

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības fakultāte  
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

**Aleksejs BATRAKOVŠ**

Doktora studiju programmas „Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija” doktorants

**MAĢISTRĀLO GĀZESVADU  
NOVECOŠANĀS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. sc. ing., docents  
**I.PLATAIS**

**Rīga 2011**

UDK 338.24 (075.8 )  
Ei 710

Batrkovs A. Maģistrālo gāzesvadu  
novecošanās.  
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU,  
2011. - 21 lpp.

Iespiests saskaņā ar SGŪTIS institūta 2011.gada  
\_\_\_\_\_ lēmumu, protokols Nr. \_\_\_\_\_

**ISBN .....**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski  
aizstāvēts 20\_\_gada \_\_. \_\_\_\_\_ plkst. \_\_\_\_\_ Rīgas Tehniskās universitātes  
Būvniecības fakultātes sēžu zālē \_\_\_\_\_ ielā \_\_\_\_\_.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

LZA goda loceklis, Dr.hab.sc.ing., profesors Viktors Zēbergs  
LZA Fizikāli Enerģētiskais institūts

Prof., Dr.habil.sc.ing., profesors Jānis Vība  
Rīgas Tehniskā universitāte TMF Mehānikas institūta vadītājs

Dr. Sc.ing. Aivars Broks  
Akciju sabiedrība "Latvijas Gāze" dispečeru daļas vadītājs

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Aleksejs Batrakovs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas,  
secinājumus, literatūras sarakstu, 1 pielikumu, 32 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 103  
lappuses. Literatūras sarakstā ir 102 nosaukumi.

## ANOTĀCIJA

Novecojušo maģistrālo gāzesvadu funkcionālais drošums ir saistīts ar cauruļvadu stiprību. Eksploatācijas laikā cauruļvadu mehāniskās īpašības pavājinās, kas savukārt noved pie lokālu defektu attīstības un rezultātā, pasliktinās sistēmas drošuma rādītāji.

Promocijas darba mērķis ir modeļa un metodikas izstrāde novecojušo gāzesvadu nestspējas aprēķinam noteiktajā laika posmā.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, veikti laboratorijas izmēģinājumi ar tērauda paraugiem, kuri ņemti no novecojušiem gāzesvadiem. Maģistrālo gāzesvadu nestspējas novērtējumam eksploatācijas gaitā ieviesti materiāla novecošanas un slodzes ietekmes faktori. Balstoties uz datiem, kas tika iegūti laboratorijas izmēģinājumos, izveidots matemātiskais modelis novecojušu gāzesvadu (eksploatācijas laiks 43 gadi), nestspējas novērtēšanai. Modelī tiek ņemta vērā elastīgo īpašību izmaiņu atkarība no vecuma un slodzes.

Balstoties uz izstrādāto modeli, darbā ir izveidots jauns aprēķinu algoritms, kā arī novecojušo maģistrālo gāzesvadu nestspējas novērtēšanas metodika.

Izstrādātais matemātiskais modelis adaptēts arī praktiskam pielietojumam un tika izmantots maģistrālajā gāzesvadā Rīga – Paņevēža 2010. gadā, novērtējot un prognozējot nestacionāri noslogoto gāzesvadu nestspēju.

Pētījuma rezultāti pašlaik tiek izmantoti maģistrālo gāzesvadu defektu bīstamības analīzei uzņēmuma A/S «Latvijas gāze» eksploatācijas iecirknī «Gāzes transports», kur doktorānts strādā un nodarbojas ar gāzes transporta sistēmas drošības problēmām kopš 2005.gada.

Metodikas pielietojums ir gāzesvadu stiprības noteikšanai un prognozēšanai, graužoša spiediena noteikšanai konkrētajā laika periodā, precīzam defektu aprēķinam un ir īpaši aktuāls, ja investīcijas eksploatācijas laiku nokalpojušo gāzesvadu rekonstrukcijā ir mazas.

Zinātnisko pētījumu rezultāti ir pielietojami arī naftas vadu un ūdensvadu inženiersistēmās.

Promocijas darba materiāli tiek izmantoti inženieru un maģistru studijās RTU programmā „Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija”. Darba apjoms ir 103 lappuses, tajā ir 6 nodaļas un izmantotas literatūras saraksts sastāv no 102 nosaukumiem. Par promocijas darba pētījumu rezultātiem ir ziņots 8 starptautiskās konferencēs, un tie ir atspejuļoti 6 starptautiskās publikācijās.

