

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Aleksandrs BOIKO**

**CISTERNVAGONU AR IZBEIGUŠOS KALPOŠANAS TERMIŅU  
PALIEKOŠA RESURSA NOVĒRTĒŠANA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2013**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Dzelzceļa transporta institūts

**Aleksandrs BOIKO**

Doktora studiju programmas „Transports” doktorants

**CISTERNVAGONU AR IZBEIGUŠOS KALPOŠANAS TERMIŅU  
PALIEKOŠA RESURSA NOVĒRTĒŠANA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. sc. ing., asoc.profesors  
**D.SERGEJEVS**

**Rīga 2013**

UDK 629.4.014.7  
629.4.083

Boiko A. Cisternvagonu ar izbeigušos kalpošanas termiņu paliekoša resursa novērtēšana.

Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2013.-38 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU TMF Aeronautikas institūtā 2013.gada 03.jūlija lēmumu, protokols Nr.5/2013



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā  
«Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai-2».

This work has been supported by the European Social Fund within the project  
«Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University-2».

**ISBN 978-9934-507-46-5**

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU  
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013. gada 09. decembrī, plkst. 14:30 Rīgas Tehniskās universitātes, Transporta un satiksmes zinātnes nozares Promocijas padomes „RTU P-22” atklātajā sēdē Rīgā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. Auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr. habil. sc. ing., Vitālijs Pavelko  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Asociētais Profesors, Dr. sc. ing., Vitālijs Beresņevičs  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr. habil. sc. ing., Marijonas Bogdevičius  
Viļņas Gedimina Tehniskā universitāte, Lietuva

**APSTIPRINĀJUMS**

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu (vai cita) doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Aleksandrs Boiko .....(Paraksts)

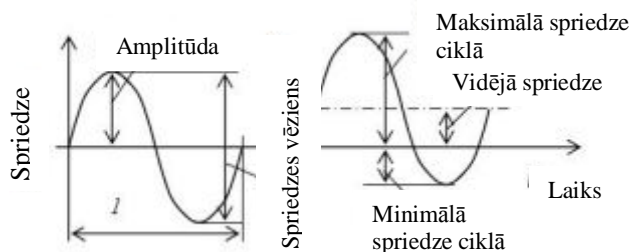
Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, Secinājumus, Literatūras sarakstu, 10 pielikumus, 147 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 175 lappuses. Literatūras sarakstā ir 76 nosaukumi.

## Termini

Termini saskaņoti ar LZA Akadēmiskā terminu datubāzi AkadTerm [<http://termini.lza.lv/index.php?category=9>] un VAS Latvijas dzelzceļš terminu vārdnīcu.

- 1) paliekošais resurss – objekta (ritošā sastāva, tā mezglu un agregātu) summārā nostrāde no tā tehniskā stāvokļa kontroles momenta līdz pārejai robežstāvoklī; Nesošais elements ar minimālo atlikušo resursu nosaka cisternvagona resursu kopumā.
- 2) noteiktais kalpošanas termiņš – ekspluatācijas kalendārais ilgums, kuru sasniedzot ekspluatācija ir jāpārtrauc neatkarīgi no tā tehniskā stāvokļa;
- 3) kalpošanas termiņš - ekspluatācijas kalendārais ilgums no objekta ekspluatācijas sākuma vai tās atjaunošanas pēc remonta līdz pārejai robežstāvoklī;
- 4) ekspluatācija – izstrādājuma dzīves cikla stadija, kurā tiek īstenota, uzturēta un atjaunota tā kvalitāte, ar kādu notiek izstrādājuma izmantošana atbilstoši tā mērķim;
- 5) cikliska slodze – to raksturo (nejaušas) slodzes amplitūdas izmaiņas, kas atkārtojas noteiktā laika intervālā (sk. T1 att.).
- 6) vēziens (spriedzei) – summārais amplitūdas lielums no minimālās līdz maksimālai nozīmei (neņemot vērā zīmes) (sk. T1 att.).



T1.attēls.

- 7) kalpošanas termiņa pagarināšana – ritošā sastāva jauna kalpošanas ilguma noteikšana;
- 8) robežstāvoklis – ritošā sastāva stāvoklis, kura gadījumā tā tālākā ekspluatācija nav pieļaujama vai nav racionāla, var arī tā darbaspējīga stāvokļa atjaunošana nav iespējama vai racionāla;
- 9) vagona īpašnieks – fiziska vai juridiska persona, kurai ir dzelzceļa ritošā sastāva īpašumtiesības;
- 10) dzelzceļa ritošais sastāvs – velkošie transporta līdzekļi (lokomotīves), vagoni, pašgājēji un citi transporta līdzekļi, kas paredzēti pasažieru, bagāžas, kravu, kravas bagāžas un pasta sūtījumu pārvadājumiem pa dzelzceļu;
- 11) vagona kārtējais atkabināšanas remonts; TR: remonts, ko veic, lai nodrošinātu vai atjaunotu kravas vagona darbaspējas, nomainot vai atjaunojot atsevišķas detaļas uz specializētiem ceļiem. Pēc kravas vagona stāvokļa, tā darba traucējumu atklāšanas un atkabināšanas vietas, kārtējais atkabināšanas remonts tiek iedalīts:  
- kārtējais vagona remonts; TR-1: bezkravas vagona remonts, ko veic, to sagatavojot pārvadājumam, atkabinot no ritošā sastāva vai vagonu grupas, padodot uz speciāliem ceļiem ar pārvešanu uz nestrādājošo parku. Turklāt pārvešanas uz nestrādājošo vagonu parku, kas pieder infrastruktūras administrācijai vai īpašniekam, personīgo vagonu, kas pierakstīti dzelzceļa administrācijai, kārtību nosaka šī dzelzceļa administrācija vai infrastruktūras īpašnieks;  
- kārtējais vagona remonts; TR -2: kravas vagona ar kravu vai bez kravas remonts ar atkabināšanu no tranzīta vilcieniem un vilcieniem, kas ieradušies uz sadali, vai no noformētiem sastāviem, to pārvešana uz nestrādājošu parku ar padevi uz specializētiem ceļiem.

- 12) vagona depo remonts (tālāk DR) – remonts, ko veic, lai novērstu bojājumus vai daļēji atjaunotu vagona resursus ar ierobežotas nomenklatūras sastāvdaļu nomaiņu vai atjaunošanu un sastāvdaļu tehniskā stāvokļa kontroli;
- 13) kapitālais remonts ar lietderīgās izmantošanas termiņa pagarināšanu (tālāk KRP) – visu vagona konstrukciju nesošo elementu tehniskā stāvokļa kontrole ar vagona resursu pilnīgu vai tuvu pilnīgai atjaunošanai, jebkuru tā sastāvdaļu, ieskaitot bāzes elementu nomaiņu un atjaunošanu un jauna noteikta kalpošanas termiņa noteikšanu.
- 14) cisternvagona nesošie elementi – cisternvagona nesošie elementi ir katls, vagona rāmis, ratiņu rāmis, ratiņu rāmja virsatsperes sija. Dotajā darbā ratiņu rāmis un ratiņu rāmja virsatsperes sija netiek aplūkota. Nesošais elements ar minimālo paliekošo resursu nosaka cisternvagona resursu kopumā.

## Darba aktualitāte

Latvijas dzelzceļa kravas vagonu parkā no drošības viedokļa visbīstamākie ir cisternvagoni, kas pārvadā šķidrās un ugunsnedrošas kravas. Darbā tiek aplūkoti četru asu cisternvagoni, kuriem cikliskā slodzē ir pagājis kalpošanas termiņš. Cisternvagoni ir paredzēti saskaņā ar pieņemtajām Normām [1] pēc noteiktajiem slodzes režīmiem un tiem piemīt prasītā stiprības rezerve ražotāja noteiktā kalpošanas termiņā – 32 gadu laikā. Saskaņā ar normatīvajiem dokumentiem cisternvagonu kalpošanas termiņu var pagarināt līdz pusotram termiņam, tādējādi tiek noteikta kalpošanas termiņa pagarināšana līdz 48 gadiem. Tomēr novecojošā parka un pastāvošās plānveida depo un kapitālo remontu veikšanas sistēmas apstākļos noguruma nesošo elementu bojājumi (dotajā darbā tiek aplūkoti tikai katla un rāmja bojājumi) parādās jau garantijas starpremonta perioda (2-3 gadi) pirmajos mēnešos [2], pieaugot kalpošanas termiņam to daudzums tikai palielinās. Bojājumi tiek novērsti saskaņā ar Kravas vagonu remonta instrukciju [3]. Pēc Krievijas Dzelzceļa datiem [4] 5 gadu laikā no 2001. līdz 2005. gadam cisternvagonu atkabināšanas no sastāva to nosūtīšanai tekošajam remontam daļa veido 17.3 % no kopējā atkabināmo skaita atklātu bojājumu dēļ. Pēc VAS Latvijas dzelzceļš datiem cisternvagonu atkabināšanas skaits kārtējam remontam sastāda ap 0.5 % no kopējā pieņemto vagonu skaita, kas apskatīti ekspluatācijā un pierakstīti dažādām valstīm. Tomēr cisternvagonu kalpošanas termiņu atkabināšanas skaits, kas nosūtīts kārtējam remontam, ar katru gadu palielinās. 2012. gadā salīdzinājumā ar 2011. gadu to daudzums palielinājās par 4 %, no tiem 57 % tika atkabināti no dzelzceļa sastāviem Latvijas dzelzceļa teritorijā, kas kopumā sastādīja vairāk kā 500 cisternvagonu. Tādēļ nepieciešams noskaidrot cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu nesošo elementu noguruma bojājumu rašanās iemeslus un atklāt papildus noslogojuma režīmu pastāvēšanas iespējamību, kas pazemina cisternvagona nesošo elementu (katla un rāmja) stiprību un paliekošo resursu, kā arī izanalizēt remonta kvalitāti un metināto šuvju kvalitātes ietekmi uz cisternvagona resursu.

Pastāvošās ritošā sastāva ekspluatācijas bojājumu kontroles un informācijas ievākšanas sistēmas nenodrošina informācijas ievākšanu par cisternvagona katla un rāmja noguruma bojājumiem. Tādēļ nepieciešams veikt ekspluatācijā esošo cisternvagonu noguruma bojājumu plūsmas izpēti un izstrādāt jaunas pieejas un metodes cisternvagonu diagnosticēšanai VAS Latvijas dzelzceļš ekspluatācijas apstākļos un ieviest atbilstošus papildinājumus cisternvagonu diagnosticēšanas metodikā ar mērķi pagarināt to kalpošanas termiņu, kuru ir noteikusi ražotājrūpnīca.

Šobrīd saskaņā ar Noteikumiem par kravas vagonu, kas kursē starptautiskā satiksmē, kalpošanas termiņa pagarināšanu [5] un Vienotiem metodiskajiem norādījumiem par vagonu tehnisko diagnosticēšanu [6] cisternvagonu paliekošā kalpošanas termiņa (resursa) novērtēšanai nepieciešami ievērojami izdevumi, jo nepieciešama resursu triecienizmēģinājumu veikšana, kuru izpildes laikā vagoni tiek novesti līdz sagravei, pēc kā to izslēdz no ekspluatācijas. Tādēļ lietderīgi ir izvērtēt cisternvagonu paliekošo resursu aprēķinu ceļā, analītiski, nesošo elementu (katla un rāmja) atlikušās stiprības novērtēšanai izmantojot galīgo elementu aprēķina programmas (Nastran, SolidWorksSimulation, ANSYS u.c.). Tādēļ aktuāla ir cikliski noslogojamu cisternvagonu atlikušā resursa noteikšanas metodikas izveide. Metodikā katrai noguruma bojājumu zonai ir jāizvēlas atbilstoša resursa aprēķina metode, kas ņem vērā atšķirīgo noslogojuma raksturu, kas izraisa bojājumus šajā zonā.

Izstrādātā dzelzceļa cikliski noslogojamu cisternvagonu atlikušā resursa noteikšanas metodika var tikt izplatīta arī uz citiem ritošā sastāva veidiem. Lai to izstrādātu, nepieciešams veikt statistisku ekspluatācijas bojājumu apstrādi, aprēķināt konstrukcijas stiprību kopumā un detalizēti bojājumu zonās. Teorētiskie pētījumi atlikušā resursa novērtēšanas metodes izvēles jomā ir attiecināmi uz katru cisternvagonu bojājumu zonu.

## Darba mērķis un uzdevumi

*Promocijas darba mērķis* ir izveidot cikliski noslogojamu cisternvagonu ar izbeigušos kalpošanas termiņu atlikušā resursa analītiskās noteikšanas metodikas, lai paaugstinātu cisternvagonu ekspluatācijas drošību garantijas starpremontu periodā.

Lai sasniegtu minēto mērķi, nepieciešams risināt šādus uzdevumus:

1. Savākt datus par cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu ekspluatācijas bojājumiem, veikt cisternvagonu bojājumu analīzi, noteikt to sadalījuma garantijas starpremonta periodos likumsakarības, novērtēt kārtējā remontu ietekmi uz bojājumu plūsmu.
2. Izstrādāt cisternvagona rāmja un katla galīgo elementu aprēķina modeli, izpildīt stiprības normatīvos aprēķinus ar mērķu noteikt paaugstināta noslogojuma galvenās zonas.
3. Atklāt cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu nesošo elementu bojājumu rašanās iemeslus, izpildot stiprības variatīvos aprēķinus.
4. Pamatot atlikušā resursa aprēķina metodi katrai cisternvagonu bojājumu zonai, izpildīt šo zonu resursa aprēķinu, novērtēt remonta kvalitātes ietekmi uz resursu.
5. Izstrādāt cisternvagonu diagnosticēšanas papildus metodiku un iespējamo bojājumu izvietojuma kartes, ieskaitot noguruma bojājumus.
6. Izstrādāt metodiku cikliski noslogojamu cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu paliekošā resursa novērtēšanai.

## Pētījuma metodes

Galvenie pētījuma uzdevumi tika risināti, izmantojot savākto datu par cisternvagonu ekspluatācijas bojājumiem statistisko apstrādi. Cisternvagonu nesošo elementu stiprības aprēķinos tika izmantota mūsdienīga galīgo elementu programma SolidWorks Simulation. Kopējās stiprības izpēte un paaugstinātas cisternvagonu spriedzes zonu atklāšana novirzē no normatīvajiem slodzes režīmiem, kas noteikti Stiprības aprēķinu normās [1], tika veikta pēc izveidotā cisternvagona rāmja un katla aprēķina modeļa.

Bojājumu zonām tika veikti aprēķinu eksperimenti plaisu un lūzumu ietekmes uz cisternvagona nesošo konstrukciju izvērtēšanai. Stiprības aprēķini [7] tika veikti cisternvagoniem pirms remonta un pēc remonta (ar nostiprinošām uzlikām, kas izgatavotas pēc spēkā esošo dokumentu prasībām: Remonta instrukcijas [3] un Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas [8]). Tāpat tika izpildīti stiprības aprēķini dažādiem nostiprināšanas variantiem [9,10], kas sastopami ekspluatācijā. Bojājumu un noslogojuma koncentratoru zonas aprēķina modelī modelētas detalizētāk.

Izstrādātas rekomendācijas aprēķinu modeļu rezultātu nolasīšanai bojājumu zonās ar iespēju veikt iegūto rezultātu sekojošu pārbaudi un salīdzināšanu ar izmēģinājuma rezultātiem.

Analītiskiem aprēķiniem atlikušā resursa noteikšanai tika izmantota aprēķinu programma MathCad.

Veiktās datu par cisternvagonu bojājumiem statistiskās apstrādes rezultāti un pēc izveidotā modeļa veikto aprēķinu eksperimentu rezultāti tika salīdzināti ar vagonu izmēģinājumu rezultātiem un ar citu autoru rezultātiem [11].

