma buvo lygi 3 kJ/g, vėliau lėtai nukrito iki 1 kJ/g. Autorius pateikė tiriamųjų medienos rūšių nustatytas pirolizės šilumos vertes 5.1 lentelėje, kurioje galime išskirti, kad spygliuočiams $L_v$ vidutiniškai lygi 3,2 kJ/g, o lapuočiams 2,6 kJ/g, su viena išimtimi, $L_v$ Duglo eglei, t. y. spygliuočiui su dideliu dervų (sakų) kiekiu, lygi 2,64 kJ/g.

**5.1 lentelė.** Vidutinės $L_v$ vertės skirtingai medienai, pagal M. L. Jenssensą [62]

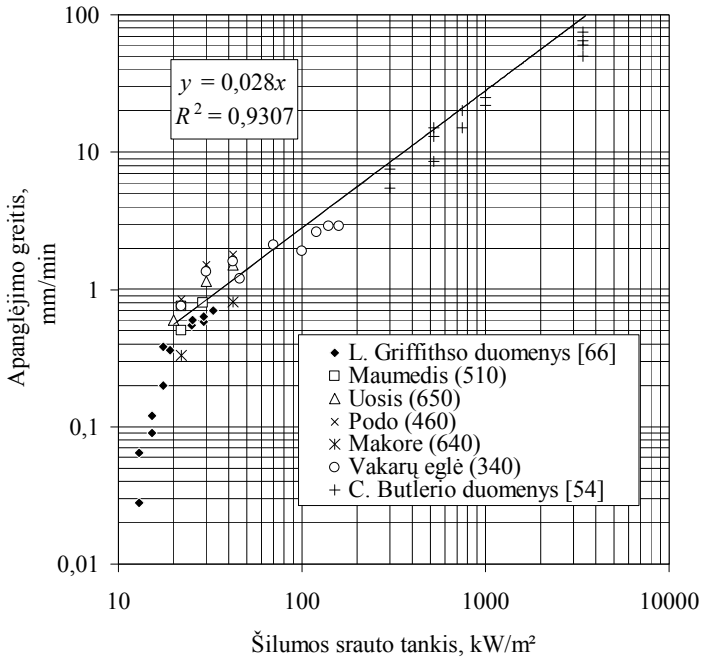
| Tiriamoji mediena | $L_v$, kJ/g |
|---|---|
| Vakarinis raudonasis kedras | 3,27 |
| Sekvoja | 3,14 |
| Pušis | 3,22 |
| Duglo eglė | 2,64 |
| Viktoriano uosis | 2,57 |
| Blackbutt‘as | 2,54 |

Mūsų apskaičiuotos vidutinės skirtingos rūšies medienos su antipirenais ir be jų pirolizės šilumos vertės (3.5 lentelė) atitinka M. L. Jenssenso [62] pateiktus duomenis tuo požiūriu, kad matyti aiškus $L_v$ vertės mažėjimas didėjant anglies gyliui, t. y. ilgėjant gaisro poveikiui (3.18 pav.). Tačiau mūsų duomenys prieštarauja tuo, kad spygliuočių pirolizės šiluma $L_v$ yra didesnė nei lapuočių.

Anglėjančių medžiagų pirolizacijos ypatumus nagrinėjo S. Nurbakhshas [101], tačiau tik teoriniame lygmenyje, iškeldamas pirolizės šilumos skaičiavimo problemą, nepasiūlydamas aiškaus šios problemos sprendimo būdo.

Matyti, kad didžioji dalis mokslininkų, nagrinėjantys gaisro plėtimosi problemas teoriniame lygmenyje, dirba Vakarų Europoje ir JAV. Tai suprantama, kadangi toks problemų sprendimo būdas reikalauja didelių finansinių išteklių, tiek naudojant galingas skaičiavimo mašinas, tiek kuriant bei taikant brangias kompiuterinio modeliavimo programas. Be abejo, tokia gaisro parametrų prognozavimo kryptis yra perspektyvi ir praktikoje bus plačiai taikoma, ypač tuomet, kai bus išspręstos visos tokių metodų taikymo problemos. Tačiau mūsų pasirinkti tyrimai nukreipti kita, ne mažiau svarbia ir problemiška supaprastinto inžinerinio metodo, naudojamo gaisro trukmės ir gaisro kilimo vietos prognozei, tobulinimo, t. y. tikslumo didinimo, linkme. Tokio instrumentinio metodo aktualumas dar labiau išryškėja, pristačius jo pritaikymo galimybes minėtame tarptautiniame seminare, kuriame buvo kilęs didelis susidomėjimas tokiais tyrimais, ypač Vakarų šalių specialistų.

Mokslininkai, nagrinėję medinių konstrukcijų apanglėjimo greičio tyrimus, ieškodami jam įtaką darančių kriterijų, dažniausiai neturėjo tikslo nustatyti gaisro kilimo vietos, ypač po gaisro. Jų medinių konstrukcijų degumo tyrimų objektas buvo galimos gaisro trukmės nustatymas priešgaisrinio saugumo požiūriu, įvertinant medinės konstrukcijos atsparumą ugniai. Todėl, atsižvelgiant į anksčiau minėtas aplinkybes, būtina apžvelgti mūsų temai aktualius senesniuose – iki 2002 m. išleistuose literatūros šaltiniuse skelbiamus duomenis. Visų pirma atlikome P. H. Thomo [67] pateiktų apanglėjimo greičio verčių (5.1 pav.), reguliuojant šilumos srauto tankį, duomenų regresinę analizę, atitinkančią jo pateiktą priklausomybę (1.21).




**5.1 pav.** Rezultatai, gauti naudojant infraraudonųjų spindulių lempas ar dujinius skydus. Duomenys pateikti pagal medienos rūšis, kartu su dydžiais skliausteliuose, nurodančiais tankį, kg/m$^3$, pagal P. H. Thomą [67]; tiesinės regresijos lygtis apima šilumos srauto tankio vertes nuo 20 kW/m$^2$

5.1 pav. duomenis atitinkantis mažiausiųjų kvadratų metodu nustatytas tiesinės regresijos lygties (1.21) koreliacijos koeficientas $R = 0{,}9647$, o determinacijos koeficinentas $R^2 = 0{,}9307$.

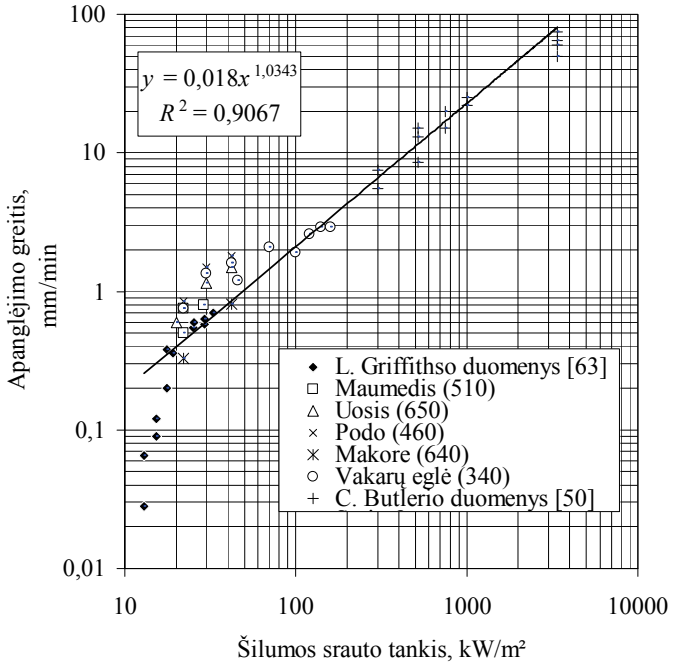
Nustatėme, kad pateikta lygtis (1.21) nėra visiškai tiksli, kadangi joje neįtraukti apanglėjimo greičio duomenys, esant šilumos srauto tankio vertėms nuo 10 iki 20 kW/m$^2$, t. y. neįvertinamas vienas iš svarbiausių gaisro trukmės prognozavimo požiūriu veiksnių – pirminis gaisro plėtimosi laikotarpis.

Atlikę visų šaltinyje [67] pateiktų duomenų regresinę analizę (5.2 pav.), gavome praktiškesnę ir visus pateiktus duomenis atspindinčią tokios išraiškos empirinę lygtį:

$$\beta = 0{,}018\ q_I^{1{,}0343}, \tag{5.2}$$

čia $\beta$ – apanglėjimo greitis, mm/min; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, kW/m$^2$.

Šios lygties koreliacijos koeficientas $R$ =0,9522 , o determinacijos koeficinentas $R^2 = 0{,}9067$. Kaip matyti, šiuo atveju geriausią duomenų koreliaciją atspindi laipsninės regresijos lygtis.




**5.2 pav.** Visų P. H. Thomo [67] pateiktų duomenų regresinė analizė. Duomenys pateikti pagal medienos rūšis, kartu su dydžiais skliausteliuose, nurodančiais tankį, kg/m$^3$

Palyginę (1.21) ir (5.2) lygtis matome, kad skiriasi ne tik koeficientai 0,028 bei 0,018 atitinkamai, bet ir šių lygčių laipsnių rodikliai. Taigi jau literatūros analizės metu suformavome kritinį požiūrį į literatūroje pateikiamus duomenis, o tai ir paskatino patiems imtis medienos apanglėjimo greičio verčių nustatymo laboratoriniais tyrimais standartinio gaisro sąlygomis.

Vokietijos mokslininkas M. Lache atlikęs tyrimus pastebėjo, kad apanglėjimo greičiai skirtingomis medienos augimo atžvilgiu kryptimis iš esmės buvo identiški. Naudojant mažų matmenų specialią vienpusio konstrukcijų kaitinimo įrangą (2.2 poskyris), mūsų atlikti skirtingos rūšies medienos tyrimai, veikiant bandinius išilgai medienos augimo krypčiai, parodė, kad medienos apanglėjimui turi įtakos jos

anizotropiškumas. Tai matyti iš 5.3 pav. pateiktų pavyzdžių. Tyrimais buvo nustatyta, kad spygliuočių medienos vidutinis apanglėjimo greitis jos augimo kryptimi yra 1,2 mm/min, o lapuočių medienos – 0,8 mm/min. Naudotų medienos bandinių drėgnis $w$ neviršijo 15 %. Tad aiškiai matyti, kad išilgai medienos augimo krypčiai apanglėjimo greičio vertės didėja. Taigi mūsų ir M. Lache [55] gauti tyrimo rezultatai skiriasi iš esmės.

Nepaisant to, kad gauti eksperimentiniai tyrimai netaikomi mūsų išvestoje apanglėjimo greičio išraiškoje (3.17), šie duomenys suteikia galimybę papildomai įvertinti nestandartinius medinių konstrukcijų sudegimo atvejus ir tai yra labai svarbu bendrosioms gaisro tyrimo išvadoms.

a)  b)  c) 

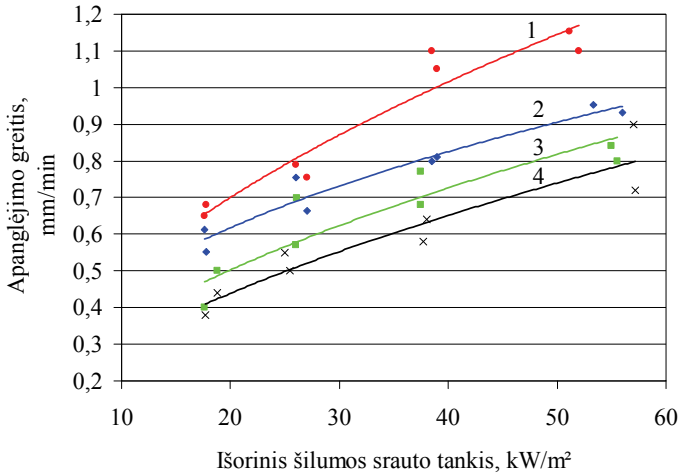
**5.3 pav.** Pušies apanglėjimo tyrimai standartinio gaisro sąlygomis: a) ir b) atitinkamai statmenai ir išilgai medienos augimo krypčiai po 15 min; c) išilgai medienos augimo krypčiai po 30 min.

Apanglėjimo greičio vertės skirtingos rūšies medienai yra pateiktos ir *Eurocode* 5 [26]. Jos, kaip nustatėme, nedaug tesisiskiria nuo mūsų gautų apanglėjimo greičio verčių standartinio gaisro sąlygomis. Šiame šaltinyje standartizuotai pateikiama apanglėjimo gylio kaita per laiką, kai $t_{ch} = t_f$, o apanglėjimo gylis laiku $t_a$ yra ne mažesnis kaip 25 mm. $t_{ch}$ – laikas iki elemento apanglėjimo pradžios; $t_f$ – laikas iki apsaugos nuo ugnies medžiagos destrukcijos pradžios.

Šiuo požiūriu minėtasis standartas bendrą gaisro trukmę padeda įvertinti atsižvelgiant į laiko atkarpą iki suirs medinės konstrukcijos apsauga, kuri gali būti įvairi: gipskartonis, akmens vatos sluoksnis ar plokštė, pritaikant šiame standarte pasiūlytas priklausomybes.

Šia linkme, nagrinėjant apsaugotos įvairiomis dangomis medienos apanglėjimą, iki naujos *Eurocode* 5 versijos sukūrimo 2004 m., intensyviai dirbo B. A. L. Ostmanas su kolegomis [102]. To mes savo tyrimuose nenagrinėjome, todėl atliekant medinės konstrukcijos, apsaugotos kokiomis nors dangomis, buvimo gaisro aplinkoje trukmės skaičiavimą būtina atkreipti į tai dėmesį. Tačiau minėtasis standartas nenurodo, kokiomis normomis reikia vadovautis, jei medinė konstrukcija yra apsaugota antipirenais, jei šilumos srauto tankis nedidelis, jei medienos drėgnis yra didelis arba, atvirkščiai, mažas, tai šiuo atveju mums savo tyrimuose pavyko įvertinti.

Norėdami įvertinti apanglėjimo greičio vertes pastovaus šiluminio srauto tankio sąlygomis, atlikome R. H. Whito ir H. C. Trano [13] pateiktų duomenų (5.4 pav.) regresinę analizę (5.2 lentelė).




**5.4 pav.** R. H. Whito ir H. C. Trano [13] tyrimo duomenų statistinė analizė siekiant nustatyti skirtingos rūšies medienos apanglėjimo greičio ir išorinio šilumos srauto tankio ryšį panaudojant stipriausią koreliaciją atitinkančią laipsninę regresijos lygtį: 1 – sekvojos; 2 – liepos; 3 – pušies; 4 – ąžuolo

Paaiškėjo, kad šių autorių gauti eksperimentiniai apanglėjimo greičio duomenys ne tik atitinka laipsninį regresijos modelį, bet ir visų medienos rūšių gautas lygties laipsnio rodiklio $p$ vidurkis yra panašus į mūsų nustatytoje (3.15) priklausomybėje ir lygus 0,5. Vadinasi, medienos apanglėjimo greičio skaičiavimo išraiškoje išorinio šilumos srauto tankio vertė būtinai turi būti sumažinta. Be to, kaip matyti 5.4 pav., gautos priklausomybės rodo aiškią medienos tankio įtaką apanglėjimo greičiui pastovaus šilumos srauto sąlygomis, kada apanglėjimo greičio vertės sistemingai mažėja.