## SATURS

### IEVADS

1. DROŠAS CAURUĻVADU EKSPLUATĀCIJAS PROBLĒMAS. PĒTĪJUMA UZDEVUMU NOSTĀDNE.....	7
2. MAĢISTRĀLĀ GĀZESVADA LĪNIJASA DAĻAS TEHNISKĀ STĀVOKĻA NOVĒRTĒŠANAS METODIKAS.....	8
3. KONSTRUKCIJAS MATERIĀLU MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU IZMAIŅAS NOVECOŠANAS PROCESA GAITĀ.....	10
4. NOVECOJOŠA MATERIĀLA ELASTOPLASTISKĀ UZVEDĪBA. MATEMATISKO MODEĻU VEIDOŠANA.....	11
5. LABORATORIJAS IZMĒĢINĀJUMI. MATEMATISKĀ MODEĻA PIELIETOŠANAS PIEMĒRI.....	13
6. APRĒĶINA ALGORITMA VEIDOŠANA GĀZES APGĀDES SISTĒMU DROŠĪBAS PAAUGSTINĀŠANAI.....	18
SECINĀJUMI.....	20
PUBLIKĀCIJAS.....	21

### IEVADS

Mūsdienās naftas un gāzes rūpniecībā cauruvadu transportam ir ļoti liela loma. Pirmām kārtām tas ir sakāms par gāzes rūpniecību, kur cauruļvadi ir vienīgais gāzes transportēšanas veids no tās ieguves vietas līdz patērētājiem. Avārijas cauruvadu maģistrālēs bieži vien noved pie cilvēku upuriem, izraisa saindēšanos, vides piesārņojumu un lielas ekonomiskās izmaksas, kas saistītas ar avāriju likvidēšanu un ražošanas atjaunošanu.

No daudzajiem faktoriem, kuri nosaka gāzesvadu resursu, ir jāizdala dažādu defektu radītoā ietekme, kā arī vispārējo un lokālo fiziski-mehānisko metāla cauruļu īpašību degradāciju. Faktiskā metāla cauruļu stāvokļa novērtēšanu ierobežo to degradācija ekspluatācijas laikā, kā arī bieži sastopamā metāla cauruļu reālo raksturojumu neatbilstība sertifikātos noteiktajiem raksturlielumiem.

Tādējādi, lai pagarinātu maģistrālo gāzesvadu kalpošanas ilgumu, kā arī, lai panāktu to ietekmi uz gāzes transportēšanas sistēmu kopumā, ir pareizi jāizanalizē ilgstošas ekspluatācijas rezultātā radušies negatīvie faktori, jāattīsta konstrukcijas ekspluatācijas drošuma aprēķināšanas metodes, ņemot vērā ekspluatācijas īpatnības, diagnostikas rezultātus

un bojājumu rašanās varbūtība, kā arī jāpilnveido remontdarbu tehnoloģija, pamatojoties uz mūsdienu eksperimentālajiem pētījumiem un matemātikas modeļiem.

Par galveno pētījuma objektu ir izvēlēta Latvijas Republikas gāzes transportēšanas sistēma, kurā cauruļu stāvoklis tipiski raksturo lielāko daļu no maģistrālajiem gāzesvadiem, kas savukārt ļaus nodrošināt iegūto rezultātu plašu pielietojamību.

Saskaņā ar pastāvošajiem normatīvajiem dokumentiem, šodien cauruļvadu darbspēja tiek vērtēta pēc nestspējas. Visbiežāk aprēķinu pamatā tiek izmantots plānsienas apvalks, kas ir noslogots ar iekšējo spiedienu. Normatīvajos dokumentos netiek ņemta vērā materiālu novecošana spiediena iedarbības rezultātā, kā arī defekti un ar tiem saistītās sprieguma koncentrācijas.

Literatūras pārskats par konstruktīvo materiālu mehānisko īpašību pētījumiem to novecošanas procesā brīvā un noslogotā stāvoklī, kā arī novecošanas efekta piemērošanas metožu analīze fizikālās sakarībās, atklāj problēmas strukturāli nestabilu materiālu uzvedības aprakstā, kas ļāva uzstādīt konkrētus uzdevumus risinājumu noteikšanai disertācijas darbā. Tika atklāts, ka trūkst elastoplastisko problēmu risinājumu, kuros tiktu ņemta vērā slodzes ietekme uz metālu novecošanas procesu.