## **Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti**

### **Promocijas darba zinātniskā novitāte:**

1. Ir noteiktas cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu noguruma bojājumu sadalījuma likumsakarības VAS Latvijas dzelzceļš apstākļos.
2. Pamatota cisternvagona palikušā resursa noteikšanas metode katrai noguruma bojājumu zonai atkarībā no noslogojuma, kas izraisa bojājumus, un tās atkārtošanās: no atsevišķiem trieciena noslogojumiem līdz mazciklisku un daudzciklisku noslogojuma režīmiem. Izvērtēta tās precizitāte pēc ekspluatācijas datiem par bojājumu rašanās termiņiem.
3. Papildināta cisternvagonu diagnosticēšanas metodika, ņemot vērā esošajā normatīvajā dokumentācijā neuzskaitītos bojājumus, kas atklāti ekspluatācijā VAS Latvijas dzelzceļš apstākļos. Ieviestie papildinājumi ļauj ātrāk un precīzāk novērtēt nesošo elementu palikušo stiprību ar mērķi pagarināt noteikto kalpošanas termiņu.
4. Izstrādātā cikliski noslojamu cisternvagonu palikušā resursa noteikšanas metodika, ņemot vērā atklātos papildus noslogojuma režīmus (sānu šūpošanās, ārpusstata balstīšanās uz gulšņu balstiem), kas ļauj noteikt cisternvagona palikušo resursu jebkurā ekspluatācijas posmā.

### **Promocijas darba galvenie rezultāti, kas izvirzīti aizstāvēšanai:**

1. Noteiktas cisternvagonu noguruma bojājumu zonas un novērtēta esošās plānveida remontu sistēmas efektivitāte pēc izpildītās datu par cisternvagonu bojājumiem statistiskās apstrādes rezultātiem.
2. Atklāti cisternvagonu nesošo elementu bojājumu galvenie iemesli (noslogojuma režīmi) garantijas starpremontu periodā.
3. Aprēķinu ceļā novērtēta stiprība un palikušais resurss cisternvagonu katla un rāmja noguruma bojājumu zonās.
4. Atklāta remontdarbu kvalitātes ietekme uz cikliski noslojamu cisternvagonu katla un rāmja elementu palikušo resursu.
5. Sniegtas rekomendācijas par metināšanas darbu organizāciju un uzraudzību, veicot remontu atjaunojošos veidus.
6. Veikta katla un rāmja balsta elementu un nostiprinošo uzliku formas optimizācija cisternvagona rāmja konsoles daļā noslogojuma stāvokļa samazināšanai, minimizējot to masu.
7. Sastādītas cisternvagonu ekspluatācijas bojājumu kartes ar noguruma bojājumu zonām, kas sašķīrotas rašanās biežuma garantijas starpremontu periodā pieaugošā secībā.

### **Pētījuma īpatnības ir šādas:**

1. Ir precizēti normatīvie noslogojuma aprēķina režīmi, novērtējot cisternvagonu nesošo elementu stiprību. Atklāts papildus sānu šūpošanās režīms, kas ir galvenais faktors, kas izraisa plaisas pulkas sijas vertikālajā sienīņā savienojumos ar pamatsiju.
2. Pamatoti cisternvagona katla stiprinājuma rāmī galvenā mezgla ekspluatācijas bojājumu iemesli (fasonķepas pie rāmja plātnēm). Variatīvie stiprības aprēķini ir apstiprinājuši perpendikulārās metinātās šuves, piemētot fasonķepas pie katla apmales gredzena, kvalitātes un garuma ietekmi uz plaisu ietekmi dotajā savienojumā.

## Praktiskais pielietojums

Izstrādātā metodika cikliski noslogojamu cisternvagonu palikušā resursa noteikšanai un cisternvagonu diagnostikas metodikas papildinājumi, cisternvagona rāmja un katla aprēķinu modeļi ļauj:

1. atklāt noguruma bojājumus agrīnākā attīstības stadijā (veicot vizuālu un instrumentāli tehnisku (defektoskopija) cisternvagonu apskati), kas samazinās noguruma bojājumu daudzumu kalpošanas termiņā, ko noteikusi izgatavotājrūpnīca, un garantijas starpremonta periodā;
2. paaugstināt remonta kvalitāti (ņemot vērā papildinājumus un rekomendācijas par metināto šuvju kvalitāti un izpildījumu);
3. samazinās neplānoto (atkabināšanas) remontu skaitu un izdevumus par kravu pārkraušanu.

Izstrādātā metodika palikušā resursa noteikšanai var tikt izmantota, izgatavojot un projektējot citus ritošā sastāva veidus. Metodikas galvenais virziens ir cisternvagoni ar pagājušu kalpošanas termiņu, ko noteikusi izgatavotājrūpnīca.

Atklātās cisternvagonu noguruma bojājumu plūsmu sadales likumsakarības ļauj novērtēt bojājumu daudzumu starpremontu ekspluatācijas termiņā un koriģēt nākamā plānveida remonta veidu (depo vai kapitālais), lai uzturētu cisternu drošu tehnisko stāvokli prognozējamā ekspluatācijas termiņā VAS Latvijas dzelzceļš apstākļos.

Palikušā resursa noteikšanas pamatotā metode [12,13] izvirza jautājumu par trieciena resursu izmēģinājumu veikšanu ar cisternvagonu iznīcināšanu, kas īpaši aktuāli īpašniekiem ar mazu vagonu skaitu.

Ieteicamās darbības metināšanas darbu organizācijā un uzraudzībā [14-16] var tikt izmantotas vagonu remonta depo, veicot atjaunojošos remontu veidus.

Optimizētās katla un rāmja balsta elementu un nostiprinošo uzliku optimizētās formas [17-20], kas izpildītas, izmantojot aprēķinu programmu EDAOpt [21-23] un SolidWorks Simulation, var tikt izmantotas, veicot atjaunojošos remontus un projektējot jaunus vagonus.

## Ieviešana

Balstoties uz veikto pētījumu par cikliski noslogojamu cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu palikušo resursu [12], ir sagatavoti un iesniegti priekšlikumi Latvijas dzelzceļa administrācijā Normu [1] papildināšanai to iesniegšanai Krievijas dzelzceļa transporta zinātniski pētnieciskā institūta Ritošā sastāva dinamikas un stiprības nodaļā, kā arī sagatavoti priekšlikumi Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas [3] papildināšanai to iesniegšanai Dzelzceļa Administrācijas vagonu saimniecības pilnvarotajiem speciālistiem Dzelzceļa transporta komisijas padomē (šobrīd priekšlikumi (sk. A1 pielikumu) atrodas SIA „LDZ Ritošā sastāva serviss” izskatīšanā). Tie ir šādi:

1. Piedāvāts papildināt spēkā esošo Normu 2. sadaļu (Aprēķinu spēku normas un aprēķinu režīmi) ar papildus sānu šūpošanas režīmu, izvērtējot kravas vagonu konstrukcijas stiprību. Sānu šūpošanas režīmu piedāvāts ieviest kā normatīvu, respektīvi, tā ievērošanai ir jābūt obligātai.
2. Piedāvāts papildināt spēkā esošās Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas 5.8 sadaļas (Cisternas) 5.8.40. punktu ar apakšpunktu (c) saistībā ar fasonķepu pie cisternvagona katla apmales gredzena metinātās šuves garuma kontroli. Priekšlikumu piedāvāts ieviest kā normatīvu, respektīvi, tā ievērošanai ir jābūt obligātai.
3. Piedāvāts papildināt spēkā esošās Normas [1] ar papildus katla apmales gredzena balstīšanos uz augšējiem guļbaļķu balstiem (centrālo balstu nodiluma gadījumā), lai

novērtētu cisternvagonu konstrukcijas stiprību. Noslogojuma režīmu, kad katla apmales gredzens balstās uz augšējiem guļbaļķu balstiem, tiek piedāvāts ieviest kā papildus režīms.

4. Piedāvāts papildināt uzziņu 2653 (par veicamajiem remontdarbiem) un bojājumu kodu tabulu, satiksmes formas 1354 par iziešanu no remonta, Dzelzceļa administrācijas Inženierijas skaitļošanas centra elektronisko datu bāzi ar informāciju par cisternvagonu nesošo elementu (katla un rāmja) noguruma bojājumiem, kas atklājami ekspluatācijā un pirms plānveida remontu veikšanas. Piedāvāts ievākt datus par noguruma starptautiskā satiksmē kursējošu cisternvagonu noguruma bojājumiem.

## **Darba aprobācija**

Par promocijas darba galvenajiem sasniegumiem un rezultātiem tika ziņots, saņemot pozitīvu vērtējumu, šādās starptautiskās zinātniski tehniskās konferencēs:

1. VIII International Conference on the Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes Conference, 5-12 December 2009, Hurgada, Egypt.
2. Starptautiskajā zinātniskajā simpozijā “Сварка и родственные технологии”, Минск, Белоруссия, 24 martā 2010.g.
3. IX starptautiskajā zinātniskā-tehniska konferencē “ВИБРАЦИЯ-2010. Управляемые вибрационные технологии и машины”, Курск, Россия, 12 - 14 мая 2010 года“.
4. 7th International DAAAM Baltic Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING”, Tallinn, Estonia”, Aprilī 22-24, 2010.
5. International Conference "Strength of Materials and Structure Elements" dedicated to the 100th birthday Georgy S. Pisarenko, 28 – 30 September 2010, Kyiv, Ukraine.
6. 7th International Symposium „Surface Engineering. New Powder Composition Materials. Welding”, 2nd Part, 23-25 March 2011, Minsk, Belarus.
7. 8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING 19-21 April 2012, Tallinn, Estonia.
8. 10<sup>th</sup> International Scientific Conference NOMATEX-2012, 12-14 September 2012, Minsk, Belarus.
9. 11th International Conference Vibroengineering 2012, 11-12 October 2012, Kaunas, Lithuania.
10. 2013 International Conference on MEMS and Mechanics (MEMSM 2013) 15-16 March 2013, Wuhan, China.

## **Publikācijas**

Galvenie rezultāti, kas iegūti promocijas darbā, un atsauces izmantotas šādās zinātniskās publikācijās:

1. Januševskis A., Meļņikovs A., Boiko A. “Shape Optimization of Mounting Disk of Railway Vehicle Measurement System”, Journal of Vibroengineering. - 12. (2010) 436.-442. lpp. (starptautiskā datu bāzē SCOPUS)

2. Boiko A., Auziņš J., Januševskis J. „Cisternvagona stiprības novērtējums pie daudzciklu slogojuma”, RTU Zinātniskie raksti.– Mašīnzinātne un transports. 6. sērija. Mehānika. 28.sējums (2008), 115.-120. lpp. (starptautiskā datu bāzē EBSCO)
3. Boiko A., Januševskis A., Meļņikovs A., Vučetičs I. „Vagona mērīšanas sistēmas konstruktīvās formas optimizācija. Constructive Shape Optimization of Wagon Measurement System”, RTU Zinātniskie raksti, 6.sērija, 33.sējums (2010), 78.-82.lpp. (starptautiskā datu bāzē EBSCO)
4. A.Boiko „Influence of barrel damages on life time of tank wagon, Katla bojājumu ietekme uz vagona cisternas kalpošanas termiņu”, Proceedings of 8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING 19-21 April 2012, Tallinn, Estonia, p.21.-26. (starptautiskā datu bāzē ISI WEB of SCIENCE)
5. Auziņš J., Boiko A., Januševskis A., Januševskis J., Kovaļska A., Meļņikovs A., Pfafrods J. „Mehānisko sistēmu modelēšanas, identifikācijas un daudzkritēriālās optimizācijas metožu un līdzekļu izstrāde mašīnu un mehānismu dinamikas laboratorijā. Development of methods and tools for simulation, identification and multiobjective optimization of mechanical systems at the machine and mechanism dynamics laboratory”, RTU 147. jubilejas zinātnisko rakstu krājums (2009), RTU Izdevniecība, lpp. 19 - 26. ISSN 1407-8015
6. Boiko A., Balckars P., Auziņš J., Meļņikovs A. „Remonta stiprinājumu efektivitātes vērtējums cisternvagona fasonķepu zonā. Effectiveness evaluation of the repairs strengthening in the zone of shaped body support of the tank car”, RTU Zinātniskie raksti, 6.sērija, 32.sējums (2009), 12.-17.lpp. ISSN 1407-8015
7. A.Boiko, P.Balckars „Cisternvagona rāmja bojājumu un remonta kvalitātes analīze pamatsijas un pulkas sijas savienojumā”, RTU Zinātniskie raksti, 6 lpp. (pieņemts publicēšanai). ISSN 1407-8015
8. Бойко И.Ю., Бойко А.Ф. „Повышение эффективности ремонтной сварки вагона-цистерны”, Международный симпозиум “Сварка и родственные технологии”, 24 марта 2010 года, Минск, Белоруссия, 81.-85. lpp.
9. А.В.Янушевскис, А.Г.Мельников, А.Ф.Бойко „Методика оптимизации формы элементов механических систем проектируемых средствами САД/САЕ: промышленные примеры”, Труды 5ой международной научно-технической конференции „Современные проблемы машиностроения”, 23-26 ноября 2010, Томск, Российская Федерация, стр.524-530. (starptautiskā datu bāzē VINITI)
10. Boiko A., Boiko I. „Влияние сварочных ремонтных работ на прочность рамы вагона-цистерны”, Proceedings of 7th International Symposium „Surface Engineering. New Powder Composition Materials. Welding”, 2nd Part, 23-25 March 2011, Minsk, Belarus, pp. 233 - 239.
11. Бойко А., Бойко И. “Влияние ремонтных сварочных работ на срок службы вагона-цистерны”, 10th International Scientific Conference NOMATEX-2012, 12-14 September 2012, Minsk, Belarus, pp. 300-303
12. A.Boiko “Determination of resource reducing a of tank wagons on the Latvian railway due to fatigue damages”, the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni
13. Vladimir Gonca, Svetlana Polukoshko, Yuriy Shvab, Aleksandrs Boiko, “Multilayers spherical control hinge characteristics optimization”, 11th International Conference Vibroengineering 2012, 11-12 October 2012, Kaunas, Lithuania, 8 lpp., Vibromechanika. Journal of Vibroengineering, (starptautiskā datu bāzē SCOPUS) (pieņemts publicēšanai).

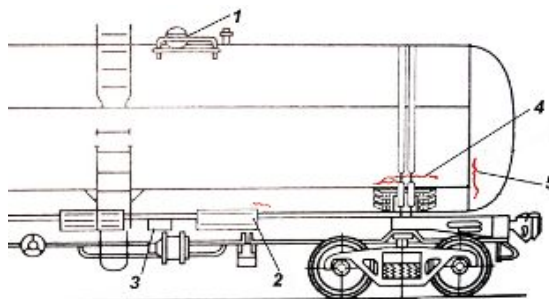
14. Janushevskis, A. Melnikovs, A. Boyko “Shape Optimization of 3D Mechanical Systems Using Metamodels”, 2013 International Conference on MEMS and Mechanics (MEMSM 2013) March 15-16, 2013, Wuhan, China, in Journal Advanced Materials Research Vol. 705, (2013), pp. 429-435, Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1022-6680, (starptautiskā datu bāzē SCOPUS).
15. Janushevskis A., Melnikovs A., Boiko A. Dzelzceļa vagonu cisternu balsta fasonķepu formas optimizācija. Scientific Journal of RTU: Transport and Engineering. Series 6. Rīga: Riga Technical University. 5 pages. (pieņemts publicēšanai).

## Promocijas darba apjoms un struktūra

Promocijas darbs sastāv no ievada un 7 nodaļām, nobeiguma ar galvenajiem rezultātiem un secinājumiem, desmit pielikumiem un literatūras saraksta (76 nosaukumi). Kopējais darba apjoms ir 175 lappuses datorrakstā ar 147 attēliem.

### Īss darba apraksts

**Pirmajā nodaļā** veikta Latvijas dzelzceļa kravas vagonu noslogojuma ekspluatācijas analīze, kuras rezultātā visnalogotākie izrādījās cisternvagoni, kuriem ievākti dati par atkabināšanu kārtējam remontam. Apkopotie dati par četru asu cisternvagonu rāmju un katla bojājumiem [24], pēc katla korozijas ātruma, atkarībā no pārvadājamo kravu veida [25], pēc materiāla un metinājumu savienojumu defektu veidiem [LVS EN ISO 5817] un pēc metināšanas šuvju kvalitātes kontroles veidiem [14,15,16] ekspluatācijā un garantijas starpremonta termiņā (1. att.).