**5.2 lentelė.** 5.4 pav. pateiktų tyrimo duomenų regresinė analizė

| Nr. | Regresijos modelis | Regresijos lygtis | Determinacijos koeficientas $R^2$ | Koreliacijos koeficientas $R$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Tiesinis | $y = 0{,}0147x + 0{,}4153$ | 0,9085 | 0,9532 |
| 2 | | $y = 0{,}0094x + 0{,}4381$ | 0,9304 | 0,9646 |
| 3 | | $y = 0{,}0092x + 0{,}3412$ | 0,7920 | 0,8899 |
| 4 | | $y = 0{,}0098x + 0{,}2485$ | 0,8782 | 0,9371 |
| 1 | Laipsninis | $y = 0{,}1406x^{0{,}5362}$ | 0,9368 | 0,9679 |
| 2 | | $y = 0{,}1774x^{0{,}4167}$ | 0,9317 | 0,9652 |
| 3 | | $y = 0{,}1025x^{0{,}5309}$ | 0,8303 | 0,9112 |
| 4 | | $y = 0{,}0797x^{0{,}5697}$ | 0,9067 | 0,9522 |
| 1 | Logaritminis | $y = 0{,}4717\mathrm{Ln}(x) - 0{,}7119$ | 0,9281 | 0,9634 |
| 2 | | $y = 0{,}31\mathrm{Ln}(x) - 0{,}3104$ | 0,9314 | 0,9651 |
| 3 | | $y = 0{,}3256\mathrm{Ln}(x) - 0{,}4656$ | 0,8676 | 0,9315 |
| 4 | | $y = 0{,}3368\mathrm{Ln}(x) - 0{,}5743$ | 0,8702 | 0,9328 |
| 1 | Eksponentinis | $y = 0{,}5081e^{0{,}0166x}$ | 0,9043 | 0,9509 |
| 2 | | $y = 0{,}4876e^{0{,}0124x}$ | 0,9011 | 0,9493 |
| 3 | | $y = 0{,}3849e^{0{,}0148x}$ | 0,7354 | 0,8576 |
| 4 | | $y = 0{,}3239e^{0{,}0163x}$ | 0,8803 | 0,9382 |

Tad įsitikinome mūsų gautų apanglėjimo grečio skaičiavimo priklausomybių (3.15) ir (3.17) pagrįstumu.

Be abejonės, naujasis gaisro kilimo vietos nustatymas pagal medinių konstrukcijų apanglėjimą yra reikalingas ir svarbus šiandienos gaisrų tyrimui. Gauti prognozės rezultatai leistų tiksliau įvardyti tiek gaisro kilimo vietą, tiek jo priežastį, be to, sumažėtų klaidų tikimybė.

## 6. GALUTINĖS IŠVADOS

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą, susijusią su gaisro kilimo, plitimo bei tyrimo problematika, nustatyta, kad nepakanka įvertinti apanglėjimo greitį, gaisro temperatūros ir trukmės poveikį, norint po gaisro nustatyti gaisro kilimo vietą ir priežastį (-is). Sprendžiant gaisro tyrimo užduotis ir problemas, turimais instrumentiniais-vizualiaisiais metodais negalima gauti tikslių ir patikimų rezultatų.

2. Naudojantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, gautais vienpuse konstrukcijų kaitinimo kamera bandant natūraliosios skirtingos rūšies medienos (eglės, pušies, uosio, ąžuolo) ir medienos, impregnuotos antipirenais „BAK1“ ir „FLAMASEP“, bandinius, įvertintas senojo gaisro kilimo vietos nustatymo metodo nepakankamas tikslumas ir patikimumas (koreliacijos koeficientas $R = 0,7790$). Be to, nustatyta, kad medienai su antipirenais ir be jų turi būti taikytinos skirtingos „indukcinio laiko“ skaičiavimo priklausomybės, o šilumos kiekį, būtiną visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti, reikia apskaičiuoti. Atlikus skaičiavimus, nustatytos tokios vidutinės šio parametro vertės: spygliuočiams – 1,34 kJ/g; lapuočiams – 2,07 kJ/g; impregnuotiems spygliuočiams – 2,47 kJ/g; impregnuotiems lapuočiams – 4,11 kJ/g.

3. Sukurtas naujas inžinerinis metodas skirtingų rūšių medienos konstrukcinių elementų apanglėjimo greičiams skaičiuoti bei gaisro trukmei ir kilimo vietai nustatyti, kuriame įvertinti medienos tankis, medienos drėgnis, šilumos srauto tankis, apsaugos priemonės (antipirenai). Taikant naująjį metodą, gaisrų analizės rezultatai yra patikimesni (koreliacijos koeficientas $R = 0,9613$).

4. Artinant bandymų sąlygas prie realių gaisrų sąlygų, standartiniu SBI bandymų metodu, nustatyta, kad skaičiuojamąjį apanglėjimo greitį papildomai reikia įvertinti taikant laisvojo deguonies pritekėjimo į degimo zoną koeficientą $k_d$, kurio maksimali vertė lygi 1,2. Tuomet naujojo metodo gaisro trukmės apskaičiavimo patikimumas išlieka toks pat aukštas (koreliacijos koeficientas $R = 0,9586$).

5. Skirtingas išvardytų parametrų vertes priklausomai nuo natūralios ar impregnuotos antipirenais medienos patvirtina SBI metodu gautų rodiklių rezultatai:

– suminio šilumingumo (THR (600)) vidutinė vertė bandiniams su antipirenais (9,5 MJ) yra daug mažesnė nei bandiniams be jų – 16,3 MJ;

– gaisro didėjimo spartos (FIGRA) vidutinė vertė bandiniams su antipirenais (149 W/s) yra daug mažesnė nei bandiniams be jų – 348,4 W/s;

– dūmų kiekio didėjimo (SMOGRA) vidutinė vertė bandiniams su antipirenais (tik 33,5 $cm^2/s^2$) yra daug mažesnė nei bandiniams be jų – 91 $cm^2/s^2$.

6. Nauja gaisro kilimo vietos nustatymo metodika „Gaisro kilimo vietos nustatymas medinių konstrukcijų pastatuose“ (GTC/GT 5) įteisinta ir įdiegta Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Vidaus reikalų ministerijos Gaisrinių tyrimų centro Ekspertizių skyriuje. Taikant naująją metodiką, Lietuvos piliečiams bus užtikrinta galimybė gauti patikimesnes, tikslesnes ir objektyvesnes gaisro tyrimo išvadas.

## 7. LITERATŪROS SĄRAŠAS


1. *Guide for Fire and Explosion Investigations.* National Fire Protection Association 921, 1998 Edition. 172 p.

2. *Gaisravietės apžiūra ir techninės gaisrų ekspertizės skyrimas. LTEI metodinės rekomendacijos.* Vilnius, 1994. 51 p.

3. ФЕДОТОВ, А. И.; МЕГОРСКИЙ, Б. В. *Пожарно – техническая зкспертиза.* Москва: Издателъство литературы по строителъству, 1978. 210 с.

4. POFIT-SZCZEPANSKA, M.; MALOZIEC, D. Analysis of usefulness of research of electrical resistance of charcoal and char depth to determination the place of origin of fire. *International conference, Badanie przyczyn powstawania pozarow.* 2003 12, Poznan, p. 223–238.

5. CIONI, P.; CROCE, P.; SALVADORE, W. Assessing fire damage to r.c. elements. *Fire Safety Journal*, vol. 36, 2001, p. 181–199.

6. KEINYS, S. ir kt. *Dabartinės lietuvių kalbos žodynas: Apie 50 000 žodžių lizdų.* Lietuvių k. institutas, 3-čiasis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla, 1993. 967 p.

7. *Gaisro židinio vietos ir gaisro priežasties nustatymas. Metodiniai nurodymai.* Patvirtinta Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Lietuvos Respublikos Vidaus reikalų ministerijos 1998 12 22 įsakymu Nr.141. Vilnius, 1998. 62 p.

8. *Пожарная экспертиза. Справочник.* Волгоград: Высшая школа иследователей, 1989. 148 с.

9. СМИРНОВ, К. П. и др. *Комлексная методика определения очага пожара.* Ленинград: ВНИИПО, 1986. 114 с.

10. ТАУБКИН, С. И. *Пожар и взрыв, особености их экспертизы.* Москва: ВНИИПО, 1999. 600 с.

11. BUTLER, C. P. *Notes on charring rates in wood.* Fire Research Note No.896, Borehamwood: Joint Fire Research Organization, 1971. 18 p.

12. WHITE, R. H.; TRAN, H. C. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and Materials,* vol. 16, 1992, p. 197–206.

13. WHITE, R. H.; TRAN, H. C. Charring rate of wood exposed to a constant flux. In *Proc. of Wood and Fire safety conference,* Technical University Zvolen, Slovak Republic, 1996, p. 9–18.

14. KARLSSON, B.; QUINTIERE, J. G. *Enclosure Fire Dynamics.* Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, 1999. 327 p.

15. БУШЕВ, В. П.; ПЧЕЛНИЦЕВ, В. А. и др. *Огнестойкость зданий.* Москва: Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1983. 167 с.

16. БУШЕВ, В. П.; ПЧЕЛНИЦЕВ, В. А. и др. *Огнестойкость зданий.* Москва: Стройиздат, 1970. 281 с.

17. ДРАЙЗДЕИЛ, Д. *Введение в динамику пожаров.* Москва: Стройиздат, 1990. 423 с.

18. COOPER, L. Y.; FRANSSEN, J. M. *A basis for using fire modeling with 1-D thermall analyses of barriers/partitions to simulate 2-D and 3-D barriers/partitions structural performance in real fires.* Report NISTIR 6170, BFRL, 1998. 53 p.

19. IDING, R.; BRESLER, B.; NIRAMUDDIN, Z. *Fire-T3 a computer program for the fire response of structures – Thermal (three dimensional version).* NIST Department of Civil Engineering, Report Nr. NIST GCR 95–682. 1996. 156 p.

20. WICKSTROM, U. *TASEF-2 a computer program for temperature analysis of structures exposed to fire.* Report 79-2, Dept. of Structural Mechanics, Lund Univesity, 1979. 37 p.

21. LST EN 1992-1-2:2005 Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas. CEN, 2005. 85 p.

22. LST EN 1991-1-2:2004 Eurokodas 1. Projektavimo pagrindai ir poveikiai konstrukcijoms. 1–2 dalis. Poveikiai konstrukcijoms. Gaisro poveikiai konstrukcijoms. CEN, 2004. 50 p.

23. ŠAMANAS, A. A. Termodinamika ir šilumos mainai ugniagesyboje. Vilnius: Technika, 1996. 44 p.

24. LST EN 1993-1-2:2005 Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas. CEN, 2005. 64 p.

25. LST EN 1994-1-2:2006 Eurokodas 4. Kompleksinių plieninių ir betoninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas. CEN, 2006. 73 p.

26. LST EN 1995-1-2:2005 Eurocode 5. Design of timber structures – Part 1–2: General – Structural fire design. (Medinių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas.) CEN, 2005. 69 p.

27. LST EN 1996-1-2:2005 Eurokodas 6. Mūrinių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas. CEN, 2005. 29 p.

28. ЯКОВЛЕВ, А. И. *Расчет огнестойкости строителных конструкций.* Москва: Стройиздат, 1988. 143 с.

29. GOSSELIN, C.; ENG, P. *Structural Fire Protection – Predictive Methods.* National Research Council of Canada, 1987. 26 p.

30. ХЛЕВЧУК, В. Р.; АРТЫКПАЕВ, Е. Т. *Огнезащита металлических конструкций зданий.* Москва: Стройиздат, 1973. 97 с.

31. DRYSDALE, D. *An introduction to fire dynamics.* Second edition. John Wiley & Sons, 1998. 447 p.

32. BEDNAREK, Z. Determination of the temperature of uncovered steel constructions using numerical methods. *Statyba 1996*, Nr. 4(8), Vilnius: Technika, 1996, p. 6–10.

33. KUMAR, S. Computer love. *Fire prevention 1997 September*, Hertfordshire: Fire protection association, 1997, p. 46–48.

34. MUESS, H.; RICHTER, E. Bemessungshilfen fur den brandschutz von verbundstutzen. *Braunschweiger brandschutz-tage '01*, 1–2 Oktober 2001 in Braunschweig, Kurzreferate. Braunschweig, IBMB, 2001, p. 65–74.

35. STERNER, E.; WICKSTROM, U. *Tasef-temperature analysis of structures exposed to fire-users manual.* Swedish national testing institute, 1990. 56 p.

36. BABRAUSKAS, V. *Fire modeling: an introduction for attorneys.* Fire Science and Technology Inc., 1999. 5 p.

37. JANSSENS, M. L. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and Materials,* vol. 28, 2004, p. 199–207.

38. BILGER, R.W. Computational field models in fire research and engineering. *Proceedings of the fifth international symposium „Fire safety science".* Melbourne: IAFSS, 1997, p. 95–110.

39. KERRISON, L.; MAWHINNENEY, N.; GALEA, E.R.; HOFFMAN, N.; PATEL, M.K. A comparison of two fire field models with experimental room fire data. *Proceedings of the fifth international symposium „Fire safety science".* Melbourne: IAFSS, 1997, p. 161–172.

40. PETERSSON, O. Rational structural fire engineering design, based on simulated real fire exposure. *Proceedings of the fourth international symposium „Fire safety science".* Melbourne: IAFSS, 1994, p. 3–27.

41. HARADA, K.; TERAI, T. Heat and mass transfer in walls subjected to fire. *Thirteenth meeting of the UJNR panel on fire research and sfety,* March 13–20, 1996. Vol. 1, 1997. Gaithersburg: NIST BFRL, 1997, p. 423–435.

42. LUKOŠIUS, K. Naujas vienpusis konstrukcijų kaitinimo metodas ir jo taikymas prognozuojant atitvarinių konstrukcijų atsparumą ugniai (New one side heating method for structures and its application for prediction of fire resistance of structures with separation function). Daktaro disertacija, Technologijos mokslai, statybos inžinerija, VGTU, 2004. 101 p.

43. МОЛЧАДСКИЙ, О. И., СМИРНОВ, Н. В., ДУДЕРОВ, Н. Г. Использование методов термического анализа для оценки теплофизических характеристик строительных материалов. *Пожарная безопасность,* 3-1999. ВНИИПО МВД России, 1999, с. 74–82.

44. DE HAAN, J. D. Advanced tols for use in forensic fire scene investigation, reconstruction and documentation. *The 10th International Fire science and Engineering Conference*, Vol. 2 Edinburgh, Scotland, 2004, p. 1079–1100.

45. APTE, V. B.; BUI, A. An assessment of fire growth models – Branzfire and FDS against CSIRO fire tests on combustible linings in a room. *The 10th International Fire science and Engineering Conference*, vol. 2 Edinburgh, Scotland , 2004, p. 1325–1336.

46. *Standard test methods for fire tests of building construction and materials* (ASTM E 119). West Conshohocken: ASTM, 2000. 21 p.

47. LST ISO 834:1997. *Atsparumo ugniai bandymai. Pastatų konstrukcijos elementai.* (Fire-resistance tests – Elements of building products. International Organisation for Standardization), 1997. 19 p.

48. SCHAFFER, E. L. *Review of information related to the charing rate of wood.* USDA Forest service, Forest Product Laboratory, Res. Note 145, 1986. 14 p.

49. BROWNE, F. L. *Theories of the combustion of wood and its control – a survey of the literature.* Report No. 2136, USDA Forest service, Forest Product Laboratory, Madison, 1986. 53 p.

50. HADVIG, S. *Charing of wood in building fires.* Technical university of Denmark, Lyngby, 1981. 24 p.

51. POFIT-SZCZEPANSKA, M. The effect of physical properties of the charcoal layer developed when wood is exposed to fire on the heat release rate. *25-th (Int.) Symposium on combustion processes Irvine k/Los Angeles,* University California 31.07-3, 1994, p. 533–542.

52. LAWSON, D. I.; WEBSTER, C. T.; ASHTON, L. A. The fire endurance of timber beams and floros. *The Structural Engineer, no* 30, Feb., 1972, p. 27–34.

53. ROGOWSKI, B. F. W. Charring of timber in fire tests. *Fire and Structural use of Timber in Buildings* (Symp. No. 3), Fire research Station, London: HMSO, 1987, p. 52–59.