Promocijas darba galvenais mērķis ir vienkāršas strukturāli nestabilas vides modeļa, kurš attēlo cauruļvada pamatmetāla elastoplastisko uzvedību, ņemot vērā slodzes ietekmi uz novecošanas procesu, izveide. Iegūtais modelis izmantojams cauruļu sprieguma un deformācijas stāvokļa, ko ietekmē kvazistatiskās slodzes, aprēķināšanas metožu izstrādei. Viens no šī disertācijas darba prioritārajiem uzdevumiem ir arī praktisko ieteikumu izstrāde drošas maģistrālo gāzesvadu ekspluatācijas nodrošināšanai.

### **Darba uzdevumi**

- Izpētīt negatīvo faktoru rašanās iemeslus, kā arī to ietekmi uz gāzes transportēšanas tīkla drošību;
- Veikt literatūras pārskatu par maģistrālo gāzesvadu, kas būvēti no mazlēģēta konstrukciju tērauda, novecošanos;
- Veikt literatūras pārskatu saistībā ar pētījumiem par konstrukcijas materiālu mehānisko īpašību izmaiņām, to novecošanas procesā brīvā un noslogotā stāvoklī;
- Veikt laboratorijas izmēģinājumus, izmantojot no esoša gāzesvada caurules izgrieztā metāla paraugu;
- Izstrādāt matemātisko modeli pieļaujamā spiediena noteikšanai cauruļvadā,

kura pamatmateriāls ir novecojošs metāls, ņemot vērā slodzes ietekmi uz novecošanas procesu;

- Prognozēt maksimālo slodzi cauruļvadā, kura pamatmateriāls ir novecojošs metāls, ņemot vērā cauruļvada nestacionārās slodzes priekšvēsturi;
- Izstrādāt datorprogrammas aprēķinu algoritmu, kas nepieciešams, lai aprēķinātu nestspēju ilgstoši ekspluatējamajiem cauruļvadiem.

### **Zinātniskā novitāte**

- Izstrādātas cauruļvada sprieguma un deformācijas stāvokļa aprēķina metodes, kurās tiek ņemta vērā kvazistatiskās slodzes ietekme uz materiāla novecošanas procesu.
- Izstrādāta robežslodzes cauruļvadā prognozēšanas metode, kurā ņemts vērā slogošanas scenārijs gāzesvada ekspluatācijas laikā.
- Izstrādāta strukturāla aprēķina shēma, kas nepieciešama, lai aprēķinātu nestspēju ilgstoši ekspluatējamajiem cauruļvadiem, kam ir korozijas defekti, ņemot vērā slogošanas scenārijs gāzesvada ekspluatācijas laikā. Ir lietderīgi izmantot šo shēmu, izstrādājot programmas moduli, lai palielinātu gāzes transporta sistēmas drošumu.

Gāzesvadu stiprības analīze, ņemot vērā to ekspluatācijas parametru nepārtraukto mainību dažādās kalpošanas cikla fāzēs, dos iespēju operatīvi un adekvāti pārvaldīt sistēmas drošību un pamatot avāriju riska samazināšanas pasākumu nepieciešamību.

### **Analīzes un metodes**

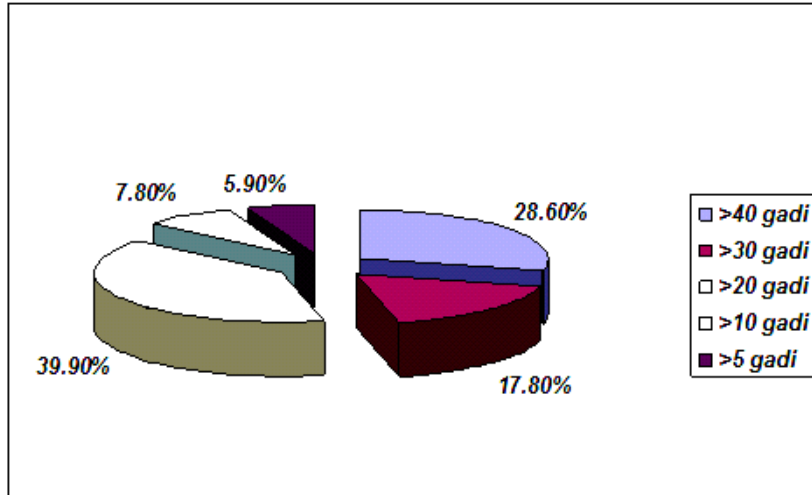
Promocijas darbā mērķa sasniegšanai izmantota analīžu metode, statistikas metodes, matemātiska modelēšana, novērtēšanas un prognozēšanas metodes.

Darbā tiek izmantota zinātniskā, speciāla un mācību literatūra, statistikas datu krājumi, dati no interneta avotiem. Veikta materiālu paraugu graujoša testēšana laboratorijās.