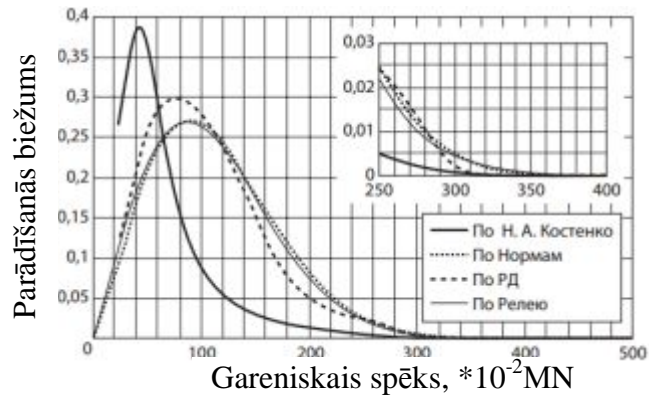


1.att. Cisternvagona katla bojājumu zonas: 1. – lūkas metinātās šuves; 2 – fasonķepu metinātās šuves; 3 – noliešanas ierīces metinātās šuves; 4 – katla apmales gredzena metinātās šuves pie guļbaļķu balstiem; 5 – dibena metinātās šuves.

Veikts pārskats un analīze par pēdējo gadu laikā vadošo pētniecisko institūtu un universitāšu virknes autoru veiktajiem pētījumiem par kravas vagonu paliekošā resursa novērtējumu [26-30].

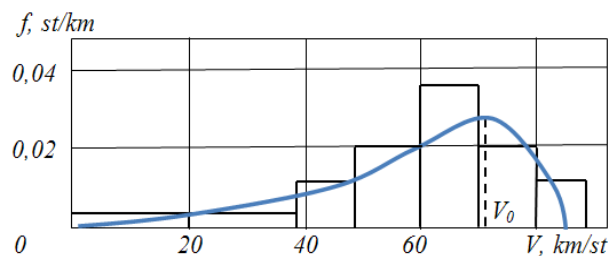
Paliekošā resursa esamības novērtējumi pēc formulas, izmantojot datus par biezumiem, kas norādīti dokumentācijā, noved pie būtiskām kļūdām aprēķinos. Paliekošais resurss var tikt novērtēts, ņemot vērā naftas uzņēmumu prasības, ko nosaka pēc esošajiem datiem par materiālu un pārvadājamās kravas ietekmi uz korozijas nolietojumu [43-52]. Darbā [28] ir piedāvāts noteikt paliekošo resursu vienkāršotā veidā caur korozijas nolietojumu vai nobraukuma datiem, balstoties uz metāla triecienu viskozitātes novērtējumu, savukārt darbā [42], ņemot vērā kārtējā atjaunojošā remonta izpildes ekonomiskās efektivitātes rādītājus.

Tomēr efektīvāk ir noteikt slodzi, kas izraisa bojājumus un tā biežumu ekspluatācijā (2a att.) [30], tad izvēlēties slodžu sadalījuma likumu un, veicot tās vai citas slodzes ietekmes vērtējumu un tās atkārtotanos konkrētā konstrukcijas mezglā, pēc kā var veikt resursa aprēķinu, vadoties pēc atsevišķām slodzēm, atkārtotām slodzēm līdz  $10^5$  cikliem (mazcikliska slogošana) un vairāk par  $10^5$  cikliem (daudzcikliska slogošana).



2a.att. Garenisko spēku sadales pēc Normu datiem [1], kas iedarbojas uz kravas vagoniem ekspluatācijas laikā, salīdzinājums ar citiem sadales veidiem un salīdzinājumā ar Releja sadali.

Lai noteiktu esošo slodzes režīmu atkārtēšanos, izmanto arī kustības ātrumu atkārtēšanos ekspluatācijā analīzi (2b att.) [31] ar sekojošu Lognormālā likuma vai Veibula likuma lietošanu lai aprakstītu stabilizējušu noslogojuma režīmu atkārtējamības sadalījumu.



2b.att. Kravas vagonu iespējamo ātrumu sadales blīvums

Mehāniskus bojājumus un plaisu rašanos parasti apraksta ar Veibula sadalījuma likumu [40].

Mūsdienā saskaņā ar spēkā esošiem Noteikumiem par kravas vagonu un refrižeratora vagonu kalpošanas termiņa pagarināšanu [5] zinātniskais centrs „Vagoni” un citi līdzīgi centri izstrādāja un pielieto tehniskas diagnosticēšanas un kalpošanas termiņa pagarināšanas iespējamības novērtēšanas metodiku [41] sekojošā apjomā:

1. Tehniskā stāvokļa apsekošana ņemot vērā ekspluatācijas apstākļus, kas ietver arī vagonu konstrukcijas pamata nesošo elementu biezuma mērīšana.
2. Vagonu ekspluatācijas intensitātes novērtēšana.
3. Statiskais galīgo elementu aprēķins ņemot vērā biezumu ekspluatācijas samazinājumu sakarā ar koroziju un nodilumu, lai atrastu noslogotākus konstrukcijas mezglu elementus.
4. Apsēkotās vagonu grupas kontroles izmēģinājumi.

Veikta spēkā esošo normatīvu – tehniskās dokumentācijas [1,3,5,6,8,32-35] analīze, kas reglamentē cisternu paliekošā resursa novērtēšanas kārtību, veicot resursu triecienizmēģinājumus.

Tika salīdzinātas mašīnbūves konstrukciju izturības noguruma novērtējuma metodes saskaņā ar Krievijas Federācijas Satiksmes ministrijas dzelzceļa ritošā sastāva ar sliežu platumu 1520 mm normatīvajiem dokumentiem [1] un ar Eiropas standartiem [53] un rokasgrāmatu „FKM-guidline Analytical strength assessment” [54].

Veiktā analītiskā apskata rezultātā noteikts pētījuma mērķis:

Darba mērķis: izpētīt cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu pakļautību bojājumiem un remonta kvalitāti ar mērķi izstrādāt cisternvagona paliekošā resursa pie cikliska noslogojuma analītiskās noteikšanas metodiku, lai paaugstinātu cisternvagonu ekspluatācijas drošumu starpremontu periodā.

Veiktais analītiskais apskats ļauj izdarīt šādus secinājumus:

- Tā kā cisternvagoni ir vieni no noslogotākajiem un tie pārvadā bīstamas kravas, pret tiem izvirzītas paaugstinātas drošības prasības, tādēļ darbā par pētījuma objektu izvēlēts četru asu cisternvagonu naftas produktu pārvadāšanai, kam veikts atbilstošs paliekošā resursa novērtējums pie cikliska noslogojuma.
- Nesošo elementu stiprība cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas termiņu plānveida remontos tiek atjaunota saskaņā ar Remonta instrukciju [3], tomēr noguruma plaisas parādās atkal garantijas starpremontu periodā. Vagonu atkabināšanas no vilcieniem skaits to nosūtīšanai kārtējam remontam sakarā ar atklātajiem bojājumiem pēdējo gadu laikā pieaug. Tādēļ nepieciešams paaugstināt plānveida remontu izpildes kvalitāti.
- Eksploatācijas laikā katla korozijas ātrums atkarībā no pārvadājamās kravas veida var mainīties no normatīvās nozīmes 0.05 mm gadā līdz par 0.5 mm gadā.
- Lai veiksmīgi diagnosticētu dažādus katla un rāmja metināto šuvju bojājumus un materiāla defektus šuvju zonā, nepieciešams izvēlēties efektīvu metināto savienojumu kvalitātes kontroles veidu.
- Saskaņā ar veiktu pārskatu par konstrukciju paliekošā resursa noteikšanas izmantojamajām metodēm nepieciešams izvēlēties efektīvāku cisternvagonu paliekošā resursa novērtēšanas metodi katrai bojājumu zonai atsevišķi, ņemot vērā sloģošanas lielumu un atkārtosšanās biežumu, kas izraisa noguruma bojājumus šajās zonās.
- Spēkā esošās dokumentācijas [1,3,5,6,8], kas ir tikusi izstrādāti pirms vairākiem gadu desmitiem ar sekojošiem papildinājumiem un izmēģinājumu rezultātiem, kas veikti pēc aprēķināto sloģošanas režīmu normatīviem [1], analīzes rezultātā noskaidrots, ka saskaņā ar šo dokumentāciju noguruma bojājumi, kas parādās vagoniem ar pagājušu kalpošanas termiņu, netiek atklāti. Tādēļ nepieciešams izstrādāt priekšlikumus un papildinājumus spēkā esošai dokumentācijai, lai radītu jaunu metodiku cisternvagonu ar pagājušu kalpošanas ilgumu paliekošā resursa noteikšanai pie cikliska noslogojuma.
- Paliekošā resursa novērtējums būs iespējams, ja tiks atklāti iemesli, kādēļ rodas bojājumi starpremontu periodā, un izstrādāti papildinājumi cisternvagonu diagnosticēšanas metodikai ar mērķi noteikti konstrukciju nesošo elementu paliekošo stiprību.

**Otrajā nodaļā** veikta 374 cisternvagonu bojājumu statistiskā analīze. Cisternvagoni tika ekspluatēti Latvijas dzelzceļa apstākļos. Cisternvagoni tika izgatavoti no 1964. gada līdz 1980. gadam, tātad atrodas ekspluatācijā no 29 līdz 46 gadiem. Cisternvagonu parks saskaņā ar VAS Latvijas dzelzceļš datiem ietver četru un astoņu asu vagonus. Uz 2012. gadu to kopējais skaits bija 1216 (sk. 1. tabulu). Kalpošanas termiņš cisternvagoniem ir **32** gadi. Saskaņā ar remonta sistēmu noteikumiem starpremontu periods ir 3 gadi (pēc DR remonta) un 8 gadi (pēc KR remonta).

1. tabula

Nr. p/k	Rādītāji	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	Vagoni dzelzceļa rīcībā*	10729	10140	7326	5290	5225	5256	5228	6043	6038
2	<i>tai skaitā:</i> segtie	1956	1586	1398	1327	1308	1294	1288	1589	1589
3	platformas	992	1090	883	97	95	74	74	74	74
4	pusvagoni	1883	1767	1462	1183	1163	1138	1125	1125	1121
5	cisternas	2325	1813	1311	1222	1220	1219	1217	1217	1216 un līdz 2012g.

No tiem 1063 – četru asu un 153 – astoņu asu. Izplatītākie četru asu cisternvagonu modeļi ir:

“15-1443” - 671 vagoni (un modeļi “15-1443-80” - 42 vagoni ar KRP),

“15-11863” - 152 vagoni (un modeļi “15-11863” - 91 vagoni ar KRP).

Starp astoņu asu cisternvagoniem visizplatītākie ir šādi modeļi::

“15-871-6” - 107 vagoni (un modeļi “15-871” - 6 vagoni).

“15-1500” - 42 vagoni.

Bojājumu esamība tika pārbaudīta 309 „15-1443” modeļa cisternvagoniem un 55 „15-11863” modeļa cisternvagoniem, kā arī 10 „15-871-6” modeļa cisternvagoniem. Vagonu nostrāde bija no 29 līdz 46 gadiem. Apsekoto cisternvagonu skaits no kopējā VAS Latvijas dzelzceļš kravas parkā esošajiem cisternvagoniem parādīts 2. tabulā.

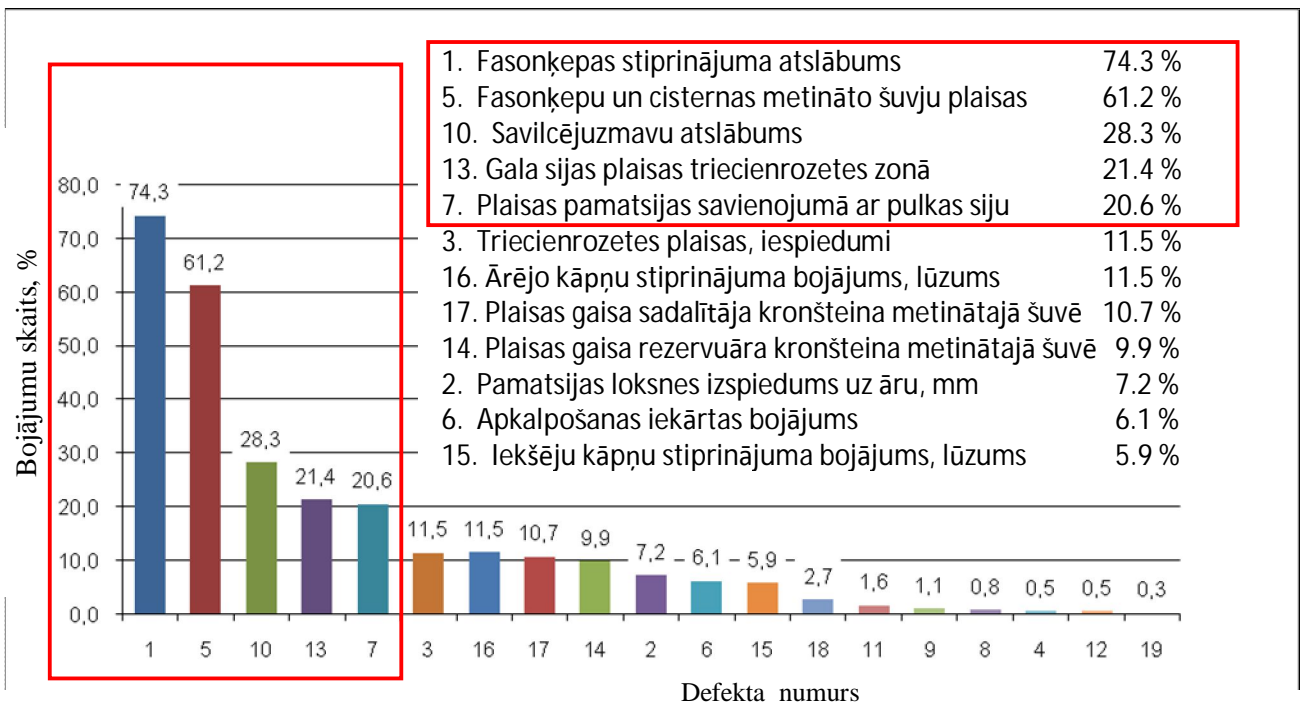
2. tabula

Nr.	Modelis	Vagonu skaits parkā	Apsekoto vagonu skaits	Apsekoto vagonu īpatsvars, %
1	15-1443	671	309	46
2	15-11863	152	55	36
3	15-871-6	107	10	9

Pēc atklāto bojājumu trīs cisternvagonu modeļos veiktās statistiskās analīzes iegūti dati par cisternvagonu katlu un rāmju bojājumu sadali dilstošā secībā pēc defekta nozīmīguma. Bojājumu skaits pa gadiem uzrādīts 3. tabulā. Atklāto bojājumu veidi grafiski attēloti 3. attēlā.