54. BUTLER, C. P. *Notes on charring rates in wood.* Fire Research Note no. 896, Borehamwood: Fire Research Organization, 1971. 18 p.

55. LACHE, M. Abbrandverhalten von Holz. *Informationsdienst Holzbautechnik,* no. 4/91, no. 5/91, 1991, p.7–12.

56. FRANGI, A.; FONTANA, M. Charring rates and temperature profiles of wood sections. *Fire and Materials,* vol. 27, 2003, p. 91–102.

57. WHITE, R. H. Charring rate of composite timber products. *Proceedings of Wood & Fire Safety 2000,* Tech. Univ. of Zvolen, 2000, p. 353–363.

58 SYME, D. Verification of charring equations for Australian timbers based on Full-Scale fire resistance tests. *Pacific Timber Engineering Conf.,* vol. 1, Queensland Univ. of Technology, Australia, 1994, p. 619–623.

59. COLLIER, P. C. R. *Charring rates of timber.* Study report no. 42, Judgeford: BRANZ, New Zealand, 1992. 25 p.

60. HARADA, K. A review on structural fire resistance. *4th Asia-Oceania Symp. on Fire Science & Technology,* Tokyo: Japan Assn. for Fire Science & Engineering, 2000, p. 155–163.

61. NJANKOUO, J. M.; DOTREPPE, J. C.; FRANSSEN, J. M. Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. *Fire and Materials, v*ol. 28, 2004, p. 15–24.

62. JANSSENS, M. L. Cone calorimeter measurements of the heat of gasification of wood. *Interflam'93, Proceedings of the sixth international fire conference,* London: Inter-science Communications, 1993, p. 549–558.

63. WHITE, R. H.; NORDHEIM, E. V. Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology, v*ol 28, 1992, p. 5–30.

64. HADVIG, S. *Charring of wood in building fires.* Lyngby: Technical university of Denmark, 1981. 153 p.

65. PRICE, W. R. *ASTM E 119-73 Fire endurance test. Floor Assembly. Wood trusses with plywood floor.* Design FC-240. Norwood: Factory Mutual Research, 1977. 13 p.

66. GRIFFITHS, L. G., HESELDEN A. J. M. The *use of wooden blocks as simple radiometers.* Fire Research Note no. 648, Borehamwood: Fire Research Organization, 1973. 15 p.

67. THOMAS, P. H.; SIMMS, D. L.; LAW, M. *The rate of burning of wood.* Fire Research Note no. 657, Borehamwood: Fire Research Organization, 1973. 12 p.

68. KRISTOFFERSON, B.; HANSEN, A. S.; HOVDE, P. J. Optimization of fire retardant treated wood. *Fire and Materials 2001 Conf.,* London: Interscienice Comunications Ltd., 2001, p. 173–184.

69. BULINE, O. K. *Evaluation of charring rate by a Cone calorimeter.* Haugesund: Hogskolen Stord/Haugesund, Norway, 1993. 9 p.

70. TSANTARIDIS, L. D.; ÖSTMAN, B. A. L. Charring of protected wood studs. *Fire and Materials,* vol. 22, 1998, p. 55–60.

71. BABRAUSKAS, V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *The 10th International Fire science and Engineering Conference*, vol. 2, Edinburgh, Scotland, 2004, p. 1155–1170.

72. HARADA, K. Effects of density on charring and mass loss rates in wood specimens. *Wood & Fire Safety – 3rd Intl. Scientific Conf.,* Slovak Republic, 1996, p. 149–156.

73. FANG, J. B.; BREESE, J. N. *Fire development in Residential basement room*. (NBSIR 80–2120), Gaithesburg: U.S. Natl. Bur. Standards, 1980. 53 p.

74. HAKKARAINEN, T. Post-flashover fires in light and heavy timber construction compartments. *J. Fire Sciences,* vol. 20, 2002, p. 133–175.

75. SILCOCK, G. W.; SHIELDS, T. J. Relating char depth to fire severity conditions. *Fire and Materials,* vol. 25, 2001, p. 9–11.

76. RICHARDSON, L. R., BATISTA, M. Fire resistance of timber decking for heavy timber konstruction. *Fire and Materials,* vol. 25, 2001, p. 21–29.

77. MIKKOLA, E. *Charring of wood.* Research Report no. 689, Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Finland. ISBN 951-38-3711-4. 1990. 40 p.

78. MIKKOLA, E. *Ignition of wooden surface.* Research Report no. 1057, Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Finland. ISBN 951-38-3589-8. 1989. 48 p.

79. DE SOUZA COSTA, F.; SANDBERG, D. Mathematical model of a smoldering log. *Combustion and Flame*, vol. 139, 2004, p. 227–238.

80. SCHAFFER, E. L. Effect of fire-retardant impregnations on wood charing rate. *J. Fire and Flamm*., nr.1, 1974. 16 p.

81. BEDNAREK, Z.; KALISZUK-WIETECKA, A. Scientific research on the influence of fireproof wood preservation carried out by the vacumm-pressure method on strngth of wood in normal and elevated temperatures. *The 8th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques.* Vilnius: Technika, 2004, p. 412–419.

82. DELEV, K. Equivavalent fire exposure for timber structure design. *The 8th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques.* Vilnius: Technika, 2004, p. 435–439.

83. LST EN 60584-1:2001. Termoporos. 1 dalis. Atskaitos verčių lentelės. (IEC 60584-1:1995). CEN, 2001. 120 p.

84. ХЛЕВЧУК, В. Р.; АРТЫКПАЕВ, Е. Т. *Огнезащита металлических конструкций зданий.* Москва: Стройиздат, 1973. 97 с.

85. QUINTIERIE, J. G.; HERKLEROAD, M. T. New concepts for measuring flame spread properties. *Fire safety: Science and Engineering,* ASTM STP882, T. Z. Harmathy, Ed., Philadelphia: American society or testing and materials, 1985, p. 239–267.

86. MARKSTEIN, G. H. Radiative energy transfer from gaseous diffusion flames. *15th International symposium on combustion*, Pittsburgh: The Combustion institute, 1975, p. 1285–1294.

87. LST EN 13823 SBI:2002 Statybos gaminių degumo bandymai. Statybos gaminiai, išskyrus grindų klojinius, termiškai veikiami vienu degančiu objektu (Reaction to fire tests for building products – Building products exluding exposed to the thermal attack by a single burning item). CEN, 2002. 89 p.

88. LST EN ISO/IEC 17025:2005. Tyrimų, bandymų ir kalibravimo laboratorijų kompetencija. Bendrieji reikalavimai. 2005. 30 p.

89. PARKER, W. J. *Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications.* NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, 1982. 19 p.

90. JANSSENS, M. L.; PARKER, W. J. Oxygen consumption calorimetry. Heat release in fires. V. Babrauskas, London: S. J. Grayson, Eds. (E & FN Spon), 1995, p. 31–59.

91. LST EN 13501-1:2002/P:2004. Statybos gaminių ir statinio elementų klasifikavimas pagal degumą. 1 dalis. Klasifikavimas pagal degumo bandymų duomenis. CEN, 2004. 39 p.

92. ČEKANAVIČIUS, V.; MURAUSKAS, G. *Statistika ir jos taikymai.* 2 d. Vilnius: TEV, 2000, 241 p.

93. SAKALAUSKAS, V. *Statistika su Statistica.* Vilnius: Margi raštai, 1998. 229 p.

94. АСТАПЕНКО, В. М.; КОШМАРОВ, Ю. А.; МОЛЧАДСКИЙ, И. С.; ШЕВЛЯКОВ, А. Н. *Термогазодинамика пожаров в помещениях.* Москва: Стройиздат, 1988. 448 с.

95. БАРАТОВ, А. Н.; КОРОЛЬЧЕНКО, А. Я.; КРАВЧУК, Г. Н. и др. *Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения.* Справочник. Том 1. Москва: Химия, 1990. 384 с.

96. STR 2.01.04:2004. Gaisrinė sauga. Pagrindiniai reikalavimai. Patvirtinta Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2003 m. gruodžio 24 d. įsakymu Nr.704. 17 p.

97. LST EN 13501-1:2002/P:2004. Statybos gaminių ir statinio elementų klasifikavimas pagal degumą. 1 dalis. Klasifikavimas pagal degumo bandymo duomenis (Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using test data from reaction to fires tests). CEN, 2004. 39 p.

98. Apanglėjusios medienos mėginių atrinkimo metodiniai nurodymai GT 1-97. Lietuvos Respublikos Vidaus reikalų ministerijos Priešgaisrinės apsaugos departamento direktoriaus 1997-11-10 įsakymas Nr.123, 1997. 4 p.

99. SPEARPOINT, M. J.; QUINTIERE, J. G. Predicting the burning of wood using an integral model. *Combustion and Flame*, vol. 123, no. 3, 2000, p. 308–325.

100. HIETANIEMI, J. A probabalistic approach to wood charring rate. VTT *Building and Transport.* VTT working papers no. 31, 2005. 53 p.

101. NURBAKSH, S. Thermal decomposition of charring materials. *7-th International symposium of fire Safety Science.* Boston, 2002, p. 321–332.

102. OSTMAN, B. A. L.; TSANTARIDIS, L. D. Charring of protected wood studs. *Fire and Materials,* vol. 22, 1998, p. 55–60.

## 8. AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA

STRAIPSNIAI

leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (*ISI Proceedings*) mokslinių pranešimų rinkinių sąrašą

1A. LIPINSKAS, D.; MAČIULAITIS, R. Opportunities of development of the instrumental method applicable in fire research practice in Lithuania. *Selected papers of the 8th International Conference „Modern building materials, structures and techniques“*. Vilnius: Technika, 2004, p. 979–984. ISBN 9986-05-757-4.

STRAIPSNIAI

recenzuojamuose periodiniuose moksliniuose leidiniuose

2A. LIPINSKAS, D.; MAČIULAITIS, R.; LUKOŠIUS, K. Singularity and importance of determination of wood charring rate in fire investigation. *Journal of Materials Science (Medžiagotyra),* vol. 12, no. 1, 2006, p. 42–47. ISSN 1392-1320.

3A. LIPINSKAS, D.; MAČIULAITIS, R. Further opportunities of development of the method for fire origin prognosis. *Journal of Civil Engineering and Management,* vol. XI, no. 4, 2005, p. 299–307. ISSN 1392-3730.

STRAIPSNIAI

kituose moksliniuose leidiniuose

4A. LIPINSKAS, D.; MAČIULAITIS, R.; LUKOŠIUS, K. Singularity and importance of determination of wood charring rate in fire investigation. *Abstracts of papers 14th International Baltic Conference „Materials Engineering – 2005“, held in Kaunas on October 6–7, 2005*. Kaunas: Technologija, 2005, p. 8–9. ISBN 9955-09-925-9.

5A. LIPINSKAS, D.; MAČIULAITIS, R. Opportunities of development of the instrumental method applicable in fire research practice in Lithuania. *Proceedings of the 8th International Conference „Modern building materials, structures and techniques“, held in Vilnius on May 19–21, 2004.* Vilnius: Technika, 2004, p. 433–434. ISBN 9986-05-722-1.

6A. LIPINSKAS, D.; MAČIULAITIS, R. Opportunities of development of the instrumental method applicable in fire research practice in Lithuania. *CD of Proceedings of the 8th International Conference „Modern building materials, structures and techniques“, held in Vilnius on May 19–21, 2004.* Vilnius: Technika, 2004, p. 1–6. ISBN 9986-05-722-1.

7A. LIPINSKAS, D. Gaisro kilimo vietos nustatymas taikant apanglėjusios medienos mėginių tyrimą elektros laidumu. *6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2003 m. kovo 27–28 d., medžiaga. Statyba.* Vilnius: Technika, 2003, p. 201–206. ISBN 9986-05-618-7.

8A. LIPINSKAS, D. Skirtingos rūšies apsaugotos ir neapsaugotos antipirenais medienos anglėjimo greičio įtaka gaisro poveikio trukmės prognozei. *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25–26 d., medžiaga. Statyba.* Vilnius: Technika, 2004, p. 230–235. ISBN 9986-05-775-2.

9A. LIPINSKAS, D.; RASKOV, A.; CHARŽAUSKAS, E. Fire investigation in Lithuania. *Fire investigation methods and lessons learned from fires and other relevant incidents*, Workshop in Revinge, Sweden 16–19 June, 2005, Swedish rescue services agency: Final report 2005 in CD.

**1 priedas. Skirtingos rūšies medienos apanglėjimo tyrimai vienpusio konstrukcijų kaitinimo kamera**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Pušies | 55 | 2 | - | - |
| 2 | 5 | Pušies | 52 | 4 | - | - |
| 3 | 5 | Pušies | 50 | 1 | - | - |
| 4 | 5 | Pušies | 50 | 3 | - | - |
| 5 | 10 | Pušies | 56 | 9 | - | - |
| 6 | 10 | Pušies | 59 | 10 | - | - |
| 7 | 10 | Pušies | 50 | 6 | - | - |
| 8 | 10 | Pušies | 52 | 8 | - | - |
| 9 | 15 | Pušies | 60 | 12 | - | - |
| 10 | 15 | Pušies | 50 | 13 | - | - |
| 11 | 15 | Pušies | 40 | 16 | - | - |
| 12 | 15 | Pušies | 56 | 15 | - | - |
| 13 | 20 | Pušies | 52 | 21 | - | - |
| 14 | 20 | Pušies | 54 | 18 | - | - |
| 15 | 20 | Pušies | 51 | 19 | - | - |
| 16 | 20 | Pušies | 50 | 17 | - | - |
| 17 | 25 | Pušies | 50 | 23 | - | - |
| 18 | 25 | Pušies | 50 | 24 | - | - |
| 19 | 25 | Pušies | 52 | 22 | - | - |
| 20 | 25 | Pušies | 54 | 26 | - | - |
| 21 | 30 | Pušies | 52 | 29 | - | - |
| 22 | 30 | Pušies | 50 | 26 | - | - |
| 23 | 30 | Pušies | 50 | 28 | - | - |
| 24 | 30 | Pušies | 50 | 26 | - | - |
| 25 | 45 | Pušies | 50 | 42 | - | - |
| 26 | 45 | Pušies | 50 | 39 | - | - |
| 27 | 45 | Pušies | 60 | 38 | 3 | 41 |
| 28 | 45 | Pušies | 58 | 41 | 1 | 42 |
| 29 | 60 | Pušies | 60 | 48 | 2 | 50 |
| 30 | 60 | Pušies | 70 | 49 | 3 | 52 |
| 31 | 60 | Pušies | 70 | 48 | 1 | 49 |
| 32 | 60 | Pušies | 70 | 45 | 6 | 51 |

**1 priedo tęsinys**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Eglės | 50 | 1 | - | - |
| 2 | 5 | Eglės | 51 | 2 | - | - |
| 3 | 5 | Eglės | 50 | 4 | - | - |
| 4 | 5 | Eglės | 50 | 3 | - | - |
| 5 | 10 | Eglės | 50 | 11 | - | - |
| 6 | 10 | Eglės | 52 | 11 | - | - |
| 7 | 10 | Eglės | 50 | 7 | - | - |
| 8 | 10 | Eglės | 53 | 9 | - | - |
| 9 | 15 | Eglės | 58 | 13 | - | - |
| 10 | 15 | Eglės | 56 | 15 | - | - |
| 11 | 15 | Eglės | 50 | 15 | - | - |
| 12 | 15 | Eglės | 56 | 14 | - | - |
| 13 | 20 | Eglės | 52 | 22 | - | - |
| 14 | 20 | Eglės | 53 | 17 | - | - |
| 15 | 20 | Eglės | 52 | 18 | - | - |
| 16 | 20 | Eglės | 60 | 20 | - | - |
| 17 | 25 | Eglės | 60 | 25 | - | - |
| 18 | 25 | Eglės | 58 | 25 | - | - |
| 19 | 25 | Eglės | 53 | 23 | - | - |
| 20 | 25 | Eglės | 52 | 22 | - | - |
| 21 | 30 | Eglės | 51 | 28 | - | - |
| 22 | 30 | Eglės | 50 | 27 | - | - |
| 23 | 30 | Eglės | 50 | 28 | - | - |
| 24 | 30 | Eglės | 50 | 26 | - | - |
| 25 | 45 | Eglės | 50 | 43 | 3 | 43 |
| 26 | 45 | Eglės | 55 | 42 | - | - |
| 27 | 45 | Eglės | 53 | 39 | - | - |
| 28 | 45 | Eglės | 51 | 38 | 1 | 39 |
| 29 | 60 | Eglės | 62 | 47 | 2 | 49 |
| 30 | 60 | Eglės | 70 | 51 | 3 | 54 |
| 31 | 60 | Eglės | 70 | 54 | 3 | 57 |
| 32 | 60 | Eglės | 70 | 50 | 2 | 52 |