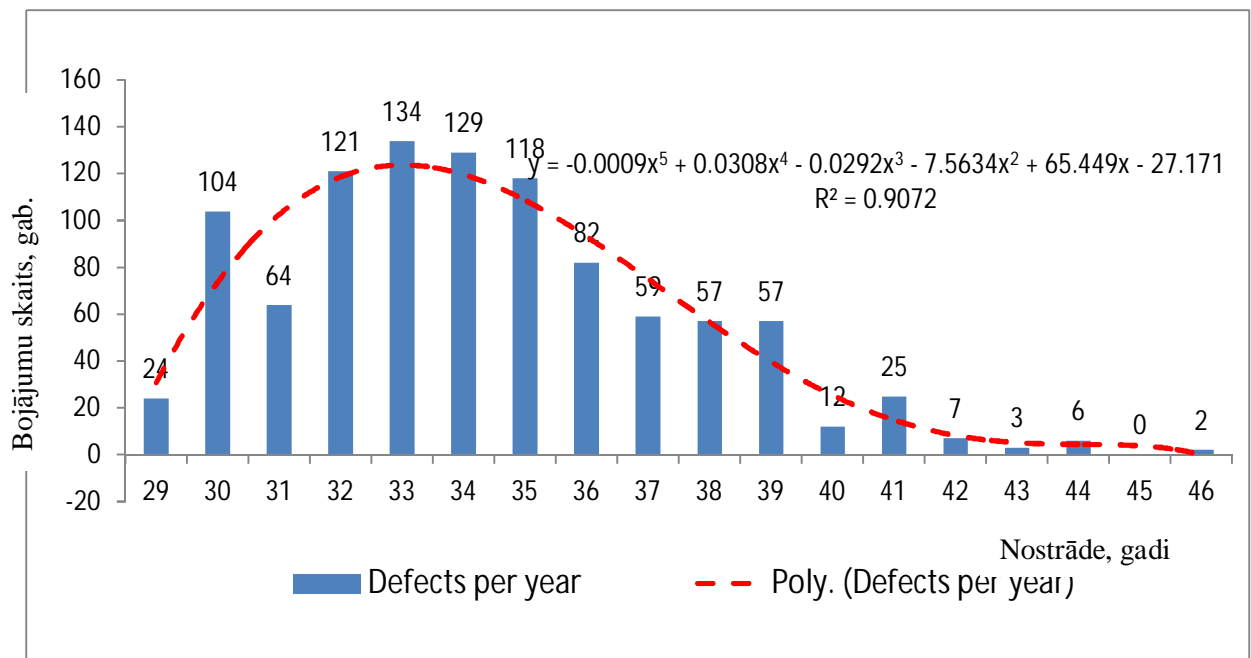
3. tabula

Nostrāde, gads	Bojājumu skaits pavisam	Vagonu daudzums pēc gadiem	Bojājumu skaits uz vienu vagonu
1	2	3	4
29	24	6	4.00
30	104	37	2.81
31	64	26	2.46
32	121	50	2.42
33	134	50	2.68
34	129	49	2.63
35	118	40	2.95
36	82	27	3.04
37	59	21	2.81
38	57	25	2.28
39	57	17	3.35
40	12	41	0.29
41	25	8	3.13
42	7	2	3.50
43	3	1	3.00
44	6	1	6.00
45	0	1	0.00
46	2	1	2.00



3.att. Bojājumu sadalījums attiecībā pret kopējo apsekotās vagonu partijas skaitu 374 cisternvagonu apjomā

Iegūtās bojājumu sadales likumsakarības kopējā četru asu cisternvagonu skaitā un atsevišķiem cisternvagonu bojājumiem ļauj novērtēt defektu parādīšanās laiku cisternvagonu katlu fasonķepās un prognozēt to parādīšanos nākamajā starpremontu periodā (sk. 4.att.).



4.att. Cisternvagonu izlases bojājumu sadalījums atkarībā no nostrādes

Ekspluatācijas bojājumu apstrādes rezultāti atklāja, ka cisternvagona katla galvenie defekti un to parādīšanās zonas ir:

1. Fasonķepu stiprinājuma atslābums;

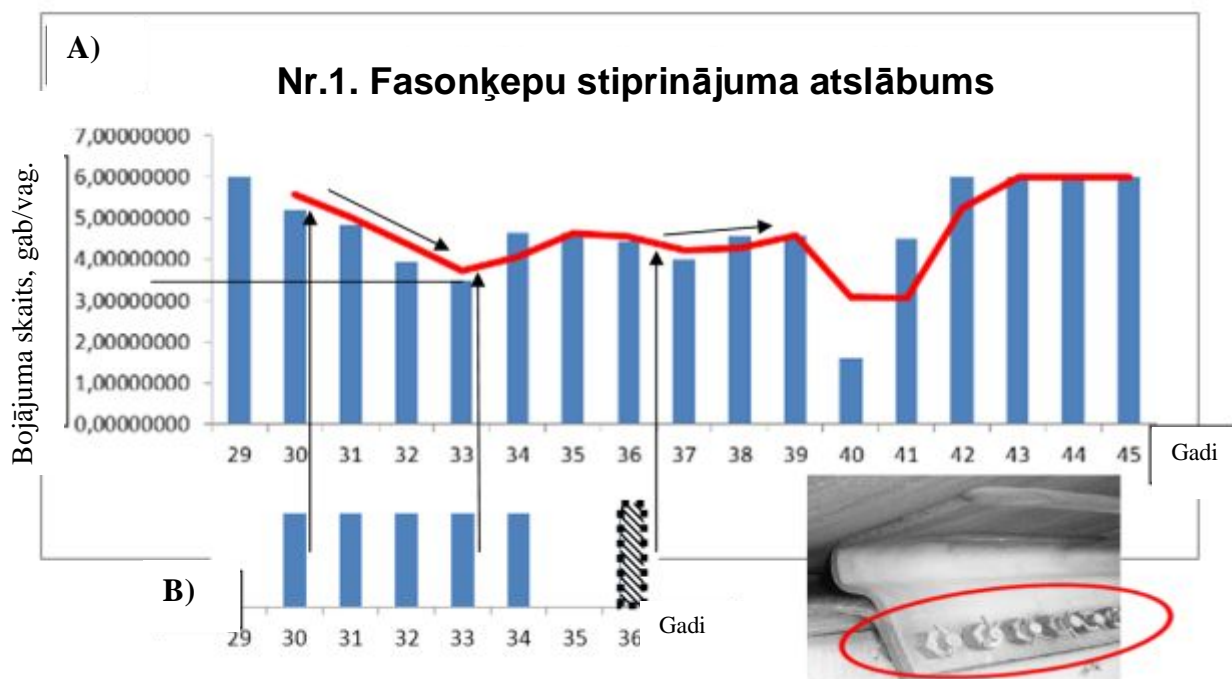
2. Fasonķepu zona – plaisu veidošanās vietās, kur tās piemetinātas cisternvagona katlam;
3. Savilcējuzmavu atslābums.

Cisternvagona rāmim ir šādi galvenie defekti:

1. Triecienrozetes plaisas gala sijās.
2. Plaisas pamatsijas un pulkas sijas savienojumos.

Veikts spēkā esošās remonta sistēmas novērtējums [36,37], kā rezultātā atklāts, ka ikgadējais depo remonts efektīvāk samazina bojājumu plūsmu šādās zonās:

- Fasonķepu stiprinājuma atslābums (sk. 5.att.).
- Triecienrozetes plaisas gala sijās.



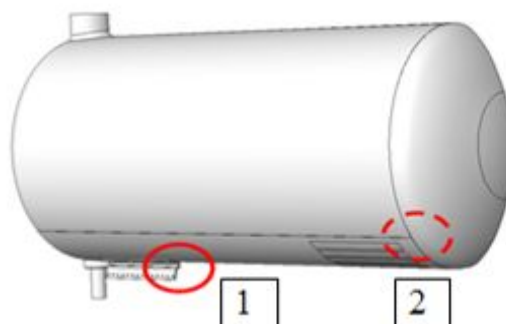
5.att. A) Fasonķepu stiprinājuma atslābuma defektu kopējais daudzums; B) Depo remontu izpildes shēma 30., 31., 32., 33., 34. cisternvagona ekspluatācijas gadā un kapitālā remonta izpildes shēma 36. gadā

Vienāda, ne pārāk spilgti izteikta ikgadējā depo remonta un kapitālā remonta ietekme uz bojājumu rašanās līmeņa samazinājumu atklāta šādiem bojājumiem:

- Katla uzmavas atslābums;
- Fasonķepu piemetināšanas katlam metinātās šuves

Iegūtie rezultāti par ekspluatāciju uz Latvijas dzelzceļa var tikt attiecināti arī uz citiem vientipiskiem vagoniem, kas tiek ekspluatēti līdzīgos apstākļos.

**Trešajā nodaļā** ir izveidots cisternvagona katla un rāmja galīgo elementu modelis (6., 7.att.) un noteiktas paaugstinātu spriegumu zonas.



6.att. ¼ katla aprēķina modelis: 1- fasonķepu metinātās šuves, 2 - T-veida šuvju savienojums

Katla stiprības aprēķina rezultātā saskaņā ar Normām [1] maksimālie ekvivalentie spriegumi rodas šādās zonās:

- Katla apmales gredzena apakšējās plāksnes pie fasonķepām.
- Katla apmales gredzena apakšējā plāksne un katla dibens.
- Guļbaļķu balsti pie katla apmales gredzena.
- Lūka.

Pēc normatīvajiem aprēķiniem **katla** stiprība 2., 4., 5. zonās (sk. 1.att.) apmierina pietiekamas stiprības nosacījumu (4.tabula).

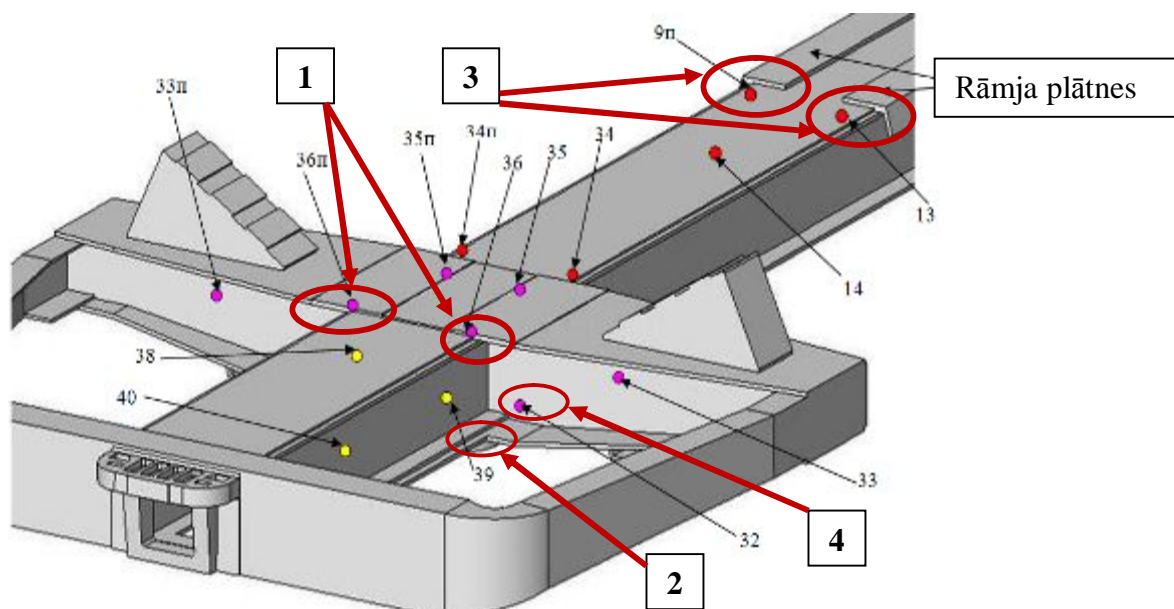
4. tabula

Zonas Nr., nosaukums	Spriegums MPa	
	Režīmi	
	Pirmais	Trešais
2 Ķepas	208	99
5 Dibens	146	89
4 Guļbaļķu balsti	101	60

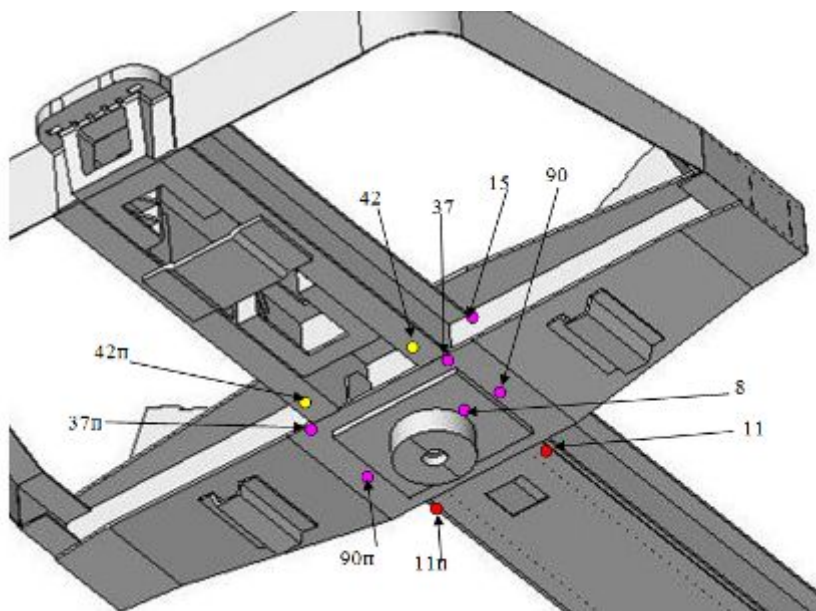
**Rāmja** stiprības aprēķina rezultātā pēc slogošanas pamata režīmiem saskaņā ar Normām [1] maksimāli ekvivalentās spriegumi rodas šādās zonās:

1. Pamatsijas augšējā un apakšējā loksne savienojumā ar pulka siju – 1. saspiešanas režīms – 220 MPa,
2. Pulka sijas apakšējā loksne savienojumā ar pamatsiju – 1. saspiešanas režīms 197 MPa,
3. Pamatsijas augšējā plāksne pirms rāmja plātnēm – 3. saspiešanas režīms – 85 MPa;
4. Pulka sijas vertikālā plāksne savienojumā ar pamatsiju – 3. saspiešanas režīms – 71 MPa;

Aprēķina punktu un paaugstinātas spriegumu zonu izvietojuma shēmas parādītas 7. attēlā.



7a.att. Rāmja aprēķina punktu izvietojums, skats no augšas, pagriezti



7b.att. Maksimālo spriegumu punktu izvietojuma shēma 20-25 mm attālumā no sprieguma koncentratoriem, skats no lejas, pagriezti

Tādējādi sprieguma stāvokļa analīzes rezultātā atklāti cisternvagonu nesošo elementu bojājumu iemesli:

➤ Cisternvagonu **katlā**:

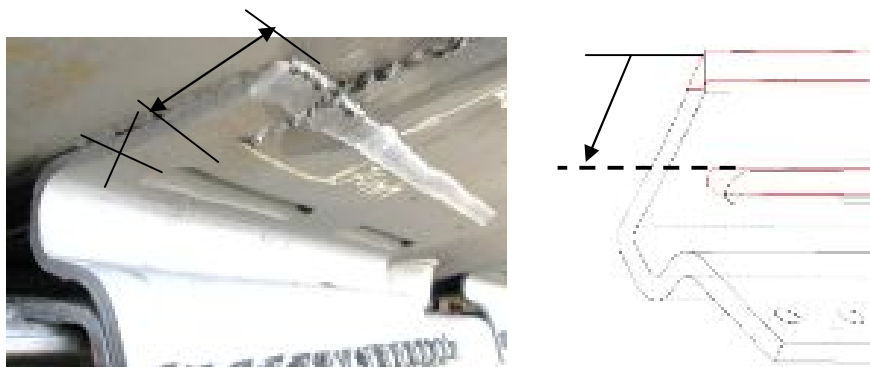
1. lūkas metināto šuvju zonās, noliekšanas ierīces metināto šuvju zonās – slodze ar izmēģinājuma spiedienu un 1. režīmā;
2. fasonķepu metināto šuvju zonā – 1. režīma slodze un hidrauliskā kravas trieciena slodze;
3. katla apmales gredzena metināto šuvju zonā pie guļbaļķu balstiem – 1. režīma slodze;
4. dibena metināto šuvju zonā – 1. režīma slodze un slodze ar izmēģinājuma spiedienu.

➤ Cisternvagona **rāmī**:

1. Pamatsijas augšējās un apakšējās loksnes savienojumā ar pulka siju – saspiešana, 1. režīma slodze,
2. Pulka sijas apakšējā loksne savienojumā ar pamatsiju – saspiešana, 1. režīma slodze,
3. Pamatsijas augšējā loksne pirms rāmja plātnēm – saspiešana, 3. režīma slodze,
4. Pulka sijas vertikālā plāksne savienojumā ar pamatsiju – 3. režīma slodze.

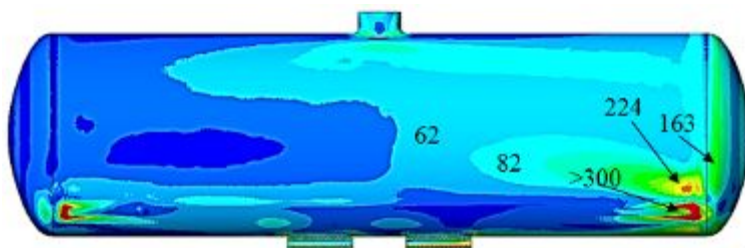
**Ceturtajā nodaļā**

1. Veikta noslogota stāvokļa analīze pēc izstrādātajiem aprēķina modeļiem, noteiktas slodzes, kas izraisa lielāko spriegumu katla bojājumu zonās. Aprēķini tiek veikt:
  1. rūpnīcas izpildījumam,
  2. bojājumu klātbūtnē,
  3. izremontētā stāvoklī pēc atjaunojošā remonta.
2. Atklāts, ka, veicot remontu fasonķepu zonā, nepieciešams kontrolēt perpendikulārās šuves garumu, kam ir jāatrodas 100 mm – 150 mm robežās (no garenisko šuvju projekcijas līnijas - - - - fasonķepas vidus daļas iešķēlumus uz perpendikulārās šuves līnijas).



8.att. Plaisa cisternvagona ķepas un modeļa perpendikulārā šuvē

3. Atklāts, ka, veicot remontu guļbaļķu balstu zonā, nepieciešams kontrolēt guļbaļķu balstu piekļaušanos katla apmales gredzenam. Katla aprēķinos ir jāņem vērā nevienmērīga balstīšanās uz guļbaļķu balstiem (sk. 9. att.), tā kā dotajā gadījumā aprēķina spriegumi katla apmales gredzena zonā pārsniedz materiāla mainības robežu, kas noved pie katla apmales gredzena deformācijas rašanās un pierāda metināto šuvju plaisu rašanos 4. un 5. zonā (sk. 1. att., 5. tabulu) ekspluatācijā.

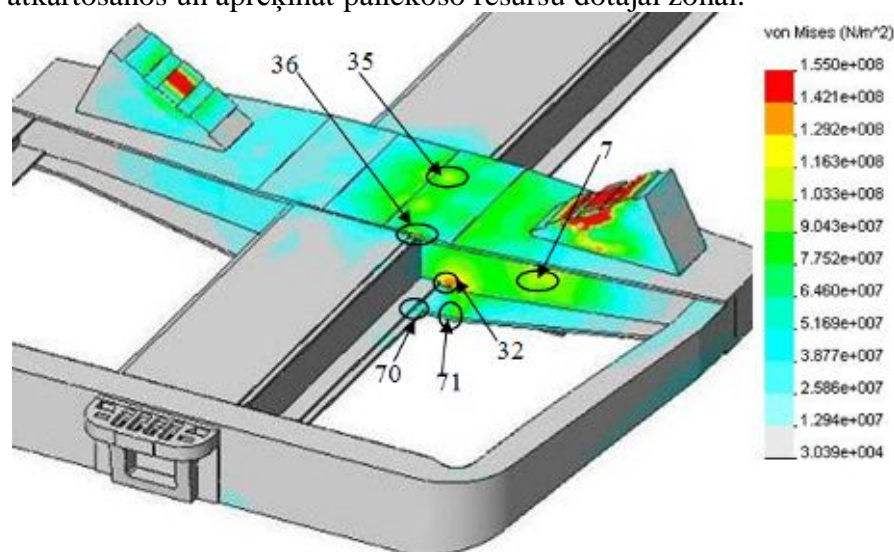


9.att. Ekvivalenti spriegumi katla balstā uz augšējiem guļbaļķu balstiem, skats no sāniem

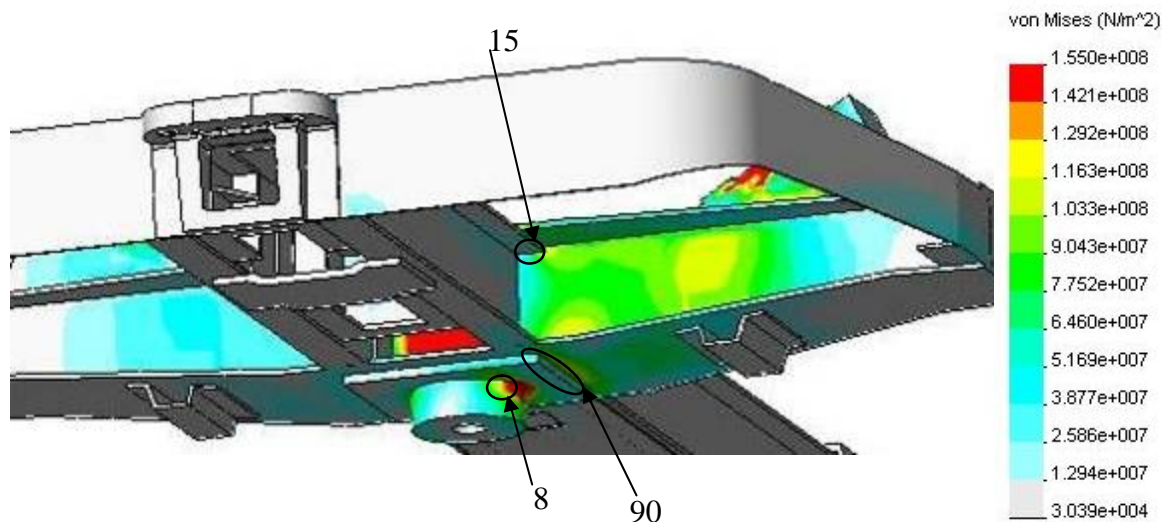
5.tabula

Zonas Nr., nosaukums	Spriegums, MPa 1./3. režīms		
	Pēc normām [1]	Balstu nosēšanās	Pieaugums
2 Ķepas	208\99	240\110	32 \ 11
5 Dībensi	146\89	163\103	17 \ 14
4 Balsti	101\60	224 \ 130	123 \ 70

4. Tā 4-ass cisternvagonu bojājumu analīzes rezultātā tika noteiktas pamata zonas pamatsijas un pulkas sijas savienojumā, kur izveidojas plaisas:
  - pamatsijas un pulkas sijas augšējo un apakšējo plauktu savienojums;
  - pulkas sijas vertikālo lokšņu savienojums ar pulkas sijas augšējiem un apakšējiem plauktiem.
5. Variantu stiprības aprēķinu rezultātā tika noteikts, kā plaisu izveidošanas zonas ir spriegumu koncentratori. Aprēķinātie spriegumi savienojumos nepārsniedz pieļaujamus lielumus pie maksimālām spiedes slodzēm pirmajā normatīvajā režīmā. Defektu (dziļas plaisas, uzsitumi, atlauzumi) izveidošana šajās zonās pieved pie spriegumu palielināšanas 2.7...3.5 reizēs, rezultātā spriegumi var pārsniegt materiāla tecēšanas robežu.
6. Nekvalitatīva metināšana remonta laikā, kad metināšanas šuvju beigas atrodas spriegumu koncentrācijas zonās, pieved pie spriegumu palielināšanas līdz 53 %.
7. Neoptimālā stiprinājuma plākšņu forma un biezums, kā arī nepareizs plākšņu izvietojums, pieved pie tā, kā spriegumus samazina neefektīvi, bet plākšņu beigu daļā spriegumi palielinājās 3...5 reizēs ar jauno spriegumu koncentrācijas zonu izveidi.
8. Piedāvāta aprēķināta nošķeltas formas stiprinājuma plāksne samazina spriegumus 2 reizēs pamatsijas un pulkas sijas augšējo plauktu zonā un neizveido jaunās spriegumu koncentrācijas zonas. Tomēr modelētas stiprinājuma plāksnes lietošana augšējo plauktu zonā nav pietiekama, arī apakšējo plauktu savienojumam ir nepieciešams izstrādāt stiprinājuma plāksni.
9. Atklāts cisternvagona pulka sijas vertikālās loksnes bojājumu iemesls savienojuma ar pamatsiju zonā. Cisternvagona sānu šūpošanās režīma aprēķinu rezultātā tika noteiktas maksimālo ekvivalentā noslogojumu zonas pie pamatsijas un pulka sijas savienojuma, kas atzīmētas 10. attēlā. Pēc iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka sprieguma vēziens ir maksimāls punktā 35 un samazinās punktos 36, 32, 7, 90. Tādēļ nepieciešams novērtēt šo spriegumu atkārtosanos un aprēķināt paliekošo resursu dotajai zonai.



10a.att. Spriegojumu sadalījums kreisā balsta noslogojumā, skats no augšas



10b.att. Spriegojumu sadalījums kreisā balsta noslogojumā, skats no lejas

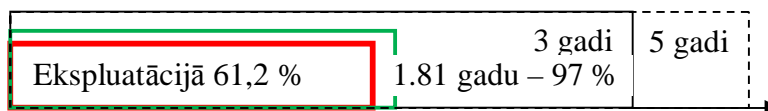
Saskaņā ar Normu [1] 2.2.3. punktu sānu šūpošanas režīms rāmja pulkas mezgliem tiek ņemts vērā, palielinot vertikālās dinamikas aprēķina koeficientu par 20 %. Tomēr, kā liecina aprēķini, dinamikas koeficienta palielinājums par 20 % pilnībā neņem vērā sprieguma raksturu un izmaiņu lielumu pamatsijas un pulkas sijas savienojuma zonā.

**Piektajā nodaļā** izvēlēta un pamatota metode cisternvagonu paliekošā resursa noteikšanai pēc 2 kritērijiem:

1. Pēc sagraušanas no viena atsevišķa trieciena (ekstrēmas slodzes);
2. Pēc paliekošās deformācijas uzkrāšanās.

Atkarībā no slodzes un tās atkārtotības katrai noguruma bojājumu zonai izvēlēta paliekošā resursa novērtēšanas metode un noteiktas tā minimālās nozīmes.

Atklāta remontdarbu kvalitātes ietekme uz cisternvagonu nesošo elementu paliekošo resursu pie daudzcikliska (cikliska) noslogojuma. Tā, ja perpendikulārās metinātās šuves garums sasniedz fasonķepas platumu, šī mezgla videjais kalpošanas termiņš samazinās līdz 1.81 gadam, kas ir mazāk par garantēto starpremontu periodu (3 gadi). Tātad, saskaņā ar aprēķinu pēc normala sadalījuma likuma 97 % (1.81 gadu.) cisternvagonu ir iespējama plaisu veidošanās fasonķepu metinātās šķērsšuves nobeigumā starpremontu periodā (sk. 11. att.), kas ir mazāks nekā garantijas starpremontu periods (3 gadi) un mazāks, nekā aprēķinu periods (5 gadi), kas veikts pēc paliekošā resursa novērtējuma metodikas.



11.att. Cisternvagona aprēķinu un ekspluatācijas resurss un garantijas starpremontu termiņš

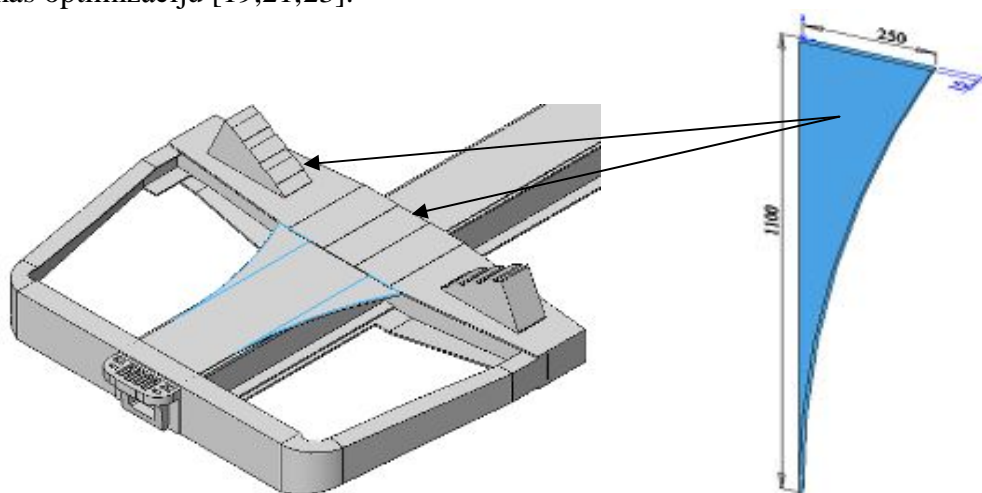
Aprēķinu rezultāti saskan ar statistisko pētījumu rezultātiem, kas tika veikti 3.att., saskaņā ar kuriem defekts tika atklāts 229 no 374 apsekojamās partijas cisternvagoniem, kas sastāda 61.2 %.

Piedāvātās paliekošā resursa noteikšanas aprēķinu metodes atšķirība precizitātē, salīdzinot ar ekspluatācijas datiem (61.2 %) par bojājumiem fasonķepu piemetināšanas pie katla apmales gredzena metināto šuvju zonā ir 36 %. Salīdzinot ar izmēģinājumu datiem piedāvātās paliekošā resursa noteikšanas aprēķinu metodes tuvak ekspluatācijas rezultātiem. Kalpošanas termiņš noteikts pēc Depo metodikam (3.stabs, 5.2.tabula) ieverojami atšķiras no ekspluatācijas datiem.

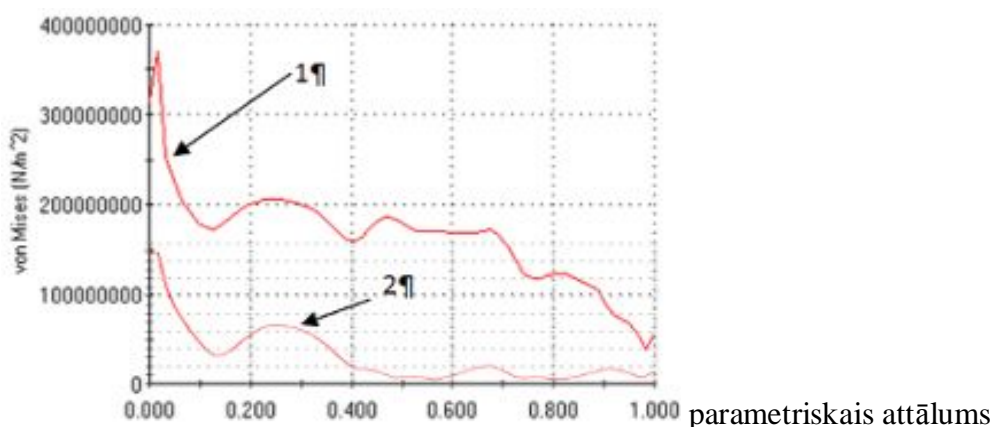
Saskaņā ar zināmām optimizācijas metodēm, pēc kurām tiek piedāvāts izmantot dažādas tā sauktās homogenizācijas metodes realizācijas [55] un formas optimizācijas resursu taupīšanas tehnika [56], promocijas darbā tiek izpildīta formas optimizācija pie rāmja ķepu masas minimizācijas [9] perpendikulārās šuves zonā, kas samazināja spriegumu par 21 % (līdz 190 MPa). Ir zināma metode [38], saskaņā ar kuru tiek piedāvāts zem katras rāmja ķepas uzstādīt uzliku ar palielinātu par 30-40 mm garumu. Rezultātā spriegumi samazinās par 40 %, taču spriegumu līmenis paliek augsts (265 MPa), palielinot masu un darbietilpību.

Ir veikta formas optimizācija pie fasonķepu masas minimizācijas [18] perpendikulārās šuves zonās, kas samazināja spriegumu par 27 %. Izpildīta nostiprinošo remonta uzliku formas optimizācija cisternvagona rāmja konsoles daļā. Piedāvātais nostiprināšanas veids ar plāksnēm ar ieliektas formas malām samazina sprieguma līmeni vairāk kā 2 reizes (12.att.) savienojumā ar pamatsijas un pulka sijas augšējām savienojošajām plāksnēm, vienlaikus nogludinot agrāk pastāvējušos sprieguma koncentratorus.

Formas optimizācijas metodika ir aprobēta, balstoties uz vagona riteņu pāra mērāmā diska formas optimizāciju [19,21,23].