**1 priedo tęsinys**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Uosio | 40 | 2 | - | - |
| 2 | 5 | Uosio | 40 | 1 | - | - |
| 3 | 5 | Uosio | 35 | 1 | - | - |
| 4 | 5 | Uosio | 35 | 2 | - | - |
| 5 | 10 | Uosio | 42 | 3 | - | - |
| 6 | 10 | Uosio | 40 | 2 | - | - |
| 7 | 10 | Uosio | 40 | 2 | - | - |
| 8 | 10 | Uosio | 50 | 4 | - | - |
| 9 | 15 | Uosio | 45 | 6 | - | - |
| 10 | 15 | Uosio | 40 | 7 | - | - |
| 11 | 15 | Uosio | 42 | 5 | - | - |
| 12 | 15 | Uosio | 50 | 6 | - | - |
| 13 | 20 | Uosio | 50 | 10 | - | - |
| 14 | 20 | Uosio | 52 | 9 | - | - |
| 15 | 20 | Uosio | 55 | 9 | - | - |
| 16 | 20 | Uosio | 40 | 10 | - | - |
| 17 | 25 | Uosio | 45 | 11 | - | - |
| 18 | 25 | Uosio | 36 | 12 | - | - |
| 19 | 25 | Uosio | 50 | 10 | - | - |
| 20 | 25 | Uosio | 54 | 12 | - | - |
| 21 | 30 | Uosio | 52 | 15 | - | - |
| 22 | 30 | Uosio | 50 | 14 | - | - |
| 23 | 30 | Uosio | 50 | 15 | - | - |
| 24 | 30 | Uosio | 50 | 16 | - | - |
| 25 | 45 | Uosio | 50 | 23 | - | - |
| 26 | 45 | Uosio | 50 | 24 | - | - |
| 27 | 45 | Uosio | 45 | 25 | - | - |
| 28 | 45 | Uosio | 42 | 23 | - | - |
| 29 | 60 | Uosio | 53 | 30 | - | - |
| 30 | 60 | Uosio | 50 | 33 | - | - |
| 31 | 60 | Uosio | 50 | 32 | - | - |
| 32 | 60 | Uosio | 50 | 32 | - | - |

**1 priedo tęsinys**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Ąžuolo | 35 | 1 | - | - |
| 2 | 5 | Ąžuolo | 42 | 1 | - | - |
| 3 | 5 | Ąžuolo | 37 | 2 | - | - |
| 4 | 5 | Ąžuolo | 45 | 1 | - | - |
| 5 | 10 | Ąžuolo | 40 | 2 | - | - |
| 6 | 10 | Ąžuolo | 42 | 1 | - | - |
| 7 | 10 | Ąžuolo | 47 | 2 | - | - |
| 8 | 10 | Ąžuolo | 35 | 2 | - | - |
| 9 | 15 | Ąžuolo | 35 | 4 | - | - |
| 10 | 15 | Ąžuolo | 39 | 5 | - | - |
| 11 | 15 | Ąžuolo | 40 | 4 | - | - |
| 12 | 15 | Ąžuolo | 40 | 3 | - | - |
| 13 | 20 | Ąžuolo | 50 | 7 | - | - |
| 14 | 20 | Ąžuolo | 50 | 6 | - | - |
| 15 | 20 | Ąžuolo | 50 | 8 | - | - |
| 16 | 20 | Ąžuolo | 40 | 8 | - | - |
| 17 | 25 | Ąžuolo | 45 | 10 | - | - |
| 18 | 25 | Ąžuolo | 45 | 10 | - | - |
| 19 | 25 | Ąžuolo | 45 | 10 | - | - |
| 20 | 25 | Ąžuolo | 46 | 8 | - | - |
| 21 | 30 | Ąžuolo | 40 | 14 | - | - |
| 22 | 30 | Ąžuolo | 50 | 11 | - | - |
| 23 | 30 | Ąžuolo | 50 | 11 | - | - |
| 24 | 30 | Ąžuolo | 50 | 12 | - | - |
| 25 | 45 | Ąžuolo | 45 | 20 | - | - |
| 26 | 45 | Ąžuolo | 50 | 22 | - | - |
| 27 | 45 | Ąžuolo | 48 | 22 | - | - |
| 28 | 45 | Ąžuolo | 45 | 19 | - | - |
| 29 | 60 | Ąžuolo | 44 | 29 | - | - |
| 30 | 60 | Ąžuolo | 50 | 34 | - | - |
| 31 | 60 | Ąžuolo | 50 | 31 | - | - |
| 32 | 60 | Ąžuolo | 60 | 30 | - | - |

**1 priedo tęsinys „BAK1“**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Impr. pušies | 50 | - | - | - |
| 2 | 5 | Impr. pušies | 50 | 1 | - | - |
| 3 | 5 | Impr. pušies | 50 | 1 | - | - |
| 4 | 5 | Impr. pušies | 50 | - | - | - |
| 5 | 10 | Impr. pušies | 50 | 4 | - | - |
| 6 | 10 | Impr. pušies | 50 | 3 | - | - |
| 7 | 10 | Impr. pušies | 50 | 3 | - | - |
| 8 | 10 | Impr. pušies | 50 | 2 | - | - |
| 9 | 15 | Impr. pušies | 50 | 8 | - | - |
| 10 | 15 | Impr. pušies | 50 | 6 | - | - |
| 11 | 15 | Impr. pušies | 60 | 9 | - | - |
| 12 | 15 | Impr. pušies | 55 | 6 | - | - |
| 13 | 20 | Impr. pušies | 50 | 10 | - | - |
| 14 | 20 | Impr. pušies | 50 | 11 | - | - |
| 15 | 20 | Impr. pušies | 52 | 10 | - | - |
| 16 | 20 | Impr. pušies | 50 | 13 | - | - |
| 17 | 25 | Impr. pušies | 54 | 13 | - | - |
| 18 | 25 | Impr. pušies | 52 | 15 | - | - |
| 19 | 25 | Impr. pušies | 50 | 16 | - | - |
| 20 | 25 | Impr. pušies | 50 | 14 | - | - |
| 21 | 30 | Impr. pušies | 50 | 18 | - | - |
| 22 | 30 | Impr. pušies | 52 | 17 | - | - |
| 23 | 30 | Impr. pušies | 52 | 18 | - | - |
| 24 | 30 | Impr. pušies | 52 | 16 | - | - |
| 25 | 45 | Impr. pušies | 51 | 25 | - | - |
| 26 | 45 | Impr. pušies | 54 | 24 | - | - |
| 27 | 45 | Impr. pušies | 50 | 26 | - | - |
| 28 | 45 | Impr. pušies | 52 | 24 | - | - |
| 29 | 60 | Impr. pušies | 70 | 35 | - | - |
| 30 | 60 | Impr. pušies | 68 | 34 | - | - |
| 31 | 60 | Impr. pušies | 72 | 36 | - | - |
| 32 | 60 | Impr. pušies | 65 | 35 | - | - |

**1 priedo tęsinys „BAK1“**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Impr. eglės | 55 | - | - | - |
| 2 | 5 | Impr. eglės | 52 | 1 | - | - |
| 3 | 5 | Impr. eglės | 50 | 1 | - | - |
| 4 | 5 | Impr. eglės | 50 | - | - | - |
| 5 | 10 | Impr. eglės | 50 | 3 | - | - |
| 6 | 10 | Impr. eglės | 50 | 3 | - | - |
| 7 | 10 | Impr. eglės | 52 | 3 | - | - |
| 8 | 10 | Impr. eglės | 53 | 3 | - | - |
| 9 | 15 | Impr. eglės | 45 | 5 | - | - |
| 10 | 15 | Impr. eglės | 52 | 6 | - | - |
| 11 | 15 | Impr. eglės | 50 | 5 | - | - |
| 12 | 15 | Impr. eglės | 52 | 4 | - | - |
| 13 | 20 | Impr. eglės | 52 | 8 | - | - |
| 14 | 20 | Impr. eglės | 59 | 8 | - | - |
| 15 | 20 | Impr. eglės | 50 | 9 | - | - |
| 16 | 20 | Impr. eglės | 52 | 11 | - | - |
| 17 | 25 | Impr. eglės | 52 | 12 | - | - |
| 18 | 25 | Impr. eglės | 51 | 9 | - | - |
| 19 | 25 | Impr. eglės | 50 | 10 | - | - |
| 20 | 25 | Impr. eglės | 60 | 14 | - | - |
| 21 | 30 | Impr. eglės | 53 | 15 | - | - |
| 22 | 30 | Impr. eglės | 56 | 15 | - | - |
| 23 | 30 | Impr. eglės | 50 | 14 | - | - |
| 24 | 30 | Impr. eglės | 55 | 16 | - | - |
| 25 | 45 | Impr. eglės | 55 | 23 | - | - |
| 26 | 45 | Impr. eglės | 55 | 25 | - | - |
| 27 | 45 | Impr. eglės | 56 | 25 | - | - |
| 28 | 45 | Impr. eglės | 50 | 25 | - | - |
| 29 | 60 | Impr. eglės | 56 | 33 | - | - |
| 30 | 60 | Impr. eglės | 55 | 36 | - | - |
| 31 | 60 | Impr. eglės | 55 | 33 | - | - |
| 32 | 60 | Impr. eglės | 55 | 35 | - | - |

**1 priedo tęsinys „BAK1“**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Impr. uosio | 40 | - | - | - |
| 2 | 5 | Impr. uosio | 50 | - | - | - |
| 3 | 5 | Impr. uosio | 45 | - | - | - |
| 4 | 5 | Impr. uosio | 45 | - | - | - |
| 5 | 10 | Impr. uosio | 45 | 1 | - | - |
| 6 | 10 | Impr. uosio | 48 | - | - | - |
| 7 | 10 | Impr. uosio | 50 | 1 | - | - |
| 8 | 10 | Impr. uosio | 50 | 1 | - | - |
| 9 | 15 | Impr. uosio | 50 | 1 | - | - |
| 10 | 15 | Impr. uosio | 52 | 2 | - | - |
| 11 | 15 | Impr. uosio | 45 | 3 | - | - |
| 12 | 15 | Impr. uosio | 45 | 1 | - | - |
| 13 | 20 | Impr. uosio | 56 | 2 | - | - |
| 14 | 20 | Impr. uosio | 50 | 2 | - | - |
| 15 | 20 | Impr. uosio | 50 | 3 | - | - |
| 16 | 20 | Impr. uosio | 50 | 4 | - | - |
| 17 | 25 | Impr. uosio | 50 | 5 | - | - |
| 18 | 25 | Impr. uosio | 50 | 3 | - | - |
| 19 | 25 | Impr. uosio | 55 | 4 | - | - |
| 20 | 25 | Impr. uosio | 53 | 5 | - | - |
| 21 | 30 | Impr. uosio | 60 | 9 | - | - |
| 22 | 30 | Impr. uosio | 46 | 9 | - | - |
| 23 | 30 | Impr. uosio | 45 | 10 | - | - |
| 24 | 30 | Impr. uosio | 50 | 7 | - | - |
| 25 | 45 | Impr. uosio | 50 | 18 | - | - |
| 26 | 45 | Impr. uosio | 50 | 15 | - | - |
| 27 | 45 | Impr. uosio | 55 | 17 | - | - |
| 28 | 45 | Impr. uosio | 55 | 16 | - | - |
| 29 | 60 | Impr. uosio | 55 | 22 | - | - |
| 30 | 60 | Impr. uosio | 62 | 23 | - | - |
| 31 | 60 | Impr. uosio | 50 | 19 | - | - |
| 32 | 60 | Impr. uosio | 50 | 20 | - | - |

**1 priedo tęsinys „BAK1“**

| Bandinio Nr. | Bandymo trukmė, min | Medienos rūšis | Bandinio storis, mm | Anglies storis, mm | Sudegusios anglies storis, mm | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | Impr. ąžuolo | 50 | - | - | - |
| 2 | 5 | Impr. ąžuolo | 50 | - | - | - |
| 3 | 5 | Impr. ąžuolo | 50 | - | - | - |
| 4 | 5 | Impr. ąžuolo | 50 | - | - | - |
| 5 | 10 | Impr. ąžuolo | 50 | - | - | - |
| 6 | 10 | Impr. ąžuolo | 50 | 1 | - | - |
| 7 | 10 | Impr. ąžuolo | 52 | - | - | - |
| 8 | 10 | Impr. ąžuolo | 52 | - | - | - |
| 9 | 15 | Impr. ąžuolo | 60 | 1 | - | - |
| 10 | 15 | Impr. ąžuolo | 50 | 1 | - | - |
| 11 | 15 | Impr. ąžuolo | 45 | 2 | - | - |
| 12 | 15 | Impr. ąžuolo | 56 | 1 | - | - |
| 13 | 20 | Impr. ąžuolo | 52 | 2 | - | - |
| 14 | 20 | Impr. ąžuolo | 54 | 3 | - | - |
| 15 | 20 | Impr. ąžuolo | 51 | 3 | - | - |
| 16 | 20 | Impr. ąžuolo | 50 | 2 | - | - |
| 17 | 25 | Impr. ąžuolo | 50 | 4 | - | - |
| 18 | 25 | Impr. ąžuolo | 50 | 3 | - | - |
| 19 | 25 | Impr. ąžuolo | 52 | 4 | - | - |
| 20 | 25 | Impr. ąžuolo | 54 | 5 | - | - |
| 21 | 30 | Impr. ąžuolo | 52 | 9 | - | - |
| 22 | 30 | Impr. ąžuolo | 50 | 10 | - | - |
| 23 | 30 | Impr. ąžuolo | 50 | 8 | - | - |
| 24 | 30 | Impr. ąžuolo | 53 | 8 | - | - |
| 25 | 45 | Impr. ąžuolo | 54 | 15 | - | - |
| 26 | 45 | Impr. ąžuolo | 50 | 15 | - | - |
| 27 | 45 | Impr. ąžuolo | 60 | 16 | - | - |
| 28 | 45 | Impr. ąžuolo | 58 | 17 | - | - |
| 29 | 60 | Impr. ąžuolo | 60 | 21 | - | - |
| 30 | 60 | Impr. ąžuolo | 70 | 19 | - | - |
| 31 | 60 | Impr. ąžuolo | 70 | 18 | - | - |
| 32 | 60 | Impr. ąžuolo | 70 | 21 | - | - |