12.att. Cisternvagona rāmja konsoles daļa

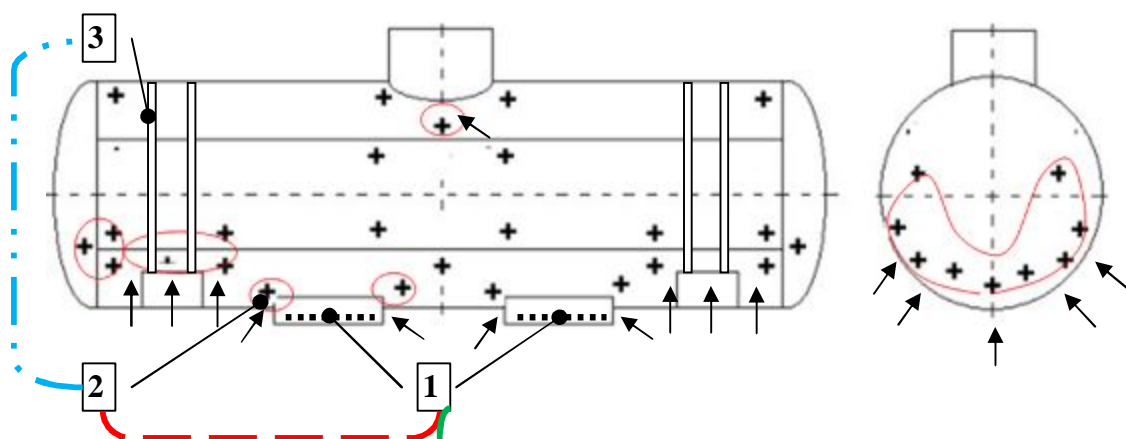


13.att. Rāmja spriegumu salīdzinājums (pastiprinošas plāksnes ieliektā ārējā šķautnē) pirms un pēc pastiprināšanas. 1 - rāmja spriegumi pirms pastiprināšanas, 2 - rāmja spriegumi pēc pastiprināšanas.

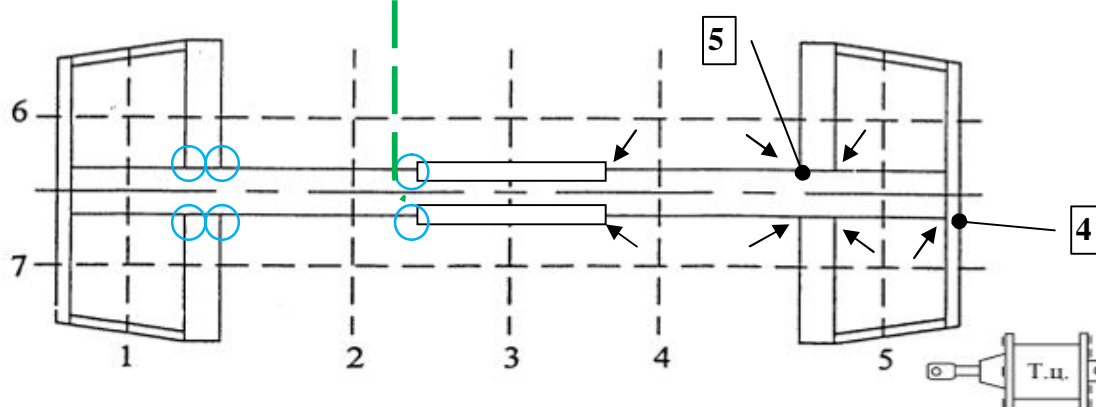
Piedāvātais nostiprināšanas veids ar plāksnēm ar ieliektas formas malām (sk. 12.att.) pazemina sprieguma līmeni vairāk kā 2 reizes (sk. 13.att. pamatsijas un pulkas sijas augšējo plākšņu savienojumā, turklāt vienlaikus nogludinot sprieguma koncentratorus.

Dotas rekomendācijas [14-16,39] par metināšanas darbu organizāciju un uzraudzību, veicot cisternvagonu atjaunojošos remonta veidus.

**Sestajā nodaļā** bojājumu analīzes un veikto stiprības aprēķinu un paliekošā resursa vērtējumu rezultātiem atklātas noguruma bojājumu zonas ar lielāko atkārtosanos VAS Latvijas dzelzceļš apstākļos. Diagnosticēšanas veikšanai ar mērķi noteikt paliekošo stingrību un resursu, piedāvāta šāda katla paliekošā biezuma mērījumu karte (sk. 14.att.) potenciāli augsta sprieguma un zema resursa zonās, kas atklātas aprēķinu ceļā. Izceltās “O” zonas atzīmētas vietās, kur visbiežāk parādās bojājumi. Ar bultām ir parādītas apskates zonas, kas veiktas ar mērķi atklāt bojājumu esamību. Cipari rāmīšos norāda uz bojājumu parādīšanās intensitāti dilstošā secībā no 1 līdz 5, bet līnijas, kuras savieno rāmīšus norāda uz bojājumu savstarpējo ietekmi.



14.a att. Katla biezuma mērījumu un bojājumu apskates zonu karte



14.b att. Rāmja biezuma mērījumu un bojājumu apskates zonu karte

Izstrādātie cisternvagonu diagnosticēšanas metodikas papildinājumi ļauj precīzāk atklāt cisternvagonu noguruma bojājumus. Lai nodrošinātu datu ievākšanu un sekojošu novērtēšanu un vagona sprieguma aprēķinu, kā arī paliekošā resursa novērtēšanu, nepieciešams savākt datus centralizēti visos ekspluatācijas iecirkņos.

Piedāvāts papildināt uzziņu 2653 (par izpildītajiem remontdarbiem) un bojājumi kodu tabulu, ziņojuma formu 1354 par cisternvagonu izešanu no remonta, Dzelzceļa administrācijas informācijas skaitļošanas centra elektronisko bāzi ar informāciju par cisternvagonu nesošo elementu (katla un rāmja) noguruma bojājumiem pēc plānveida remontu veikšanas un cisternvagonu, kas kursē starptautiskā satiksmē, apskates veikšanas.

Izstrādātie papildinājumi un priekšlikumi ļaus efektīvāk atklāt cisternvagonu noguruma bojājumus un ievērojami samazinās laiku, kas nepieciešams to diagnosticēšanai.

**Septītajā nodaļā** izstrādāta metodika četru asu cisternvagonu paliekošā resursa novērtēšanai pie cikliska noslogojuma. Metodikā ir ņemti vērā izveidoto četru asu cisternvagona rāmja un katla gala elementu modeļu rezultāti un izveidoto aprēķina programmu rezultāti, ar kuru palīdzību atklāti papildus sprieguma režīmi, kas izraisa noguruma bojājumus cisternvagonu zonu rindā. Ņemot vērā šos režīmus un atklātās zonas ar zemu paliekošo resursu, ir papildināta cisternvagonu diagnosticēšanas metodika un izstrādātas apskates kartes. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem ir izveidota četru asu cisternvagonu paliekošā resursa aprēķina metode pie cikliskām slodzēm VAS Latvijas dzelzceļš ekspluatācijas apstākļos.

Paliekošā resursa aprēķina rezultāti samērā precīzi atspoguļo ekspluatācijas datus un praktiski tos apstiprina, kas ļāva izstrādāt 4 priekšlikumus normatīvās dokumentācijas precizēšanai (A1 pielikums).

## **Paliekoša resursa novērtēšanas metodika**

### **Resursa aprēķina metodes izvēle:**

1. Ievērojamām pēc lieluma slodzēm ar zemu frekvenci (reti sastopamas ekspluatācijā) resurss jāaprēķina vienreizīgo trieciena slodžu iedarbības gadījumam.
2. Ja darbojas slodzes, kas izraisa bojājumus cisternvagona rāmja un katla zonās, ar atkārtošanas skaitu  $N < 10^5$ , tad resursa aprēķins jāveic pēc mazciklu noguruma kritērija.
3. Ja mainīgo slodžu atkārtojamība ir robežās no  $10^5$  līdz  $10^7$ , tad resursa aprēķins jāveic pēc daudzciklu noguruma kritērija.

### **1. Cisternvagona nesošo elementu resursa aprēķins reti darbojošos lielo slodžu gadījumā**

Ievērojamām pēc lieluma slodzēm ar zemu frekvenci (reti sastopamas ekspluatācijā) resurss jāaprēķina sekojoši [22,31]:

Triecienu skaita matemātisko cerību  $\bar{n}$  līdz nesošo elementu bojājumu rašanos noteic pēc vienkāršotās sakarības  $\bar{n} \approx 1/p$ , kur  $p$  – varbūtība triecienam, pie kura spriegums kādā nesošā elementā pārsniegs pagaidu stiprības robežu. Pie darbojošos spēku sadalījuma zināmas funkcijas  $P$  šī varbūtība ir  $p = 1 - P_i$ , kur  $P_i$  sadalījuma funkcijas vērtība spēku vērtībām, kad darbojošos spriegumi nepārsniedz pieļaujamo robežu. Zinot triecienu skaitu gadā var tuvināti novērtēt resursu pēc šī kritērija.

Pēc normatīviem aprēķiniem noteic lielākus spriegumus no maksimālas slodzes, kas izraisa bojājumus. Tad izvēlās sadalījuma veidu, kas precīzāk raksturo spēku sadalījumu, kas izraisa bojājumus. Tā kā Releja sadalījums precīzāk apraksta saspiešanas spēku sadalījumu (1.8.att.) noteic izmantojot šo sadalījumu:

$$S = (\sigma * P_{Releja}) / N_{2.5} = \dots \text{ MPa}, \quad (1)$$

kur  $\sigma$  – aprēķina spriegumi aplūkotā cisternvagona zonā,  $P_{Releja} = 0.88 \text{ MN}$  - Releja parametrs [31],  $N_{2.5}$  – maksimālā aprēķina slodze, kas izraisa bojājumus.

Tad noteic stiprības robežu  $\sigma_b$  materiālam un sadalījuma standartu skaitu, kuru tas satur, t.i.  $\sigma_b / S$ .

Šā līmeņa pārsniegšanas varbūtība ir vienāda ar:

$$p = 1 - \text{Releja sadalījuma funkcijas vērtība}, \quad (2)$$

tad triecienu skaita līdz bojājumu rašanos matemātiskā cerība būs vienāda ar:

$$M_o = 1 / (1 - \text{Releja sadalījuma funkcijas vērtība}), \quad (3)$$

kas pie saspiešanas triecienu gada skaita  $N_s$  atbilst palikušiem ekspluatācijas gadiem  $T$ :

$$T = M_o / N_s. \quad (4)$$

Paliekoša resursa aprēķina formula ar Releja sadalījuma pielietošanu ir sekojoša:

$$T = \frac{1}{\left(1 - \left(1 - e^{\left(\frac{-\sigma_b^2}{2 \cdot \frac{\sigma_p^2}{N} \cdot S}\right)}\right)\right)} \cdot \frac{1}{N_F} = \dots \quad (5)$$

kur  $N$  – garens spēka lielums gadā;

$N_F$  – garens spēku skaits gadā;

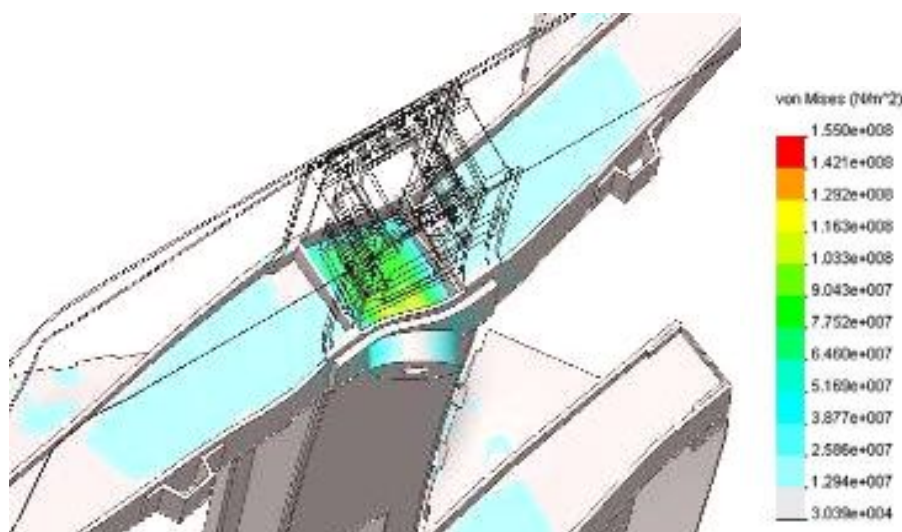
$\sigma_b$  – materiāla stiprības robeža,  $N/m^2$ ;

$\sigma_p$  – spriegums no darbojošās slodzes aprēķina zonā,  $N/m^2$ ;

$S$  – Releja sadalījuma parametrs.

## 2. Cisternvagona nesošo elementu resursa aprēķins lielo slodžu ar frekvenci līdz $10^5$ gadījumā

Spēkā esošo Normu 2.sadaļu (Aprēķina spēku normas un aprēķina režīmi) ir piedāvāts papildināt ar papildus sānu šūpošanas normatīvo režīmu kravu vagonu konstrukcijas stiprības novērtējumam [13], i.e. šis režīms ir obligāti jāievēro aprēķinos. Priekšlikums Normu papildināšanai ir sagatavots pēc cisternvagona rāmja aprēķina piemēra sānu šūpošanas režīmā, kad katls balstās uz ārējiem guļbalstiem (15.att.).



15.att. Sānu šūpošanas režīma stiprības aprēķins

## 2.1. Cisternvagona sānu šūpošanas pašfrekvences novērtējums

Cisternvagona sānu šūpošanas pašfrekvences diferenciālais vienādojums:

$$I_{O1x} \cdot \beta_x'' + \beta_x \left( b^2 \cdot c - P_k \cdot h_{mg} \right), \quad (6)$$

kur  $I_{O1x}$  – vagona virsbūves masas inerces moments pret garenass  $O1x$ , kas atrodas riteņpāru ass plaknē;

$2b$  – attālums starp atsperu komplektu asiem;

$c$  – atsperu stingums;

$h_{mg}$  – attālums no riteņpāru ass līdz smaguma centra;

$P_k$  – virsbūves svars ar kravu un rāmji.

Pēc pārveidošanās:

$$\beta_x'' + \frac{P_k}{I_{O1x}} \left( \frac{b^2}{f_{st}} - h_{mg} \right) \beta_x = 0. \quad (7)$$

Apzīmējot  $\frac{P_k}{I_{O1x}} \left( \frac{b^2}{f_{st}} - h_{mg} \right) = k^2$  vienādojums var ierakstīt sekojoši:

$$\beta_x'' + k^2 \beta_x = 0. \quad (8)$$

Raksturvienādojums:  $z^2 + k^2 = 0$ ;  $z_1 = ik$ ;  $z_2 = -ik$ .

Diferenciālā vienādojuma kopējais risinājums:

$$\beta = C_1 \cos kt + C_2 \sin kt. \quad (9)$$

Atvasinājums:

$$\dot{\beta} = -kC_1 \sin kt + kC_2 \cos kt; \quad (10)$$

Integrācijas konstantes noteic pēc nosacījumiem:

$$\beta(t)_{t=0} = \beta_0; \quad \dot{\beta}(t)_{t=0} = \dot{\beta}_0; \quad C_1 = \beta_0; \quad kC_2 = \dot{\beta}_0; \quad C_2 = \frac{\dot{\beta}_0}{k};$$

Tad

$$\beta = \beta_0 \cos kt + \frac{\dot{\beta}_0}{k} \sin kt; \quad (11)$$

Svārstību periods:

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I_{O1x}}{P_k \cdot \left( \frac{b^2}{f_{st}} - h_{mg} \right)}}. \quad (12)$$

Cisternvagona sānu šūpošanas pašfrekvence:

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_k \cdot \left( \frac{b^2}{f_{cm}} - h_{mg} \right)}{I_{O1x}}}; \quad (13)$$

## 2.2. Cisternvagona nesošo elementu resursa aprēķins pēc mazciklu noguruma kritērija

Noguruma stiprības novērtējumu pēc mazciklu noguruma kritērija jāveic pēc sekojoša formulas:

$$\frac{[\sigma_{-lk}]^m}{\sigma_{np}} \geq [n], \quad (14)$$

kur  $[\sigma_{-lk}]$  – minimāla detaļas nogurumizturības robeža, kas atbilst 95 % ticamībai;

$\sigma_{np}$  – reducētā sprieguma amplitūda iestāties režīmam, kas ir ekvivalents ekspluatācijas režīmam pēc bojāšanas darbības:

$$\sigma_{np} = 1,4^m \sqrt{\frac{T\tau}{N_0} f_0 \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_{v=0}^{v=v_k} \left(\frac{S_{v_i}}{\varphi}\right)^m p_{v_i}}, \quad (15)$$

kur

$T$  – aprēķina kalpošanas termiņš gados – 32 gadi;

$\tau$  – ekspluatācijas laiks gadā sekundēs – noteic kā gada vidējā nobraukuma  $L$  attiecību pret vagona vidēja ātruma ekspluatācijā  $V_{vid}$ ;

$m$  – noguruma līknes pakāpes radītājs;

$N_0$  – ciklu bāzes skaits;

$f_0$  – dinamisko slodžu izmaiņu ekspluatācijā efektīva frekvence;

$p_{v_i}$  – ekspluatācijas ar ātrumu  $V_i$  laika daļa;

$S_{v_i}$  – dinamisko slodžu vidējā kvadrātiskā novirze;

$\Gamma(\dots)$  – gamma funkcija;

$\varphi$  – pārejas koeficients no asimetriskā slogojuma režīma pie simetriskā režīma;

$[n]$  – pieļaujamais rezerves koeficients, 1.8.

Saspiešanas spēku sadalījuma likumus [13] un cisternvagonu bojājumu sadalījumus Latvijas dzelzceļa apstākļos ar lielāko precizitāti apraksta ar gadījuma lieluma eksponenciālo varbūtību sadalījuma blīvumu pēc Releja. Tad sadalījuma funkcija ir sekojoša:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), x > 0, \quad (16)$$

kur  $x$  – gadījuma lielums,  $\sigma$  – mēroga parametrs.

Varbūtības blīvums:

$$P(x) = \frac{x^2}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), x > 0. \quad (17)$$

Tad vidējais laiks gados līdz plastiskās deformācijas uzkrāšanas, kad nesošā elementā parādās plaisa, ir nosākams pēc formulas:

$$\bar{T} = \frac{\sigma_{-1}^m N_0}{n_g 2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) S^m}, \quad (18)$$

kur  $\sigma_{-1}$  – nogurumizturības robeža pie  $N_0=10^6$  ciklu;  
 $n_g$  – saspiešanas slodžu skaits vienā ekspluatācijas gadā;  
 $S$  - Releja sadalījuma parametrs.

### 2.3. Cisternvagona nesošo elementu resursa aprēķins pēc daudzciklu noguruma kritērija

Noguruma stiprības novērtēšanu pēc daudzciklu noguruma kritērija jāveic pēc formulas:

$$T_p = \frac{\sigma_{-1}^m N_0 \varphi_i^m V_{vid}}{K_\sigma^m \eta^m 3600 L_g 2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) f_0 \sum_i S_{vi}^m p_{vi}}, \quad (19)$$

kur  $\sigma_{-1}^m$  – detaļas nogurumizturības robeža, kas atbilst 95 % ticamībai;  
 $N_0$  – ciklu bāzes skaits,  
 $\varphi$  - koeficients, kas ņem vērā cikla asimetrijas ietekmi uz noguruma stiprību;  
 $V_{vid}$  – vidējais kustības ātrums, km/st;  
 $K_\sigma$  - koeficients, kurš raksturo konstrukcijas stiprības robežas samazināšanu salīdzinājumā ar standarta parauga stiprības robežu;  
 $\eta$  – rezerves koeficients.  
 $m$  – noguruma līknes pakāpes rādītājs;  
 $L_g$  - vidējais gada nobraukums, km;  
 $\Gamma(...)$  – gamma funkcija;  
 $f_0$  – dinamisko slodžu izmaiņu efektīva frekvence;  
 $S_{vi}$  - dinamisko slodžu (spriegumu) vidējā kvadrātiskā novirze.  
 $p_{vi}$  - ekspluatācijas daļa ar ātrumu  $V_i$ .

Dinamisko slodžu (spriegumu) vidējo kvadrātisko novirzi  $S_{vi}$  ja nav pieejami eksperimentālie dati nosāka pēc formulām (vertikālo slodžu gadījumā):

$$S_{vi} = 0.52 \frac{\overline{K_{\delta\sigma}}}{\beta} P_{cm}, \quad (20)$$

$$\overline{K_{\delta\sigma}} = a + 3.6 \cdot 10^{-4} b \frac{V-15}{f_{cm}}, \text{ pie } V \geq 15 \text{ m/sec}; \quad (21)$$

$$\overline{K_{\delta\sigma}} = a \frac{V}{15}, \text{ pie } V \leq \frac{V}{15} \quad (22)$$

kur  $a = 0.05$  virsbūves elementiem; 0.1 - ratiņu daļām ar atsperēm; 0.15 - ratiņu daļām bez atsperēm.

Šādi kompleksa aprēķini pašlaik nav paredzēti spēkā esošās Normās [1], tāpēc cisternvagona rāmja un katla atsevišķo zonu nepietiekama stiprība neatklājās projektēšanas procesā, kā arī veicot paliekuša resursa aprēķinus.

Izstrādātā metodika ļauj precīzāk novērtēt paliekošo resursu ar esošo informāciju par cisternvagonu ekspluatācijas bojājumiem. Izstrādātās metodikas pielietošana ļaus pamatoti nozīmēt starpremontu garantijas ekspluatācijas terminus un kartēja plāna remonta veidu, kas savukārt samazinās izmaksas uz neplānotiem remontiem.

Tika sagatavoti un iesniegti VAS Latvijas dzelzceļš sekojoši priekšlikumi:

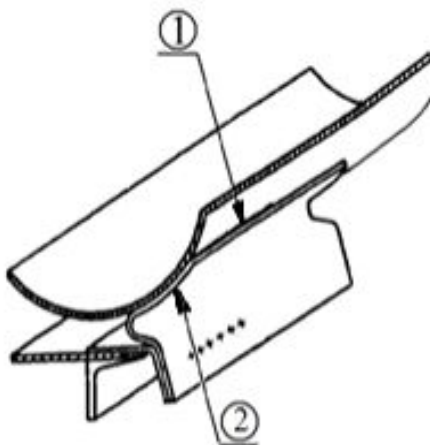
### **Priekšlikumi par paliekošā resursa novērtēšanu cisternvagonu stiprības aprēķina spēkā esošo Normu [1] 2. sadaļā**

1. Nepieciešams ieviest cisternvagonu paliekošā resursa noteikšanas metodiku pie cikliskas slodzes un papildus sānu šūpošanas režīmu, vērtējot kravas vagonu konstrukcijas stingrību spēkā esošajās Normās [1]. Sānu šūpošanās režīmu piedāvāts ieviest kā normatīvu, respektīvi, tā ievēšanai ir jābūt obligātai.
2. Nepieciešams ieviest katla apmales gredzena atbalsta režīmu uz guļbaļķu balstiem (nosēžoties centrālajiem balstiem), lai novērtētu cisternvagonu konstrukcijas stiprību spēkā esošajās Normās [1]. Katla apmales gredzena balstīšanas uz guļbaļķu balstiem režīmu piedāvāts ieviest kā papildus.

### **Priekšlikumi katla fasonķepu perpendikulāro metināto šuvju atjaunošanai**

Tiek piedāvāts, balstoties uz veiktajiem salīdzinošajiem aprēķinu variantiem un biežajiem šīs zonas bojājumiem ekspluatācijā, ieviest spēkā esošās Metināšanas un uzkausējuma instrukcijas [3] 5.8. sadaļas (Cisternas) 5.8.40 punktā papildus punktu ar prasību ierobežot fasonķepu perpendikulārās šuves maksimālo garumu. Piedāvātā punkta saturs un papildinātais zīmējums (15) sniegts zemāk:

c) plaisu aizmetināšana, def.2, perpendikulārā metinātā šuvē vai fasonķepas termiskā savienojuma ar katlu zonā. Perpendikulārās metinātās šuves garums nedrīkst būt lielāks par  $100 \div 140$  mm, beidzoties pie garenisko šuvju projekcijas līnijas fasonķepas vidus daļas iegriezumos šuves perpendikulārajā šuvē.



15. att. Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas papildinātais attēls

Vēl 2 priekšlikumi ir sagatavoti iesniegšanai VAS Latvijas dzelzceļš un doti A1 pielikumā.

## SECINĀJUMI

1. Balstoties uz pieaugošā cisternvagonu kārtējā atkabināšanas remonta skaita pieauguma analīzi, izmantojamo metožu cisternvagonu palikušā resursa novērtēšanai apskatu, izvirzīts uzdevums izstrādāt metodiku analītiskai cisternvagonu, kuriem beidzies kalpošanas termiņš, palikušā resursa noteikšanai pie cikliskas slodzes, lai paaugstinātu cisternvagonu ekspluatācijas drošumu garantijas starpremontu periodā.
2. Savākto datu par cisternvagonu, kuriem beidzies kalpošanas termiņš, bojājumiem statistisko apstrādi, noteikti galvenie noguruma bojājumi un to sadalījuma likumsakarības cisternvagona rāmim un katlam. Noteikta plānveida remontu sistēmas ietekme uz bojājumu plūsmu.
3. Pēc autora izveidotiem rāmja un katla galīgo elementu modeļiem veikti stiprības aprēķini saskaņā ar Normām [1] un noteikti paaugstinātie ekvivalentie spriegumi (kas nepārsniedz pieļaujamās nozīmes)  
katlā šādās zonās:
  - katla apmales gredzena apakšējā plāksnē pie fasonķepām,
  - katla apmales gredzena un dibena apakšējā plāksnē,
  - pamatsijas pie katla apmales gredzena,
  - pie lūkas;rāmī šādās zonās:
  - pamatsijas augšējā un apakšējā plāksnē savienojumā ar pulkas siju – 1. saspiešanas režīms,
  - pulkas sijas apakšējā plāksne savienojumā ar pamatsiju – 1. saspiešanas režīms,
  - pamatsijas augšējā plāksne pirms rāmja plātnēm - 3. saspiešanas režīms,
  - pulkas sijas vertikālā plāksne savienojumā ar pamatsiju – 3. saspiešanas režīms.
4. Sprieguma stāvokļa analīzes rezultātā atklāti iemesli un noteiktas slodzes, kas izraisa vislielāko spriegumu:
  - spriegums ar pirmā režīma un izmēģinājuma spiediena – lūkas metināto šuvju zonās, lejamierīces metināto šuvju zonās,
  - 1. režīma spriegums – kravas hidraulisko triecienu – fasonķepu metināto šuvju zonā,
  - 1. režīma spriegums – katla apmales gredzena metināto šuvju zonā pie guļbaļķu balstiem,
  - Izmēģinājuma spiediena spriegums un 1. režīma spriegums – dibena metināto šuvju zonā.
5. Veicot remontu fasonķepu zonā, nepieciešams kontrolēt perpendikulārās šuves garumu, kurai ir jāatrodas robežās no 100 mm līdz ~140 mm (līdz garenisko šuvju projekcijas līnijai fasonķepas vidējās daļas iegriezumos perpendikulārās šuves līnijā).
6. Veicot remontu guļbaļķu balstu zonā, nepieciešams kontrolēt, kā centrālie guļbaļķu balsti pieguļ katla gredzenam. Katla aprēķinos, nepieciešams ņemt vērā nevienmērīgo balstīšanos uz guļbaļķu balstiem. Ņemot vērā biežo koka guļbaļķu balstu nodilumu un nosēšanos, nepieciešams turpmākos pētījumos pārbaudīt hipotēzi par koka guļbaļķa balsta – metāla katla bruņu plāksnes berzes mezglā izmantot pašslīdošus materiālus (piemēram, antifrikcijas materiālu flubonu).
7. Izvēlēta un pamatota metode palikušā resursa noteikšanai galvenajās cisternvagonu noguruma bojājumu zonās pēc diviem kritērijiem: 1. – pēc sagraušanas no atsevišķa trieciena (ekstrēmas slodzes); 2 – pēc palikušo deformāciju uzkrāšanās. Resursa

novērtēšanas metodes tika izvēlētas atkarībā no sprieguma lieluma un tās atkārtotās biežuma. Katrai noguruma zonai noteiktas palikušā resursa minimālās vērtības:

- Tā pēc daudzcikliska noguruma kritērija pamatsijas un pulkas sijas savienojuma zonā sāniskas šūpošanās režīmā resursa lielums sastāv no 14 līdz 13 gadiem – pamatsiju un pulkas siju augšējām plāksnēm.
  - Tā pēc mazcikliskuma noguruma kritērija bruņu plāksnes un guļbaļķu balstu zonai pirmajā režīmā (maksimālas gareniskas slodzes) un balstā uz augšējiem guļbaļķiem, palielinoties fasonķepu gareniskajam garumam, resurss sastāda 12 gadus, bruņu plāksnē balsta zonā 15 gadus.
  - Atrasto režīmu ietekmi apstiprina resursa salīdzinošais vērtējums ar Normatīvajiem slodzes vērtējumiem un autora pievienoto: tā, resursa samazinājums fasonķepās sastāda 7 gadi, katla balstos 199 gadi.
  - Fasonķepu perpendikulāro metināto šuvju garumā, kas vienāds ar fasonķepas platumu, resurss metinātā šuvē samazinās līdz 1.81 gadam, apstiprināto fasonķepu bojājumu veidošanās starpremontu periodā (2-3 gadi) vairāk kā 97 % cisternvagoniem. Salīdzinot aprēķinu rezultātus ar ekspluatācijas datiem (61.2 %) par bojājumiem fasonķepu piemetināšanas pie katla apmales gredzena metināto šuvju zonā atšķirība precizitātē ir 36 %.
8. Veikta fasonķepas formas optimizācija perpendikulārās šuves zonā, kas pazemināja noslogojumu par 27 %, rāmju plātnēm par 21 %. Formas optimizācijas metodika aprobēta vagona mērāmā riteņu pāra diska formas optimizācijā. Piedāvātais rāmja konsoles daļas nostiprināšanas veids pulkas sijas un pamatsijas augšējo plāksņu savienojumā ar izliektās šķautnes formu samazina spriedzes līmeni vairāk kā 2 reizes, nolīdzinot spriedžu koncentratorus. Formas optimizācijas metodika ir aprobēta vagona mērāmā riteņu pāra diska formas optimizācijā.
9. Papildināta cisternvagonu diagnosticēšanas metodika, ņemot vērā esošajā normatīvajā dokumentācijā neiekļautos bojājumus, kas atklāti ekspluatācijā VAS Latvijas dzelzceļš apstākļos. Ieviešot papildinājumus un izstrādātās bojājumu kartes ar norādi uz bojājumu rašanās intensitāti dilstošā kārtībā, tiks iegūta iespēja ātrāk un precīzāk novērtēt palikušo nesošo elementu stiprību ar mērķi noteikt cisternvagona palikušo resursu.
10. Izstrādāta cikliski noslogojamu cisternvagonu palikušā resursa noteikšanas metodika, ņemot vērā atklātos papildus noslogojuma režīmus (sānu šūpošanās, ārpusštata balstīšanās uz guļbaļķu balstiem). Metodika ļauj noteikt cisternvagona palikušo resursu jebkurā ekspluatācijas posmā.
11. Pēc iegūtajiem darba rezultātiem izstrādāti un iesniegti izskatīšanai VAS Latvijas dzelzceļš šādi priekšlikumi: aprēķina cisternvagona sānu šūpošanās režīma ieviešana; perpendikulārās fasonķepu metināto šuvju maksimālā garuma ierobežošana, uzziņas 2653 (par veicamajiem remontdarbiem) un bojājumu kodu tabulu, satiksmes formas 1354 par iziešanu no remonta, Dzelzceļa administrācijas Inženierijas skaitļošanas centra elektroniskās datu bāzes papildināšanu ar informāciju par noguruma bojājumiem. Priekšlikumi izstrādāti iesniegšanai Dzelzceļa Administrācijas vagonu saimniecības pilnvarotajiem speciālistiem Dzelzceļa transporta komisijas padomē.

Paraksts: *А.Бойко* 2013. gada februāris.