**2 priedas. Eksperimentiniai duomenys „indukciniam laikui“ nustatyti**

| Bandinio Nr. | Medienos rūšis | Antipireno pavadinimas | Apanglėjimo pradžia τ, min | Kaitinimo krosnies temperatūra t, °C |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Impregnuotos eglės bandiniai | BAK1 | 33 | 300 |
| 2 | | | 18 | 450 |
| 3 | | | 20 | 450 |
| 4 | | | 4 | 600 |
| 5 | | | 6 | 600 |
| 6 | | FLAMASEP | 35 | 300 |
| 7 | | | 20 | 450 |
| 8 | | | 19 | 450 |
| 9 | | | 5 | 600 |
| 10 | | | 6 | 600 |
| 11 | Impregnuotos pušies bandiniai | BAK1 | 30 | 300 |
| 12 | | | 17 | 450 |
| 13 | | | 21 | 450 |
| 14 | | | 5 | 600 |
| 15 | | | 7 | 600 |
| 16 | | FLAMASEP | 34 | 300 |
| 17 | | | 18 | 450 |
| 18 | | | 22 | 450 |
| 19 | | | 4 | 600 |
| 20 | | | 5 | 600 |
| 21 | Impregnuoto uosio bandiniai | BAK1 | 37 | 300 |
| 22 | | | 22 | 450 |
| 23 | | | 20 | 450 |
| 24 | | | 7 | 600 |
| 25 | | | 9 | 600 |
| 26 | | FLAMASEP | 36 | 300 |
| 27 | | | 23 | 450 |
| 28 | | | 22 | 450 |
| 29 | | | 8 | 600 |
| 30 | | | 6 | 600 |
| 31 | Impregnuoto ąžuolo bandiniai | BAK1 | 35 | 300 |
| 32 | | | 24 | 450 |
| 33 | | | 23 | 450 |
| 34 | | | 10 | 600 |
| 35 | | | 8 | 600 |
| 36 | | FLAMASEP | 38 | 300 |
| 37 | | | 23 | 450 |
| 38 | | | 24 | 450 |
| 39 | | | 9 | 600 |
| 40 | | | 7 | 600 |

**3 priedas. Gaisro kilimo vietos nustatymo medinių konstrukcijų pastatuose metodika GTC/GT 5**

**GAISRŲ TYRIMO METODIKA** **GTC/GT 5**

2006 rugsėjis

**Reikšminiai žodžiai:** medinės konstrukcijos, gaisro kilimo vieta, gaisro trukmė, elektrinė varža

# Gaisro kilimo vietos nustatymas medinių konstrukcijų pastatuose



| | | |
|---|---|---|
| **GTC** | PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTO PRIE VRM<br>GAISRINIŲ TYRIMŲ CENTRAS<br>Švitrigailos g. 18, LT-2600 Vilnius<br>Tel. 2716829, faks. 2339878, el. paštas gtcentras@vpgt.lt<br>interneto tinklalapis http://www.vpgt.lt/gtc.htm | Nuorodinis žymuo:<br><br>GTC/GT 5:2006 lt |



© Gaisrinių tyrimų centras, 2006
Visos metodikos arba jos dalių jokiomis formomis ir priemonėmis (elektroninėmis, mechaninėmis, įskaitant fotokopijavimą ir mikrofilmavimą) negalima dauginti, perspausdinti ar platinti be raštiško Gaisrinių tyrimų centro leidimo.

## Pratarmė

Šią metodiką parengė Gaisrinių tyrimų centras (Donatas Lipinskas). Metodika padės daug tiksliau nustatyti gaisro poveikio medinėms konstrukcijoms trukmę, bus lengviau surasti gaisro kilimo vietą, o tai savo ruožtu palengvins atlikti pagrindinę gaisro tyrimo užduotį – nustatyti gaisro kilimo priežastį.

## Turinys

Pratarmė ..... 109
Turinys ..... 110
1. Sritis ir metodo esmė ..... 111
2. Veiksmų seka įvykio vietos apžiūros metu ..... 111
3. Tyrimo įranga ..... 114
4. Apanglėjusios medienos bandinio elektrinės varžos nustatymo eiga ..... 116
5. Duomenų, surinktų įvykio vietoje bei nustatytų laboratorinio tyrimo metu, apdorojimas ..... 117
6. Tyrimo rezultatų vertinimas ir įforminimas ..... 120
7. Tyrimų saugumo technika ir patikimumas ..... 120
1 Priedas ..... 121
2 Priedas ..... 122

## 1. Sritis ir metodo esmė

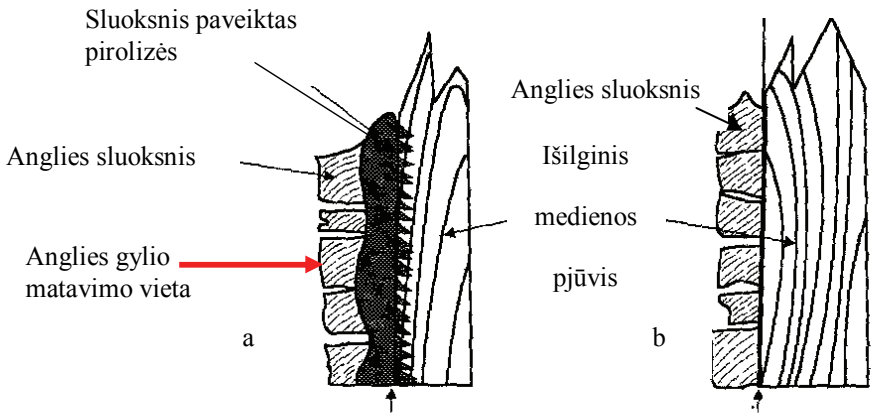
Gaisro priežasties nustatymas yra vienas iš pagrindinių klausimų, į kurį reikia atsakyti tiriant gaisrą. Tiksliai nustatyti priežastį galima tik nustačius gaisro kilimo vietą (židinį). Nustatyti gaisro kilimo vietą kartais būna labai sudėtinga, ir toks darbas reikalauja didelių praktinių ir teorinių įgūdžių. Siekiant palengvinti gaisro kilimo vietos nustatymą ir padidinti efektyvumą, kartu su tradiciniais gaisravietės apžiūros metodais reikia taikyti metodus, panaudojant specialią įrangą bei specifinius skaičiavimo būdus.

Šio metodo esmė – tiksliau apskaičiuoti gaisro trukmę atsižvelgiant į išlikusias po gaisro sudegusias medines pastato konstrukcijas, kas padeda tiksliau nustatyti gaisro kilimo vietą. Tyrimais nustatyta, kad tam reikia žinoti įvairius gaisro vystymosi kriterijus, kurių visų, be abejonės, nėra galimybių įvertinti, o ypač po gaisro. Nepaisant to, tyrimais įrodyta, kad medienos anglies savybės keičiasi priklausomai nuo jos poveikio šiluminio srauto tankio ar temperatūros poveikio dydžio. Nustatyta, kad medienos apanglėjimo greičiui turi įtakos medienos tankis, drėgnis bei pakankamo oro deguonies pritekėjimo atitinkams vertės, todėl net ir po didelio gaisro įmanoma atkurti ikiteisminiam tyrimui svarbias aplinkybes.

## 2. Veiksmų seka įvykio vietos apžiūros metu

2.1 Atliekant išorinę gaisravietės apžiūrą, nustatomi spėjami gaisro kilimo vietos ir šiluminio poveikio požymiai, vienaip ar kitaip nurodantys degimo sąlygas medinių ar kitokių konstrukcijų pastatų gaisruose. Ši metodika taikoma tik gaisravietėje išlikusioms apanglėjusioms medinėms pastato konstrukcijoms, kurias įmanoma aprašyti pagal žemiau išvardytus tyrimui reikalingus kriterijus (apanglėjimo gylis, medienos rūšis, impregnavimo egzistavimas ir pan.), paimant iš gaisravietės apanglėjusios medienos bandinius. Anglies bandiniai imami iš giliausiai apanglėjusių medinių konstrukcijų vietų ir iš ten, kur pagal degimo ir šiluminio poveikio požymius galėtų būti gaisro kilimo vieta, ilgalaikio smilkimo zona, taip pat iš kitų gaisravietės vietų taip, kaip tai nurodyta 1 pav. Tai reikia atlikti, norint sužinoti degimo proceso intensyvumą ir jo trukmę bandinių atrinkimo vietoje.

2.2 Apanglėjusios medienos bandiniai surenkami iš kuo daugiau gaisro zonos vietų (15–20), kad būtų galima sudaryti išsamesnį vaizdą apie gaisro plėtimąsi. Ypatingą dėmesį reikia atkreipti į anglies sluoksnį atrinkimo vietose: jis neturi būti pažeistas, sutrūkinėjęs, konstrukcijos liekanos turi būti savo vietose.




**1 pav.** Medienos apanglėjimo skirtumai priklausomai nuo gaisro vystymosi greičio (a – lėtas degimas; b – greitas degimas) ir anglies gylio matavimo vieta bei kryptis

2.3 Pildoma apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo lentelė (1 lentelė), kurioje nurodomi matuojamų dydžių vertės ir pastabos kiekvienoje atrinkimo vietoje:

– pirminis medinės konstrukcijos storis $h$, mm;

– anglies gylis $h_a$, mm, matuojamas plona metaline liniuote, slankmačiu, gylmačiu arba strypeliu duriant į anglį kol matavimo priemonė atsirems į išlikusią sveikos medienos dalį (svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad anglies gylį reikia matuoti per anglies gardelės vidurį, o ne tarp jų, taip, kaip tai parodyta 1 pav.);

– nudegusios konstrukcijos storis $h_n$, mm;

– bandinių atrinkimo vietos turi būti susietos su statinio planu-schema, taip pat turi būti pateikta papildoma informacija apie bandinio atrinkimo vietą: aukštis nuo grindų, atstumai nuo sienų ar kitų statinio konstrukcinių elementų, atsižvelgiant į pasaulio krypčių orientyrą.

**1 lentelė.** Apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo lentelė

| Bandinio Nr. | Atrinkimo vieta | Pirminis konstrukcijos storis $h$, mm | Sudegusios konstrukcijos storis $h_n$, mm | Anglies gylis $h_a$, mm | Pastabos |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

2.4 Įvykio vietos apžiūros metu bei remiantis tolimesniais liudytojų apklausos duomenimis nustatyti sudegusio pastato medinių konstrukcijų, iš kurių imami bandiniai tolimesniam

tyrimui: medienos rūšį, apsaugos priemonių panaudojimą, bei galimą medinės konstrukcijos drėgnį *w* gaisro kilimo dieną (šiuo atveju svarbu atkreipti dėmesį į skirtingą drėgnį patalpos viduje ir išorėje, šio parametro vertes nesudėtingai galima nustatyti drėgnomačiu (2 pav.) šalia esantiems nepažeistiems gaisro bei gesinimo pastatams). Nustatę medienos rūšį žinynų pagalba galima sužinoti jų tankį $\rho$, kg/m$^3$, taip pat remiantis 3 lentele ir 3 paveikslu nustatyti šilumos kiekio, reikalingo visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti, vertes $L_v$, kJ/g. Po šio tyrimo surašomi tokie duomenys (2 lentelės forma):

**2 lentelė.** Medinę konstrukciją apibūdinantys parametrai, svarbūs skaičiavimo metodikoje

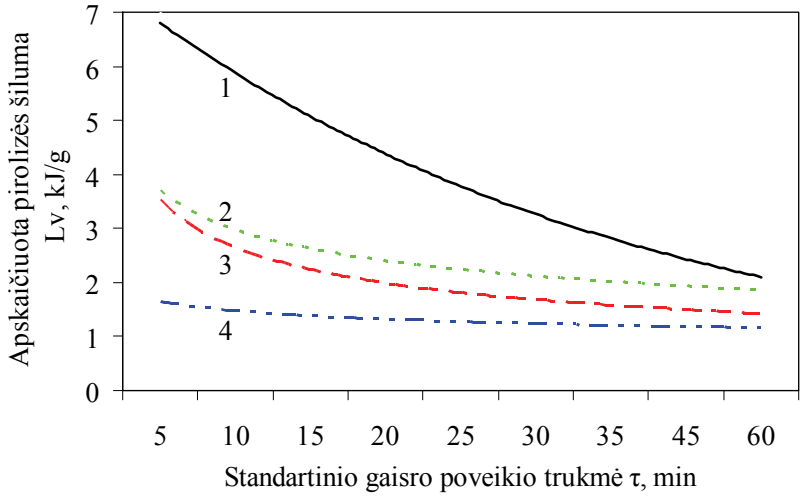
| Bandinio Nr. | Medienos rūšis ir tankis $\rho$, kg/m$^3$ | Drėgnis *w*, šimt. dalimis | Pirolizės šiluma $L_v$, kJ/g | Aps. priemonių naudojimas |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| | | | | |




**2 pav.** Drėgnomatis, matuojantis medienos drėgnį, %

**3 lentelė.** Apskaičiuotos $L_v$ reikšmės skirtingos rūšies medienai be ir su antipirenais

| Bandiniai | Tankis $\rho$, kg/m$^3$ | Pirolizės šiluma $L_v$, kJ/g |
|---|---|---|
| Spygliuočiai (eglė, pušis) | 435–455 | 1,34 |
| Lapuočiai (uosis, ąžuolas) | 680–720 | 2,07 |
| Impregnuoti spygliuočiai | 435–455 | 2,47 |
| Impregnuoti lapuočiai | 680–720 | 4,11 |




**3 pav.** Apskaičiuoto šilumos kiekio, reikalingo visiškai sausos medienos lakiesiems produktams išgarinti, pokytis standartinio gaisro sąlygomis: 1 – impregnuotai lapuočių medienai; 2 – impregnuotai spygliuočių medienai; 3 – lapuočių medienai; 4 – spygliuočių medienai

2.5 Išmatavus visus dydžius, paimami apanglėjusios medienos bandiniai. Prieš paimant bandinį, nuo šios vietos šepetėliu nuvalomos šiukšlės. Peiliu ar skalpeliu paimamas viršutinis 3–5 mm gylio anglies sluoksnis. Anglies kiekis turi būti ne mažesnis kaip 1 g. Surinkti apanglėjusios medienos bandiniai sudedami į atskiras dėžutes ar kitą tarą. Ant taros užrašomas bandinių numeris ir paėmimo vieta pagal planą ir 1 lentelės eilės numerį.

2.6 Po užpildytomis lentelėmis turi būti nurodyta, kas atrinko (pareigos), kada buvo atrinkti bandiniai (data) ir parašas. Įvykio vietos apžiūros protokole turi būti žyma apie apanglėjusios medienos bandinių atrinkimą.

2.7 Atlikus visus tyrimo veiksmus, įvykio vietos apžiūros metu turi būti surinkta: apanglėjusios medienos bandiniai; gaisravietės planas su nurodytomis bandinių atrinkimo vietomis; užpildytos duomenų lentelės; įvykio vietos apžiūros protokolas su spalvotomis nuotraukomis; aktas apie gaisrą ir kita ikiteisminio tyrimo metu surinkta medžiaga.

## 3. Tyrimo įranga

3.1 Kiekvieno anglies bandinio elektrinė varža *R*, Ω, išmatuojama, panaudojant tam skirtą specialią įrangą, esančią Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento Gaisrinių tyrimų centre (4 pav.).




**4 pav.** Anglies elektrinės varžos matavimo įranga

3.2 Priemonės reikalingos medienos anglies varžai išmatuoti:

1. Džiovinimo kamera (5 pav.), kurioje galima palaikyti ne aukštesnę kaip 105 $^{o}$C temperatūrą. Remiantis tokių tyrimų patirtimi, bandinys tolesniam tyrimui yra tinkamas praėjus 2–3 paroms po nuolatinio bandinių kondicionavimo nustatytoje temperatūroje.
2. Specialus presas (7 pav.), kuriame sudaromas 3500–5000 kg/cm$^2$ spaudimas.
3. Varžos matavimo įrenginys, kurio matavimo ribos yra 1–10$^{8–10}$ Ω.
4. Porcelianinė piesta su grūstuvu anglies bandiniams smulkinti (6 pav.).

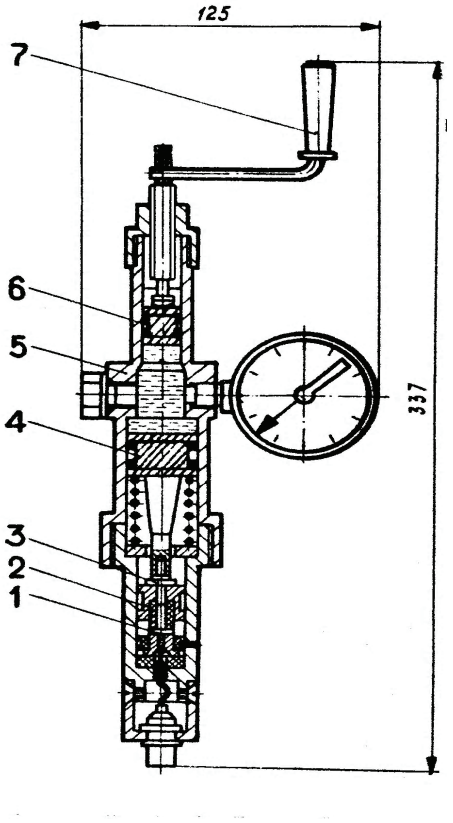
3.3 Varžos matavimo įrenginio paruošimas. Pajungiamas į tinklą įrenginys (multivoltmetras), kuriuo matuosime elektrine varžą *R*, Ω. Prietaisas kalibruojamas pagal jo eksploatavimo instrukcijos reikalavimus. Presas gnybtais sujungiamas su varžos matavimo įrenginiu kaip parodyta 4 pav.



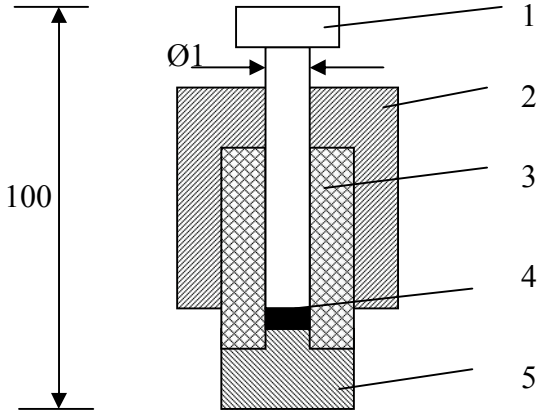
**5 pav.** Džiovinimo kamera



**6 pav.** Porcelianinė piesta su grūstuvu




**7 pav.** Preso sudėtinės dalys, pagal:
1, 2, 3 – presforma; 4, 5, 6 – slėgio kamera;
7 – rankena




**8 pav.** Presforma, skirta angliai sudėti, pagal: 1 – puansonas (HRC 55-60);
2 – nukreipiamoji; 3 – ebonitinis intarpas;
4 – anglis; 5 – pagrindas (HRC 55-60)

## 4. Apanglėjusios medienos bandinio elektrinės varžos nustatymo eiga

4.1 Bandinių paruošimas. Bandymams paruošiami visi bandiniai, jų masė neturi būti mažesnė kaip 1 g. Bandinys įdedamas į atskirą atvirą indelį. Indelis su bandiniu kondicionuojamas kamerinėje laboratorinėje krosnyje. Krosnies temperatūra neturi viršyti 105 °C. Bandinius kondicionuojame iki pastoviosios masės. Tada kiekvienas bandinys porcelianinėje piestoje su grūstuve sutrinamas iki reikiamos frakcijos. Sutrintų dalelių skersmuo turi būti ne didesnis kaip 250 μm.

4.2 Darbas su presu. Išimti iš preso presformą (8 pav.). Į ją įdėti susmulkintą anglį (300–600 mg) tiek, kad presformos pradinis aukštis be anglies (34 mm) padidėtų 4 mm – iki 38 mm. Įstatyti presformą į presą ir suspausti (pasiekti, kad preso slėgmačio

parodymai būtu 3 500–5 000 kg/cm$^2$). Užrašyti varžos matavimo įrenginio rodmenis. Išimti presformą iš preso. Išvalyti nuo anglies. Procedūra kartojama tiek, kiek yra paruošta bandinių.

4.3 Matavimo rezultatai fiksuojami specialiame matavimų žurnalo lape (1 priedas).

## 5. Duomenų, surinktų įvykio vietoje bei nustatytų laboratorinio tyrimo metu, apdorojimas

5.1 Apskaičiuojama orientacinė temperatūra bandinio atrinkimo vietoje pagal formulę:

$$T = \frac{4540}{\ln\frac{B \cdot H \cdot P}{10 - P} + 2{,}15},$$

čia $B$ – koeficientas, įvertinantis konstrukcijos storį; $H$ – medienos apanglėjimo gylis, mm; $P$ – anglies mėginio savitosios varžos dešimtainis logaritmas; $T$ – temperatūra, K.

5.2 Konstrukcijos storį įvertinantis koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$B = \frac{\sqrt{h}}{6},$$

čia $h$ – konstrukcijos elemento pradinis storis, šiluminio srauto poveikio atžvilgiu, mm.

5.3 Medienos apanglėjimo gylis apskaičiuojamas taip:

$$H = h_a + h_n,$$

čia $h_a$ – anglies gylis, mm; $h_n$ – sudegusios konstrukcijos storis, mm.

5.4 Anglies bandinio savitosios varžos dešimtainio logaritmo nustatymas: įdėjus sutrintą anglį į presformą, slankmačiu išmatuojamas anglies stulpelis 0,1 mm tikslumu. Jo aukštis lygus skirtumui tarp presformos aukščio be anglies ir aukščio su anglimi iki jis įdedamas į presą. GTC laboratorijoje presformos aukštis, neįdėjus anglies, yra 34 mm, o tarp elementų 1 ir 5 (8 pav.) yra 3 mm tarpas. Kai, įdėjus anglies į presformą, jos aukštis padidėja iki 38 mm, anglies stulpelio aukštis bus 7 mm, t. y. 0,7 cm. Presu suspaudus iki reikiamo slėgio, matuojama varža $R$, Ω. Gauta jos vertė dauginama iš išmatuotos

anglies stulpelio aukščio (0,7 cm šiuo atveju). Gautos savitosios varžos $R_s$, Ω·cm, vertės dešimtainis logaritmas ($\lg R_s = P$) bus ta vertė, kuri reikalinga skaičiavimui.

5.5 Apskaičiavus temperatūrą $T$, K, apanglėjusios medienos bandinio paėmimo vietoje (gauta temperatūros vertė $T$, K, transformuojama į temperatūrą $T_s$, °C) nustatomas išorinio šilumos srauto tankis $q_I$, kW/m$^2$, atsižvelgiant į temperatūros ir šilumos srauto tankio ryšį pagal tokią priklausomybę:

$$q_I = \left( \frac{T_s}{99{,}6} \right)^{2{,}07},$$

čia $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $T_s$ – nustatyta medienos anglėjimo temperatūra bandinio atrinkimo vietoje, °C.

5.6 Apskaičiuojamas medinės konstrukcijos apanglėjimo greitis $\beta$, mm/min, kiekvienoje atrinkto bandinio paėmimo vietoje pagal lygtį:

$$\beta = 60 \cdot \frac{1{,}234 q_I^{0.5}}{\rho(L_v + L_w \cdot w)} \cdot k_d,$$

čia $\rho$ – medienos tankis, kg/m$^3$; $q_I$ – išorinis šilumos srauto tankis, tenkantis medžiagos paviršiui nuo uždegimo šaltinio, kW/m$^2$; $L_v$ – šilumos kiekis, reikalingas visiškai sausos medienos pirolizės produktams išgarinti, kJ/g; $L_w$ – vandens išgarinimo šiluma, lygi 2.258 kJ/g; $w$ – medienos drėgnis, šimtosiomis dalimis; $k_d$ – koeficientas įvertinantis deguonies koncentraciją (= 1,2).

5.7 Orientacinė medienos apanglėjimo trukmė apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\tau_a = \frac{H}{\beta},$$

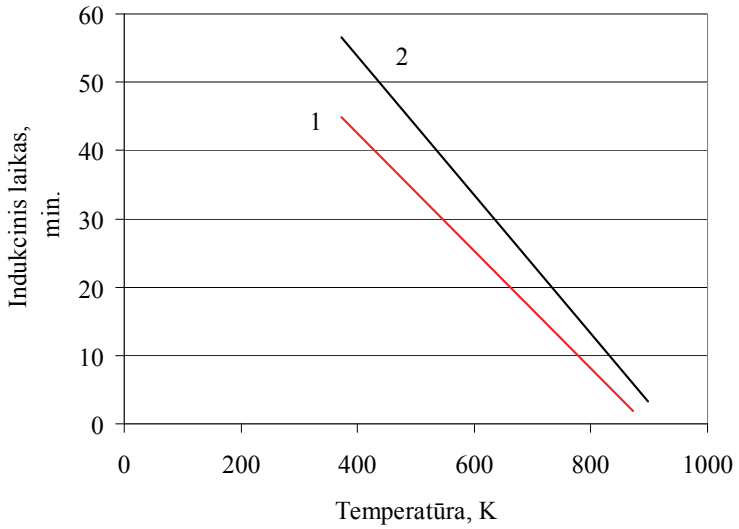
čia $H$ – medienos apanglėjimo gylis, mm; $\tau_a$ – orientacinė medienos apanglėjimo trukmė, min.

5.8 „Indukcinis laikas“ $\tau_o$, min, įvertinamas pagal išraiškas 1 arba 2 (9 pav.), priklausomai nuo nustatytos temperatūros ir nuo to ar naudojimos apsaugos priemonės:

- Jei mediena be apsaugos priemonių – $\tau_o = 77 - 0{,}086 \cdot T$;

- Jei mediena su apsaugos priemonėmis – $\tau_o = 94 - 0{,}101 \cdot T.$

Atkreiptinas dėmesys, kad „indukcinis laikas“ turi lemiamos įtakos medienos anglėjimo trukmės apskaičiavimui tik tokiu atveju, kai temperatūros poveikis medinėms konstrukcijoms yra mažesnis nei T < 900 K (627 °C).




**9 pav. „**Indukcinio laiko“ priklausomybė nuo temperatūros: 1 – medienai be apsaugos priemonių; 2 – medienai su apsaugos priemonėmis

5.9 Nustatoma bendra medienos apanglėjimo trukmė $\tau_b$, min:

$$\tau_b = \tau_a + \tau_o \,,$$

čia $\tau_a$ – medienos apanglėjimo trukmė, min; $\tau_o$ –„indukcinis laikas“, min.

5.10 Kai medinė konstrukcija suanglėjusi per visą jos storį ir yra sudegusios anglies sluoksnis $\Delta h_n$, įvertinama anglies sudegimo trukmė $\tau_{as}$, min:

$$\tau_{as} = \Delta h_n \cdot \exp(690 \cdot T^{-1}) \,.$$

5.11 Gaisro trukmė $\tau$, min, apanglėjusios medienos bandinio atrinkimo vietoje skaičiuojama pagal lygtį:

$$\tau = \tau_b + \tau_{as} = (\tau_a + \tau_o) + \tau_{as.}$$

5.12 Visos išmatuotos ir suskaičiuotos tarpinės bei galutinės parametrų vertės surašomos į apanglėjusios medienos bandinių tyrimo rezultatų lentelę (2 priedas).

Pastaba. Visi pirminiai duomenys ir skaičiavimo lygtys *Microsoft Excel* programa gali būti surašytos į bendrą skaičiavimo lentelę.

## 6. Tyrimo rezultatų vertinimas ir įforminimas

6.1 Apskaičiavus gaisro trukmę kiekvienoje apanglėjusios medienos bandinio atrinkimo vietoje, įvertinama, kuriose sudegusio medinio statinio vietose yra susitelkę ilgiausią degimo trukmę nurodę bandiniai. Tos vietos, kuriose telkiasi tokie bandiniai, apibrėžia gaisro kilimo zoną ar zonas, kiti bandiniai nurodo gaisro plitimo kelius, kuriuose, tolstant nuo gaisro kilimo vietos, medinių konstrukcijų degimo trukmė mažėja.

6.2 Tyrimo rezultatai įforminami specialisto išvadoje (SI-eil.Nr.), kurioje turi būti nurodyti visi būtini duomenys, nurodyti Ekspertizių atlikimo PAGD Gaisrinių tyrimų centre nuostatų 5-ajame skyriuje „Specialisto išvada“ .

## 7. Tyrimų saugumo technika ir patikimumas

7.1 Matavimus gaisravietėje atlikti turint visas galūnių apsisaugojimo priemones (ypač galvos ir kojų).

7.2 Draudžiama dirbti su netvarkingais elektrinės varžos matavimo įrenginiu (multivoltmetru) bei presu.

7.3 Elektrinės varžos matavimo įrenginys (multivoltmetras), preso slėgmatis, taip pat slankmatis bei metalinė liniuotė privalo turėti galiojančią metrologinę patikrą.

7.4 Be šių reikalavimų, tyrėjas dar turi vykdyti atitinkamų darbo saugos ir elektrosaugos instrukcijų reikalavimus.

1 priedas

# APANGLĖJUSIOS MEDIENOS BANDINIŲ ELEKTRINĖS VARŽOS MATAVIMŲ PROTOKOLAS

Apanglėjusios medienos bandinių atrinkimo vieta (adresas, objekto pavadinimas):

_____

Tyrimams pristatė:_____

Tyrimų data:_____

Tyrimų rezultatai:

| Eil. Nr. | Varža, Ω | Pastabos |
|---|---|---|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | | |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |
| 16 | | |
| 17 | | |
| 18 | | |
| 19 | | |
| 20 | | |
| 21 | | |
| 22 | | |
| 23 | | |
| 24 | | |
| 25 | | |
| 26 | | |
| 27 | | |
| 28 | | |
| 29 | | |
| 30 | | |