Gogoļa iela 3, Rīga, LV-1547, Latvija. Tālrunis: 67232853, fakss: 67234735, e-pasts: ldz\_rss@ldz.lv  
Nor. konts LV78RIKO0002013100132, AS "DNB banka", kods RIKOLV2X

RĪGĀ

27.11.2012. Nr. RSSTR-8/181

### APLIECINĀJUMS

Apliecinu ka Aleksandrs Boiko 2012.g. novembrī iesniedza SIA „LDZ Ritošā sastāva serviss” izskatīšanai sekojošus priekšlikumus un rekomendācijas:

1. Priekšlikums un papildinājums spēkā esošo Normu 2.sadaļai (Aprēķinu spēku normas un aprēķinu režīmi): piedāvāts ievest kā normatīvo aprēķina režīmu kravas vagonu konstrukciju stiprības novērtējumā papildus šupošanas režīmu.
2. Priekšlikums un papildinājums spēkā esošā Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas 5.8. sadaļas 5.8.40. punktam: piedāvāts ievest kā normatīvu apakšpunktu „B)” fasonķepu pie cisternvagona katla apmales metinātās šuves garuma kontrole.

Abus priekšlikumus piedāvāts ievest ka normatīvus, t.i. to izpilde būtu obligāta.

Pielikumā:

1. Priekšlikums un papildinājums spēkā esošā Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas 5.8. sadaļas 5.8.40. punktam – 1 lpp.

Datums 27.11.2012

Paraksts 

**S. Kujikovs**  
SIA "LDZ ritošā sastāva serviss"  
Tehniskā direkcija  
Remonta daļas vadītāja vietnieks

**PRIEKŠLIKUMI SPĒKĀ ESOŠĀS NORMATĪVĀS DOKUMENTĀCIJAS  
PAPILDINĀŠANAI VAS LATVIJAS DZELZCEĻŠ**

Sagatavoti un iesniegti priekšlikumi [12] Latvijas dzelzceļa administrācijā Normu [1] papildināšanai to iesniegšanai Krievijas dzelzceļa transporta zinātniski pētnieciskā institūta Ritošā sastāva dinamikas un stiprības nodaļā, kā arī sagatavoti priekšlikumi Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas [3] papildināšanai to iesniegšanai Dzelzceļa Administrācijas vagonu saimniecības pilnvarotajiem speciālistiem Dzelzceļa transporta komisijas padomē (šobrīd priekšlikumi (sk. A1 pielikumu) atrodas SIA „LDZ Ritošā sastāva serviss” izskatīšanā). Tie ir šādi:

**Iesniegti:**

1. Piedāvāts papildināt spēkā esošo Normu 2. sadaļu (Aprēķinu spēku normas un aprēķinu režīmi) ar papildus sānu šūpošanās režīmu, izvērtējot cisternvagonu konstrukcijas stiprību. Sānu šūpošanās režīmu piedāvāts ieviest kā normatīvu, respektīvi, tā ievērošanai ir jābūt obligātai.
2. Piedāvāts papildināt spēkā esošās Metināšanas un uzkausēšanas instrukcijas 5.8 sadaļas (Cisternas) 5.8.40. punktu ar apakšpunktu (c) saistībā ar fasonķepu pie cisternvagona katla apmales gredzena metinātās šuves garuma kontroli. Priekšlikumu piedāvāts ieviest kā normatīvu, respektīvi, tā ievērošanai ir jābūt obligātai.

**Sagatavoti:**

3. Piedāvāts papildināt spēkā esošās Normas [1] ar papildus katla apmales gredzena balstīšanos uz augšējiem guļbaļķu balstiem (centrālo balstu nodiluma gadījumā), lai novērtētu cisternvagonu konstrukcijas stiprību. Noslogojuma režīmu, kad katla apmales gredzens balstās uz augšējiem guļbaļķu balstiem, tiek piedāvāts ieviest kā papildus normatīvais režīms, i.e. tā ievērošanai ir jābūt obligātai.
4. Piedāvāts papildināt uzziņu 2653 (par veicamajiem remontdarbiem) un bojājumu kodu tabulu, satiksmes formas 1354 par iziešanu no remonta, Dzelzceļa administrācijas Inženierijas skaitļošanas centra elektronisko datu bāzi ar informāciju par cisternvagonu nesošo elementu (katla un rāmja) noguruma bojājumiem, kas atklājami ekspluatācijā un pirms plānveida remontu veikšanas. Piedāvāts ievākt datus par noguruma starptautiskā satiksmē kursējošu cisternvagonu noguruma bojājumiem.

## LITERATŪRA

1. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных), ГосНИИВ - ВНИИЖТ Москва. 1996.
2. А.Г.Головков, П.Ф.Николаев, Перевозкам опасных грузов особое внимание, Вагоны и вагонное хозяйство, №3, 2007г.
3. Руководящий документ «Руководство по капитальному ремонту грузовых вагонов» Утверждено: Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол № 54 от «18-19» мая 2011г.
4. Сендеров Г. К. и др. Обеспечение безопасной работы грузо-вых вагонов// Железнодорожный транспорт. 2007. № 3. 320 с.
5. Положение о продлении срока службы грузовых вагонов курсирующих в международном сообщении, утвержденные Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества. Протокол №52 от 13-14 мая 2010г.
6. Единые методические указания по техническому диагностированию грузовых и рефрижераторных вагонов государств-участников Соглашений о совместном использовании грузовых и рефрижераторных вагонов в международном сообщении, утвержденными Протоколом от 16 января 2003 года.
7. Boiko A., Auziņš J., Januševskis J. „Cisternvagona stiprības novērtējums pie daudzciklu slogojuma”, RTU Zinātniskie raksti.– Mašīnzinātne un transports. 6. sērija. Mehānika. 28.sējums (2008), 115.-120. lpp. (starptautiskā datu bāzē EBSCO)
8. „Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов” (протокол от 29-30 мая 2008 г. № 48, Вводится с 01.01.2009.г)
9. Boiko A., Balckars P., Auziņš J., Meļņikovs A. „Remonta stiprinājumu efektivitātes vērtējums cisternvagona fasonķepu zonā. Effectiveness evaluation of the repairs strengthening in the zone of shaped body support of the tank car”, RTU Zinātniskie raksti, 6.sērija, 32.sējums (2009), 12.-17.lpp. ISSN 1407-8015
10. A.Boiko, P.Balckars „Cisternvagona rāmja bojājumu un remonta kvalitātes analīze pamatsijas un pulkas sijas savienojumā”, RTU Zinātniskie raksti, 6 lpp. (pieņemts publicēšanai). ISSN 1407-8015
11. N. A. Bityutskiy, The analysis of operational dependability of specialized tank-cars to transport condensed hydrocarbon gases, // Транспорт Урала, № 4 (27), 2010, p. 67-71. (in Russian).
12. A.Boyko „Influence of barrel damages on life time of tank wagon, Katla bojājumu ietekme uz vagona cisternas kalpošanas termiņu”, Proceedings of 8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING 19-21 April 2012, Tallinn, Estonia, p.21.-26. (starptautiskā datu bāzē ISI WEB of SCIENCE)
13. A.Boiko “Determination of resource reducing a of tank wagons on the Latvian railway due to fatigue damages”, the 1<sup>st</sup> Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni
14. Бойко И.Ю., Бойко А.Ф. „Повышение эффективности ремонтной сварки вагона-цистерны”, Международный симпозиум “Сварка и родственные технологии”, 24 марта 2010 года, Минск, Белоруссия, 81.-85. lpp.

15. Boiko A., Boiko I. „Влияние сварочных ремонтных работ на прочность рамы вагона-цистерны”, Proceedings of 7th International Symposium „Surface Engineering. New Powder Composition Materials. Welding”, 2nd Part, 23-25 March 2011, Minsk, Belarus, pp. 233 - 239.
16. Бойко А., Бойко И. “Влияние ремонтных сварочных работ на срок службы вагона-цистерны”, 10th International Scientific Conference NOMATEX-2012, 12-14 September 2012, Minsk, Belarus, pp. 300-303
17. Auziņš J., Boiko A., Januševskis A., Januševskis J., Kovaļska A., Meļņikovs A., Pfafrods J. „Mehānisko sistēmu modelēšanas, identifikācijas un daudzkritēriālās optimizācijas metožu un līdzekļu izstrāde mašīnu un mehānismu dinamikas laboratorijā. Development of methods and tools for simulation, identification and multiobjective optimization of mechanical systems at the machine and mechanism dynamics laboratory”, RTU 147. jubilejas zinātnisko rakstu krājums (2009), RTU Izdevniecība, lpp. 19 - 26. ISSN 1407-8015
18. Janushevskis, A. Melnikovs, A. Boyko “Shape Optimization of 3D Mechanical Systems Using Metamodels”, 2013 International Conference on MEMS and Mechanics (MEMSM 2013) March 15-16, 2013, Wuhan, China, in Journal Advanced Materials Research Vol. 705, (2013), pp. 429-435, Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1022-6680, (starptautiskā datu bāzē SCOPUS).
19. А.В.Янушевскис, А.Г.Мельников, А.Ф.Бойко „Методика оптимизации формы элементов механических систем проектируемых средствами САД/САЕ: промышленные примеры”, Труды 5ой международной научно-технической конференции „Современные проблемы машиностроения”, 23-26 ноября 2010, Томск, Российская Федерация, стр.524-530. (starptautiskā datu bāzē VINITI)
20. Vladimir Gonca, Svetlana Polukoshko, Yurij Shvab, Aleksandrs Boiko, “Multilayers spherical control hinge characteristics optimization”, 11th International Conference Vibroengineering 2012, 11-12 October 2012, Kaunas, Lithuania, 8 lpp., Vibromechanika. Journal of Vibroengineering, (pieņemts publicēšanai).
21. Boiko A., Januševskis A., Meļņikovs A., Vučetičs I. „Vagona mērīšanas sistēmas konstruktīvās formas optimizācija. Constructive Shape Optimization of Wagon Measurement System”, RTU Zinātniskie raksti, 6.sērija, 33.sējums (2010), 78.-82.lpp. (starptautiskā datu bāzē EBSCO)
22. Janushevskis A., Melnikovs A., Boiko A. Dzelzceļa vagonu cisternu balsta fasonķepu formas optimizācija. Scientific Journal of RTU: Transport and Engineering. Series 6. Riga: Riga Technical University. 5 pages. (pieņemts publicēšanai).
23. Januševskis A., Meļņikovs A., Boiko A. “Shape Optimization of Mounting Disk of Railway Vehicle Measurement System”, Journal of Vibroengineering. - 12. (2010) 436.-442. lpp. (starptautiskā datu bāzē SCOPUS)
24. Мотовилов К.В., Лукашук В.С., Криворудченко В.Ф., Петров А.А. Технология производства и ремонта вагонов / под редакцией К.В. Мотовилова, Москва: 2003.
25. П. С. Маев Коррозия сокращает ресурс минераловоза
26. Овечников М.Н., Решение проблемы снижения повреждаемости котлов и рам железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов с использованием современных программных средств моделирования и расчета конструкции. Автореферат диссертации. Вагоны и вагонное хозяйство, МИИТ, Москва, 2001, 387 стр.

27. Васильев А.В., Оценка нагруженности и прогнозирование остаточного ресурса вагонов-транспортеров. Автореферат диссертации. Санкт-Петербург, 2005, 142 стр.
28. Зимакова М.В., Продление срока службы вагонов-цистерн с учетом изменения физико-механических свойств металлоконструкций базовых узлов. Автореферат диссертации. ФГУП ЦНИИ, 2012,
29. Н.А. Битюцкий, Дроздов.А.Ф., Меркушев С.В., Совершенствование методики диагностирования технического состояния вагонов- цистерн для перевозки нефтепродуктов. Автореферат диссертации. 13 стр.
30. Vuchetich, I. I., Derkach, B. A., Kachnov, F. D. Оценка остаточного ресурса грузовых вагонов железных дорог. в Вестник ВНИИЖТ, 2008, 2, 14-18. (на Русском)
31. А.Н. Савоськин, и др. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог, М.: Машиностроение, 1990, 288 стр.
32. Альбом–справочник «Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР», 1989г.
33. Справочник „Модели грузовых вагонов”
34. МК Noteikumi Nr.610 no 2006.07.25. “Dzelzceļa ritošā sastāva speciālā remonta un modernizācijas kārtība” (Правила Кабинета Министров «Порядок специального ремонта и модернизации железнодорожного подвижного состава»)
35. СТО РЖД 1.09.004-2007, Вагоны грузовые и рефрижераторные магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Порядок продления назначенного срока службы 02.01.2008
36. Nolikums par tehniskās apkopes un remonta sistēmu kravas vagoniem, kuriem ir atļauta kustība pa dzelzceļa koplietošanas ceļiem starptautiskajā satiksmē, Aprstipriāts Sadraudzības dalībvalstu dzelzceļa transporta Padomē 2007.g. 22-23. Novembra protokols Nr.47.
37. D3/185, от 2008 Системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов
38. Шимановский А.О. Пулято А.В., Конечно-элементное моделирование нагруженности резервуаров для транспортирования нефтепродуктов. Гомель, Белгуд. 6 стр.
39. LVS EN ISO 14731 „Надзор за выполнением сварочных работ”, <https://www.lvs.lv/> (см.15.06.2012)
40. А.В.Кулешов, Н.Н.Пашков, Методика определения законов распределения потока отказов грузовых вагонов, на основе статистических данных АСУ ЖТ, Иркутский государственный университет путей сообщения.
41. Техническое диагностирование вагонов, ОАО НВЦ "Вагоны", [http://www.nvc-vagon.ru/services/technical\\_diagnostics/](http://www.nvc-vagon.ru/services/technical_diagnostics/).
42. Ряполов В.А. Разработка технологических основ и специфика модернизации вагонов-цистерн для обеспечения безопасности их эксплуатации и продления срока службы. Автореферат диссертации. Алтайский технический государственный университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации (ОАО Алтайвагон). Барнаул 1999
43. Margit Weltschev, Stephanie Schwarzer, Frank Otremba, Comparison of the Operating Life of Tank Containers, Tank Vehicles and Rail Tank Cars for the Carriage of Dangerous Goods in Practice, Analysis of Causes of Damage, Chemical Engineering

Transactions, Vol. 31, 2013, Copyright © 2013, AIDIC Servizi S.r.l., ISBN 978-88-95608-22-8; ISSN 1974-9791

44. Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), 2011, BAM-List: Requirements for Tanks for the Transport of Dangerous Goods, 11th edition, Berlin.
45. Intergovernmental Organization for International Carriage by Rail, 2011, Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID), 15th revised edition.
46. Kaesche, H., 1990, Die Korrosion der Metalle, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
47. United Nations, 2011, Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Model Regulations, 17th revised edition, New York, Geneva.
48. United Nations Economic Commission for Europe, 2013, ADR: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous goods by Road, 21th revised edition, New York, Geneva.
49. Weltschev, M.; Bäßler, R., Werner, H., Alves, H., Behrens, R., 2005, Use of Corrosion Resistant High-Alloyed Metallic Materials for Transport Tanks of Dangerous Goods and Water-Polluting Substances, EUROCORR 2005, Lisboa, Portugal.
50. Weltschev, M., Bäßler, R., Werner, H., Alves, H., Behrens, R., 2005, Use of Corrosion Resistant High-Alloyed Metallic Materials for Transport Tanks of Dangerous Goods, Stainless Steel World Conference, Maastricht, the Netherlands.
51. Weltschev, M., Bäßler, R., Langer, M., Alves, H., 2009, Suitability of Alloy 31 and 59 for Transport of Highly Corrosive Dangerous Goods, NACE International Conference, Corrosion 2009, Atlanta, USA.
52. Wendler, E. und H. Gräfen, 1998, Korrosionsschadenkunde, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
53. EN 12663-1 Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies.
54. FKM-Guideline Analytical strength assesment of components in mechanical engineering, 2003 VDMA Verlag GmbH.
55. Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology Optimization. Chapter 6 in Book „Optimization of Structural and Mechanical Systems”. Ed. J. S. Arora. ISBN-10 981-256-962-6. World Scientific Publishing. 2007, pp. 161-194.
56. Lee. T.H., Jung J.J. Metamodel-based Shape Optimization of Connecting Rod Considering Fatigue Life. Key Engineering Materials. 2006, Vol. 306/308, pp. 211-216.