Tyrimus atliko: _____

Tyrimo rezultatų apdorojimo pavyzdys

**APANGLĖJUSIOS MEDIENOS BANDINIŲ TYRIMO REZULTATŲ LENTELĖ**

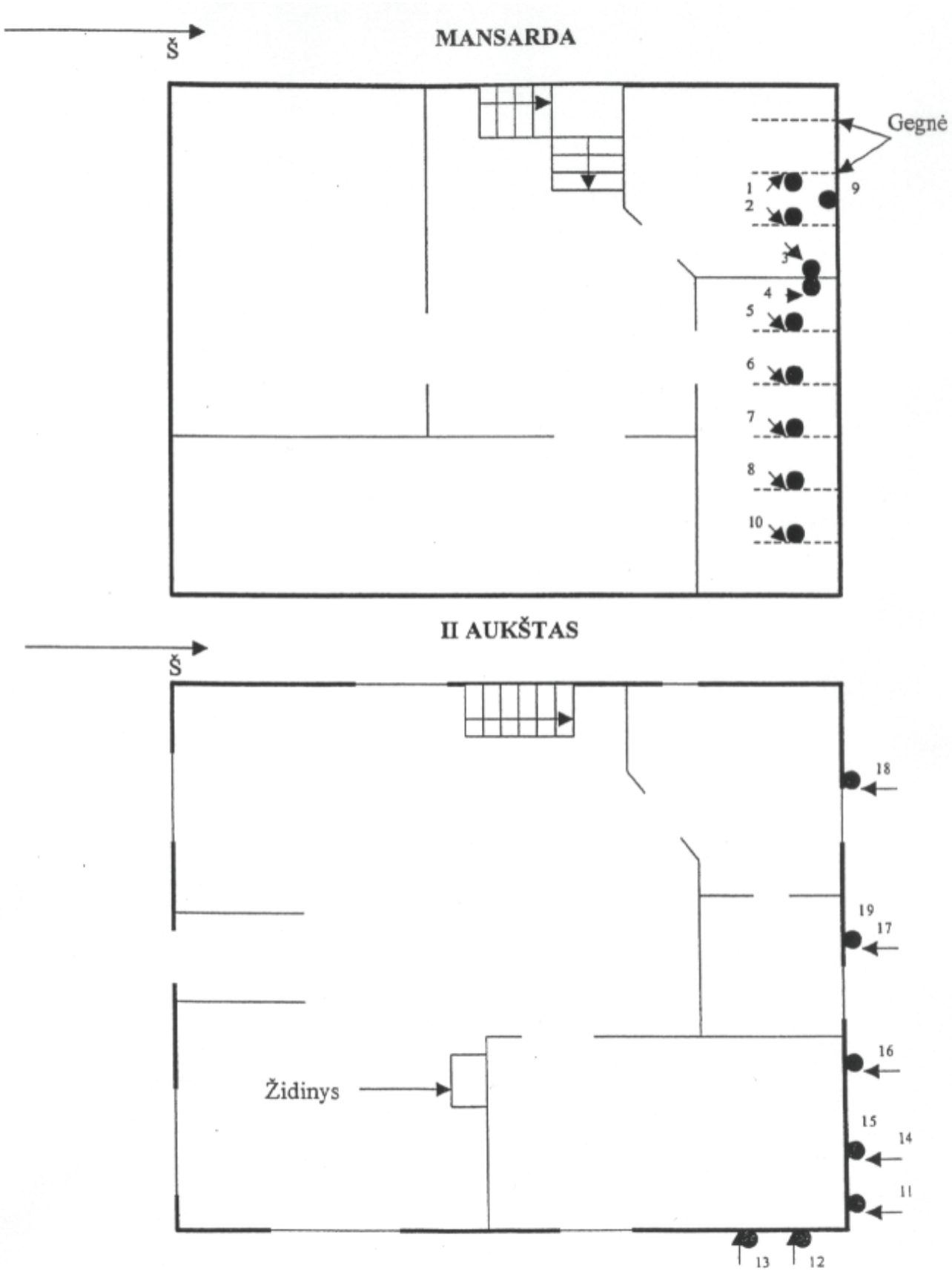
Apskaičiuota naujuoju metodu

| Nr. | $h_r$ mm | $h_{a_1}$ mm | $h_{a_2}$ mm | $\Delta h_{a_2}$ mm | $R_r$ Ω | $H_r$ mm | $B$ | $R_{s_r}$ Ω·cm | $P$ | $T_r$ K | $T_{s_r}$ °C | $q_{r_r}$ kW/m | $\rho_r$ kg/m$^3$ | $w_r$ šimt. d. | $L_{s_r}$ kJ/g | $L_{w_r}$ kJ/g | $k_d$ | $\beta_r$ mm/min. | $\tau_{a_r}$ min. | $\tau_{a_2}$ min. | $\tau_{s_r}$ min. | $\tau_{a_3}$ min. | $\tau_r$ min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 165 | 22 | 14 | 0 | 20000000 | 36 | 2,141 | 1E+07 | 7,146 | 612 | 339 | 13 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,43 | 83 | 24 | 108 | 0 | 108 |
| 2 | 165 | 4 | 17 | 0 | 470000 | 21 | 2,141 | 3E+05 | 5,517 | 737 | 464 | 24 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,60 | 35 | 14 | 49 | 0 | 49 |
| 3 | 165 | 5 | 11 | 0 | 970 | 16 | 2,141 | 679 | 2,832 | 955 | 682 | 54 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,89 | 18 | 0 | 18 | 0 | 18 |
| 4 | 165 | 37 | 11 | 0 | 5550 | 48 | 2,141 | 3885 | 3,589 | 732 | 459 | 24 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1,2 | 0,26 | 187 | 14 | 201 | 0 | 201 |
| 5 | 165 | 5 | 9 | 0 | 2350000 | 14 | 2,141 | 2E+06 | 6,216 | 751 | 478 | 26 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,61 | 23 | 12 | 35 | 0 | 35 |
| 6 | 165 | 5 | 5 | 0 | 20000000 | 10 | 2,141 | 1E+07 | 7,146 | 740 | 467 | 25 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1,2 | 0,26 | 38 | 13 | 52 | 0 | 52 |
| 7 | 165 | 25 | 8 | 0 | 150 | 33 | 2,141 | 105 | 2,021 | 902 | 629 | 45 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,82 | 40 | 0 | 40 | 0 | 40 |
| 8 | 165 | 4 | 6 | 0 | 14000000 | 10 | 2,141 | 1E+07 | 6,991 | 750 | 477 | 26 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,61 | 16 | 13 | 29 | 0 | 29 |
| 9 | 165 | 2 | 5 | 0 | 20000000 | 7 | 2,141 | 1E+07 | 7,146 | 786 | 513 | 30 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,66 | 11 | 9 | 20 | 0 | 20 |
| 10 | 165 | 5 | 8 | 0 | 26000 | 13 | 2,141 | 18200 | 4,260 | 877 | 604 | 42 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,78 | 17 | 2 | 18 | 0 | 18 |
| 11 | 165 | 36 | 9 | 0 | 1365 | 45 | 2,141 | 955,5 | 2,980 | 775 | 502 | 28 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,65 | 70 | 10 | 80 | 0 | 80 |
| 12 | 165 | 25 | 16 | 0 | 143 | 41 | 2,141 | 100,1 | 2,000 | 867 | 594 | 40 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,77 | 53 | 2 | 56 | 0 | 56 |
| 13 | 165 | 25 | 10 | 0 | 20000 | 35 | 2,141 | 14000 | 4,146 | 742 | 469 | 25 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,60 | 58 | 13 | 71 | 0 | 71 |
| 14 | 165 | 34 | 20 | 0 | 153 | 54 | 2,141 | 107,1 | 2,030 | 821 | 548 | 34 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,71 | 76 | 6 | 83 | 0 | 83 |
| 15 | 165 | 27 | 10 | 0 | 4140000 | 37 | 2,141 | 3E+06 | 6,462 | 637 | 364 | 15 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,46 | 80 | 22 | 102 | 0 | 102 |
| 16 | 165 | 27 | 11 | 0 | 7360000 | 38 | 2,141 | 5E+06 | 6,712 | 625 | 352 | 14 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,45 | 85 | 23 | 108 | 0 | 108 |
| 17 | 165 | 27 | 11 | 0 | 1066000 | 38 | 2,141 | 7E+05 | 5,873 | 658 | 385 | 16 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,49 | 77 | 20 | 98 | 0 | 98 |
| 18 | 165 | 25 | 12 | 0 | 270 | 37 | 2,141 | 189 | 2,276 | 857 | 584 | 39 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,76 | 49 | 3 | 52 | 0 | 52 |
| 19 | 165 | 4 | 4 | 0 | 905000 | 8 | 2,141 | 6E+05 | 5,802 | 854 | 581 | 39 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,75 | 11 | 4 | 14 | 0 | 14 |
| 20 | 165 | 20 | 7 | 0 | 7250000 | 27 | 2,141 | 5E+06 | 6,705 | 656 | 383 | 16 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1,2 | 0,21 | 127 | 21 | 148 | 0 | 148 |

## IŠVADA

Atlikus apanglėjusios medienos bandinių tyrimo rezultatų analizę, nustatyta, kad ilgiausia medinių konstrukcijų degimo trukmė yra Nr. 4 ir 20 pažymėtose apanglėjusios medienos bandinių patėmimo vietose, atitinkamai 201 ir 148 min. Minėtieji bandiniai atrinkti koridoriuje. Tolstant nuo šios vietos, medinių konstrukcijų degimo trukmė tolygiai mažėja.

**4 priedas. Apanglėjusios medienos bandinių paėmimo planas-schema**




● – apanglėjusios medienos bandinio paėmimo vieta

**5 priedas. Pirmojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti naujuoju metodu**

**APANGLĖJUSIOS MEDIENOS BANDINIŲ TYRIMO REZULTATŲ LENTELĖ**

Apskaičiuota naujuoju metodu

| Nr. | $h_1$, mm | $h_m$, mm | $h_d$, mm | $\Delta h_d$, mm | $R_1$, Ω | $H_1$, mm | $B$ | $R_{\lambda}$, Ω·cm | $P$ | $T_1$, K | $T_{\lambda}$, °C | $q_L$, kW/m | $\rho_1$, kg/m³ | $w_1$, šimt. d. | $L_{\lambda}$, kJ/g | $L_{w_1}$, kJ/g | $k_d$ | $\beta_1$, mm/min. | $\tau_{\alpha}$, min. | $\tau_{\sigma}$, min. | $\tau_{\lambda}$, min. | $\tau_{\alpha\sigma}$, min. | $\tau_1$, min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 60 | 0 | 15 | 0 | 1000 | 15 | 1,291 | 700 | 2,845 | 1083 | 810 | 77 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,62 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 |
| 2 | 60 | 0 | 8 | 0 | 13150 | 8 | 1,291 | 9205 | 3,964 | 1117 | 844 | 83 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,65 | 12 | 0 | 12 | 0 | 12 |
| 3 | 60 | 0 | 20 | 0 | 485 | 20 | 1,291 | 339,5 | 2,531 | 1051 | 778 | 70 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,60 | 33 | 0 | 33 | 0 | 33 |
| 4 | 60 | 0 | 17 | 0 | 145 | 17 | 1,291 | 101,5 | 2,006 | 1177 | 904 | 96 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,70 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 |
| 5 | 60 | 0 | 10 | 0 | 2350 | 10 | 1,291 | 1645 | 3,216 | 1146 | 873 | 89 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,67 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 |
| 6 | 60 | 0 | 8 | 0 | 1500 | 8 | 1,291 | 1050 | 3,021 | 1245 | 972 | 112 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,75 | 11 | 0 | 11 | 0 | 11 |
| 7 | 60 | 0 | 5 | 0 | 7750000 | 5 | 1,291 | 5E+06 | 6,734 | 958 | 685 | 54 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,52 | 10 | 0 | 10 | 0 | 10 |
| 8 | 60 | 0 | 3 | 0 | 339000 | 3 | 1,291 | 237300 | 5,375 | 1242 | 969 | 111 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,75 | 4 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| 9 | 160 | 0 | 25 | 0 | 144 | 25 | 2,108 | 100,8 | 2,003 | 960 | 687 | 54 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,32 | 77 | 0 | 77 | 0 | 77 |
| 10 | 60 | 0 | 3 | 0 | 160000 | 3 | 1,291 | 112000 | 5,049 | 1288 | 1015 | 122 | 455 | 0,12 | 2,47 | 2,26 | 1,2 | 0,79 | 4 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| 11 | 160 | 0 | 30 | 0 | 14600 | 30 | 2,108 | 10220 | 4,009 | 770 | 497 | 28 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,23 | 129 | 11 | 140 | 0 | 140 |
| 12 | 160 | 0 | 22 | 0 | 302000 | 22 | 2,108 | 211400 | 5,325 | 742 | 469 | 25 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,22 | 101 | 13 | 114 | 0 | 114 |
| 13 | 160 | 0 | 23 | 0 | 1480 | 23 | 2,108 | 1036 | 3,015 | 875 | 602 | 41 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,28 | 81 | 2 | 83 | 0 | 83 |
| 14 | 160 | 0 | 17 | 0 | 14300 | 17 | 2,108 | 10010 | 4,000 | 853 | 580 | 38 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,27 | 63 | 4 | 66 | 0 | 66 |
| 15 | 160 | 0 | 18 | 0 | 14400 | 18 | 2,108 | 10080 | 4,003 | 844 | 571 | 37 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,27 | 67 | 4 | 72 | 0 | 72 |
| 16 | 160 | 0 | 10 | 0 | 4020000 | 10 | 2,108 | 3E+06 | 6,449 | 783 | 510 | 29 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,24 | 42 | 10 | 52 | 0 | 52 |
| 17 | 160 | 0 | 15 | 0 | 149 | 15 | 2,108 | 104,3 | 2,018 | 1074 | 801 | 75 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,38 | 39 | 0 | 39 | 0 | 39 |
| 18 | 160 | 0 | 5 | 0 | 1560 | 5 | 2,108 | 1092 | 3,038 | 1235 | 962 | 109 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,46 | 11 | 0 | 11 | 0 | 11 |
| 19 | 160 | 0 | 20 | 0 | 150 | 20 | 2,108 | 105 | 2,021 | 1005 | 732 | 62 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1 | 0,35 | 58 | 0 | 58 | 0 | 58 |

IŠVADA

Atlikus apanglėjusios medienos bandinių tyrimo rezultatų analizę, nustatyta, kad ilgiausia medinių konstrukcijų degimo trukmė yra Nr. 11 ir 12 pažymėtose apanglėjusios medienos bandinių paėmimo vietose, atitinkamai 140 ir 114 min. Tolstant nuo šios vietos, medinių konstrukcijų degimo trukmė tolygiai mažėja.

**6 priedas. Pirmojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti senuoju metodu**

## APANGLĖJUSIOS MEDIENOS BANDINIŲ TYRIMO REZULTATŲ LENTELĖ

Apskaičiuota senuoju metodu

| Nr. | $h_1$, mm | $h_{n_1}$, mm | $h_{n_2}$, mm | $\Delta h_{n_1}$, mm | $R_1$, Ω | $H_1$, mm | $B$ | $X$ | $R_x$, Ω·cm | $P$ | $T_1$, °C | $T_x$, °C | $\tau_{n_1}$, min. | $\tau_{n_2}$, min. | $\tau_{b_1}$, min. | $\tau_{n_3}$, min. | $\tau_1$, min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 60 | 0 | 15 | 0 | 1000 | 15 | 1,291 | 19,365 | 700 | 2,845 | 1083 | 810 | 0 | 13 | 0 | 0 | 13 |
| 2 | 60 | 0 | 8 | 0 | 13150 | 8 | 1,291 | 10,328 | 9205 | 3,964 | 1117 | 844 | 0 | 7 | 0 | 0 | 7 |
| 3 | 60 | 0 | 20 | 0 | 485 | 20 | 1,291 | 25,820 | 339,5 | 2,531 | 1051 | 778 | 0 | 18 | 0 | 0 | 18 |
| 4 | 60 | 0 | 17 | 0 | 145 | 17 | 1,291 | 21,947 | 101,5 | 2,006 | 1177 | 904 | 0 | 13 | 0 | 0 | 13 |
| 5 | 60 | 0 | 10 | 0 | 2350 | 10 | 1,291 | 12,910 | 1645 | 3,216 | 1146 | 873 | 0 | 8 | 0 | 0 | 8 |
| 6 | 60 | 0 | 8 | 0 | 1500 | 8 | 1,291 | 10,328 | 1050 | 3,021 | 1245 | 972 | 0 | 6 | 0 | 0 | 6 |
| 7 | 60 | 0 | 5 | 0 | 7750000 | 5 | 1,291 | 6,455 | 5E+06 | 6,734 | 958 | 685 | 0 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| 8 | 60 | 0 | 3 | 0 | 339000 | 3 | 1,291 | 3,873 | 237300 | 5,375 | 1242 | 969 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 9 | 160 | 0 | 25 | 0 | 144 | 25 | 2,108 | 52,705 | 100,8 | 2,003 | 960 | 687 | 0 | 43 | 0 | 0 | 43 |
| 10 | 60 | 0 | 3 | 0 | 160000 | 3 | 1,291 | 3,873 | 112000 | 5,049 | 1288 | 1015 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 11 | 160 | 0 | 30 | 0 | 14600 | 30 | 2,108 | 63,246 | 10220 | 4,009 | 770 | 497 | 11 | 80 | 0 | 0 | 91 |
| 12 | 160 | 0 | 22 | 0 | 302000 | 22 | 2,108 | 46,380 | 211400 | 5,325 | 742 | 469 | 13 | 64 | 0 | 0 | 77 |
| 13 | 160 | 0 | 23 | 0 | 1480 | 23 | 2,108 | 48,488 | 1036 | 3,015 | 875 | 602 | 2 | 47 | 0 | 0 | 49 |
| 14 | 160 | 0 | 17 | 0 | 14300 | 17 | 2,108 | 35,839 | 10010 | 4,000 | 853 | 580 | 4 | 36 | 0 | 0 | 40 |
| 15 | 160 | 0 | 18 | 0 | 14400 | 18 | 2,108 | 37,947 | 10080 | 4,003 | 844 | 571 | 4 | 39 | 0 | 0 | 44 |
| 16 | 160 | 0 | 10 | 0 | 4020000 | 10 | 2,108 | 21,082 | 3E+06 | 6,449 | 783 | 510 | 10 | 26 | 0 | 0 | 35 |
| 17 | 160 | 0 | 15 | 0 | 149 | 15 | 2,108 | 31,623 | 104,3 | 2,018 | 1074 | 801 | 0 | 21 | 0 | 0 | 21 |
| 18 | 160 | 0 | 5 | 0 | 1560 | 5 | 2,108 | 10,541 | 1092 | 3,038 | 1235 | 962 | 0 | 6 | 0 | 0 | 6 |
| 19 | 160 | 0 | 20 | 0 | 150 | 20 | 2,108 | 42,164 | 105 | 2,021 | 1005 | 732 | 0 | 32 | 0 | 0 | 32 |

### IŠVADA

Atlikus apanglėjusios medienos bandinių tyrimo rezultatų analizę nustatyta, kad ilgiausia medinių konstrukcijų degimo trukmė yra Nr. 11 ir 12 pažymėtose apanglėjusios medienos bandinių paėmimo vietose, atitinkamai 91 ir 77 min. Tolstant nuo šių vietų įvairiomis kryptimis, medinių konstrukcijų degimo trukmė tolygiai mažėja.

**7 priedas. Apanglėjusios medienos bandinių paėmimo duomenų lentelė**

# VARĖNOS PRIEŠGAISRINĖ GELBĖJIMO TARNYBA
## VALSTYBINĖ PRIEŠGAISRINĖS PRIEŽIŪROS INSPEKCIJA

### Apanglėjusios medienos bandinių duomenų lentelė

| Nr. | Atrinkimo vieta | $h_a$, mm | $h$, mm | $h_n$, mm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 3,5 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. | 13,6 | 165 | 22 |
| 2 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo šiaurinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 3,5 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. | 17 | 165 | 4 |
| 3 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo rytinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 2,2 m atstumu nuo pietinės sienos. | 10,7 | 165 | 5 |
| 4 | Koridoriuje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo rytinės pertvaros. Koridoriaus sienos rąstai ąžuoliniai. | 11,2 | 165 | 37 |
| 5 | Koridoriuje, nuo šiaurinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo rytinės pertvaros. | 8,5 | 165 | 5 |
| 6 | Koridoriuje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo rytinės pertvaros. Koridoriaus sienos rąstai ąžuoliniai. | 5,2 | 165 | 5 |
| 7 | Koridoriuje, nuo šiaurinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo rytinės pertvaros. | 8 | 165 | 25 |
| 8 | Vakariniame gyvenamajame kambaryje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 2,5 m atstumu nuo rytinės pertvaros. | 6,1 | 165 | 4 |
| 9 | Vakariniame gyvenamajame kambaryje, nuo šiaurės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 2,5 m atstumu nuo rytinės pertvaros. | 4,9 | 165 | 2 |
| 10 | Virtuvėje, nuo pietinės pertvaros vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. | 7,5 | 165 | 5 |
| 11 | Virtuvėje, nuo vakarinės pertvaros vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 1 m atstumu nuo pietinės pertvaros. | 9,4 | 165 | 36 |
| 12 | Virtuvėje, nuo vakarinės pertvaros vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo šiaurinės sienos. | 16,2 | 165 | 25 |
| 13 | Virtuvėje, nuo šiaurinės sienos vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,7 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. | 9,8 | 165 | 25 |
| 14 | Virtuvėje, nuo rytinės pertvaros vidinio paviršiaus, 1,2 m aukštyje, 0,25 m atstumu nuo šiaurinės sienos | 22 | 165 | 34 |
| 15 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 0,5 m aukštyje, 3,5 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. | 9,7 | 165 | 27 |
| 16 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 0,5 m aukštyje, 3,5 m atstumu nuo rytinės sienos. | 11,1 | 165 | 27 |
| 17 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 0,5 m aukštyje, 2 m atstumu nuo rytinės sienos. | 11 | 165 | 27 |
| 18 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo rytinės sienos vidinio paviršiaus, 0,5 m aukštyje, 1 m atstumu nuo pietinės sienos. | 11,5 | 165 | 25 |
| 19 | Rytiniame gyvenamajame kambaryje, nuo šiaurinės sienos vidinio paviršiaus, 0,5 m aukštyje, 2,6 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. | 4,1 | 165 | 4 |
| 20 | Koridoriuje, nuo pietinės sienos vidinio paviršiaus, 1,5 m aukštyje, 0,5 m atstumu nuo vakarinės pertvaros. Koridoriaus sienos rąstai ąžuoliniai. | 6,9 | 165 | 20 |

**8 priedas. Antrojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti senuoju metodu**

## APANGLĖJUSIOS MEDIENOS BANDINIŲ TYRIMO REZULTATŲ LENTELĖ

Apskaičiuota senuoju metodu

| Nr. | $h_1$, mm | $h_n$, mm | $h_a$, mm | $\Delta h_n$, mm | $R_1$, Ω | $H_1$, mm | $B$ | $X$ | $R_x$, Ω·cm | $P$ | $T_1$, K | $T_x$, °C | $\tau_0$, min. | $\tau_d$, min. | $\tau_A$, min. | $\tau_{ak}$, min. | $\tau_r$, min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 165 | 22 | 14 | 0 | 20000000 | 36 | 2,141 | 77,071 | 14000000 | 7,146 | 612 | 339 | 24 | 173 | 0 | 0 | 198 |
| 2 | 165 | 4 | 17 | 0 | 470000 | 21 | 2,141 | 44,958 | 329000 | 5,517 | 737 | 464 | 14 | 63 | 0 | 0 | 77 |
| 3 | 165 | 5 | 11 | 0 | 970 | 16 | 2,141 | 34,234 | 679 | 2,832 | 955 | 682 | 0 | 28 | 0 | 0 | 28 |
| 4 | 165 | 37 | 11 | 0 | 5550 | 48 | 2,141 | 102,762 | 3885 | 3,589 | 732 | 459 | 14 | 146 | 0 | 0 | 160 |
| 5 | 165 | 5 | 9 | 0 | 2350000 | 14 | 2,141 | 29,972 | 1645000 | 6,216 | 751 | 478 | 12 | 40 | 0 | 0 | 53 |
| 6 | 165 | 5 | 5 | 0 | 20000000 | 10 | 2,141 | 21,409 | 14000000 | 7,146 | 740 | 467 | 13 | 30 | 0 | 0 | 43 |
| 7 | 165 | 25 | 8 | 0 | 150 | 33 | 2,141 | 70,649 | 105 | 2,021 | 902 | 629 | 0 | 64 | 0 | 0 | 64 |
| 8 | 165 | 4 | 6 | 0 | 14000000 | 10 | 2,141 | 21,409 | 9800000 | 6,991 | 750 | 477 | 13 | 29 | 0 | 0 | 41 |
| 9 | 165 | 2 | 5 | 0 | 20000000 | 7 | 2,141 | 14,986 | 14000000 | 7,146 | 786 | 513 | 9 | 18 | 0 | 0 | 27 |
| 10 | 165 | 5 | 8 | 0 | 26000 | 13 | 2,141 | 27,831 | 18200 | 4,260 | 877 | 604 | 2 | 27 | 0 | 0 | 28 |
| 11 | 165 | 36 | 9 | 0 | 1365 | 45 | 2,141 | 96,339 | 955,5 | 2,980 | 775 | 502 | 10 | 120 | 0 | 0 | 130 |
| 12 | 165 | 25 | 16 | 0 | 143 | 41 | 2,141 | 87,776 | 100,1 | 2,000 | 867 | 594 | 2 | 86 | 0 | 0 | 89 |
| 13 | 165 | 25 | 10 | 0 | 20000 | 35 | 2,141 | 74,931 | 14000 | 4,146 | 742 | 469 | 13 | 103 | 0 | 0 | 116 |
| 14 | 165 | 34 | 20 | 0 | 153 | 54 | 2,141 | 115,607 | 107,1 | 2,030 | 821 | 548 | 6 | 127 | 0 | 0 | 134 |
| 15 | 165 | 27 | 10 | 0 | 41400000 | 37 | 2,141 | 79,212 | 2898000 | 6,462 | 637 | 364 | 22 | 160 | 0 | 0 | 182 |
| 16 | 165 | 27 | 11 | 0 | 7360000 | 38 | 2,141 | 81,353 | 5152000 | 6,712 | 625 | 352 | 23 | 173 | 0 | 0 | 196 |
| 17 | 165 | 27 | 11 | 0 | 10660000 | 38 | 2,141 | 81,353 | 746200 | 5,873 | 658 | 385 | 20 | 151 | 0 | 0 | 171 |
| 18 | 165 | 25 | 12 | 0 | 270 | 37 | 2,141 | 79,212 | 189 | 2,276 | 857 | 584 | 3 | 80 | 0 | 0 | 83 |
| 19 | 165 | 4 | 4 | 0 | 905000 | 8 | 2,141 | 17,127 | 633500 | 5,802 | 854 | 581 | 4 | 17 | 0 | 0 | 21 |
| 20 | 165 | 20 | 7 | 0 | 7250000 | 27 | 2,141 | 57,804 | 5075000 | 6,705 | 656 | 383 | 21 | 108 | 0 | 0 | 128 |

## IŠVADA

Atlikus apanglėjusios medienos bandinių tyrimo rezultatų analizę, nustatyta, kad ilgiausia medinių konstrukcijų degimo trukmė yra Nr. 1 ir 15-17 pažymėtose apanglėjusios medienos bandinių paėmimo vietose, atitinkamai 197 ir 182, 196 ir 171 min. Tolstant nuo šių vietų įvairiomis kryptimis, medinių konstrukcijų degimo trukmė tolygiai mažėja.

**9 priedas. Antrojo pavyzdžio tyrimo rezultatai apskaičiuoti naujuoju metodu**

**APANGLĖJUSIOS MEDIENOS BANDINIŲ TYRIMO REZULTATŲ LENTELĖ**

Apskaičiuota naujuoju metodu

| Nr. | $h_1$ mm | $h_{ak}$ mm | $h_{ek}$ mm | $\Delta h_{ek}$ mm | $R_1$ Ω | $H_1$ mm | $B$ | $R_{ek}$ Ω·cm | $P$ | $T_1$ K | $T_{ek}$ °C | $q_{1,}$ kW/m | $\rho_1$ kg/m$^3$ | $w_1$ šimt. d | $L_{ek}$ kJ/g | $L_{wk}$ kJ/g | $k_d$ | $\beta_1$ mm/min. | $\tau_{ak}$ min. | $\tau_{ek}$ min. | $\tau_k$ min. | $\tau_{ekk}$ min. | $\tau_1$ min. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 165 | 22 | 14 | 0 | 20000000 | 36 | 2,141 | 1E+07 | 7,146 | 612 | 339 | 13 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,43 | 83 | 24 | 108 | 0 | 108 |
| 2 | 165 | 4 | 17 | 0 | 470000 | 21 | 2,141 | 3E+05 | 5,517 | 737 | 464 | 24 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,60 | 35 | 14 | 49 | 0 | 49 |
| 3 | 165 | 5 | 11 | 0 | 970 | 16 | 2,141 | 679 | 2,832 | 955 | 682 | 54 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,89 | 18 | 0 | 18 | 0 | 18 |
| 4 | 165 | 37 | 11 | 0 | 5550 | 48 | 2,141 | 3885 | 3,589 | 732 | 459 | 24 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1,2 | 0,26 | 187 | 14 | 201 | 0 | 201 |
| 5 | 165 | 5 | 9 | 0 | 2350000 | 14 | 2,141 | 2E+06 | 6,216 | 751 | 478 | 26 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,61 | 23 | 12 | 35 | 0 | 35 |
| 6 | 165 | 5 | 5 | 0 | 20000000 | 10 | 2,141 | 1E+07 | 7,146 | 740 | 467 | 25 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1,2 | 0,26 | 38 | 13 | 52 | 0 | 52 |
| 7 | 165 | 25 | 8 | 0 | 150 | 33 | 2,141 | 105 | 2,021 | 902 | 629 | 45 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,82 | 40 | 0 | 40 | 0 | 40 |
| 8 | 165 | 4 | 6 | 0 | 14000000 | 10 | 2,141 | 1E+07 | 6,991 | 750 | 477 | 26 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,61 | 16 | 13 | 29 | 0 | 29 |
| 9 | 165 | 2 | 5 | 0 | 20000000 | 7 | 2,141 | 1E+07 | 7,146 | 786 | 513 | 30 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,66 | 11 | 9 | 20 | 0 | 20 |
| 10 | 165 | 5 | 8 | 0 | 26000 | 13 | 2,141 | 18200 | 4,260 | 877 | 604 | 42 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,78 | 17 | 2 | 18 | 0 | 18 |
| 11 | 165 | 36 | 9 | 0 | 1365 | 45 | 2,141 | 955,5 | 2,980 | 775 | 502 | 28 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,65 | 70 | 10 | 80 | 0 | 80 |
| 12 | 165 | 25 | 16 | 0 | 143 | 41 | 2,141 | 100,1 | 2,000 | 867 | 594 | 40 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,77 | 53 | 2 | 56 | 0 | 56 |
| 13 | 165 | 25 | 10 | 0 | 20000 | 35 | 2,141 | 14000 | 4,146 | 742 | 469 | 25 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,60 | 58 | 13 | 71 | 0 | 71 |
| 14 | 165 | 34 | 20 | 0 | 153 | 54 | 2,141 | 107,1 | 2,030 | 821 | 548 | 34 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,71 | 76 | 6 | 83 | 0 | 83 |
| 15 | 165 | 27 | 10 | 0 | 4140000 | 37 | 2,141 | 3E+06 | 6,462 | 637 | 364 | 15 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,46 | 80 | 22 | 102 | 0 | 102 |
| 16 | 165 | 27 | 11 | 0 | 7360000 | 38 | 2,141 | 5E+06 | 6,712 | 625 | 352 | 14 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,45 | 85 | 23 | 108 | 0 | 108 |
| 17 | 165 | 27 | 11 | 0 | 1066000 | 38 | 2,141 | 7E+05 | 5,873 | 658 | 385 | 16 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,49 | 77 | 20 | 98 | 0 | 98 |
| 18 | 165 | 25 | 12 | 0 | 270 | 37 | 2,141 | 189 | 2,276 | 857 | 584 | 39 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,76 | 49 | 3 | 52 | 0 | 52 |
| 19 | 165 | 4 | 4 | 0 | 905000 | 8 | 2,141 | 6E+05 | 5,802 | 854 | 581 | 39 | 455 | 0,12 | 1,34 | 2,26 | 1,2 | 0,75 | 11 | 4 | 14 | 0 | 14 |
| 20 | 165 | 20 | 7 | 0 | 7250000 | 27 | 2,141 | 5E+06 | 6,705 | 656 | 383 | 16 | 720 | 0,12 | 2,07 | 2,26 | 1,2 | 0,21 | 127 | 21 | 148 | 0 | 148 |

IŠVADA

Atlikus apanglėjusios medienos bandinių tyrimo rezultatų analizę, nustatyta, kad ilgiausia medinių konstrukcijų degimo trukmė yra Nr. 4 ir 20 pažymėtose apanglėjusios medienos bandinių paėmimo vietose, atitinkamai 201 ir 148 min. Minėtieji bandiniai atrinkti koridoriuje. Tolstant nuo šios vietos, medinių konstrukcijų degimo trukmė tolygiai mažėja.