## **1. DROŠAS CAURUĻVADU EKSPLUATĀCIJAS PROBLĒMAS.**

### **PĒTĪJUMA UZDEVUMU NOSTĀDNE**

Dažādu reģionu magistrālo gāzes vadu vecuma struktūras statistisko datu pētījumi parāda, ka galvenā sistēmas daļa Latvijā jau ir nokalpojusi vairāk kā 30 gadus, t.i. pilnu amortizācijas termiņu (1.att). Sistēmai kļūstot vecākai, arvien aktuālāka kļūst tās funkcionalitātes uzturēšanas problēma.



1. att. Latvijā esošo gāzesvadu ekspluatācijas laiks

Kopumā cauruļvadu darbību var noteikt kā metāla konstrukcijas pretestību bojājumu (plaisu) izveidei un attīstībai konkrētos ekspluatācijas apstākļos. Bojājumu parādīšanās un attīstība noved pie kritiska stāvokļa (avārijas, gāzes noplūdes u.tml).

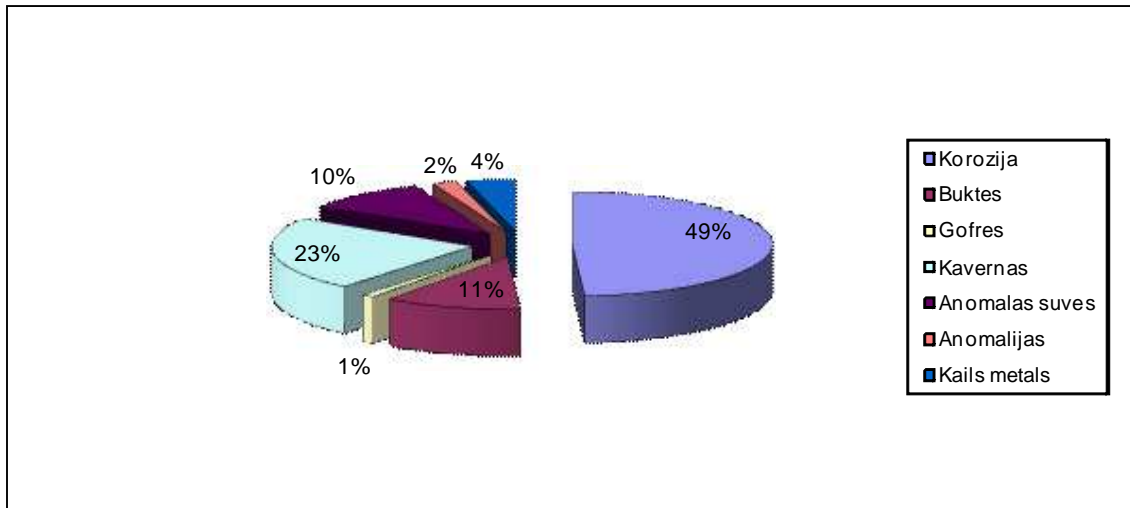
Ilggadējie cauruļvadu bojājumu pētījumi ļāva noteikt, ka galvenie no šādu bojājumu iemesliem ir dažādi defekti, kā arī caurules tērauda zemā kvalitāte, kā rezultātā parādās koncentrētas plaisas.

Promocijas darba mērķis ir modeļa un metodikas izstrāde novecojušo gāzesvadu nestspējas aprēķinam.

## 2. MAGISTRĀLĀ GĀZESVADA LĪNIJAS DAĻAS TEHNISKĀ STĀVOKĻA NOVĒRTĒŠANAS METODIKAS

Jautājumus par dabasgāzi Latvijā, Baltijas valstīs un plašāk ir pētījuši A.Dāvis, M. Gedrovičs, A. Krēsliņš, I. Platais, P. Šipkovs, V. Zēbergs, A. Ješinska u.c. Materiālu stiprības un novecošanas problēmas ir pētījuši tādi zinātnieki kā E. Lavendelis, J. Vība, V. Hričikovs. Tāpat ir jāatzīmē zinātniskie darbi, ko konstrukciju stiprības jomā ir izstrādājuši I. Ščerbickis, A. Dolgijs, S. Krasņevskis, A. Nohrins u. c. Taču salīdzinoši maz ir tādu darbu, kuros ir apskatīta novecojušo gāzesvadu drošuma paaugstināšana un aprakstīts cauruļvadu novecošanas process kvazistatiskās slodzes ietekmē.

Iekšējas diagnostikas veikšanas rezultāta izpētes objektā ir atklāts liels cauruļu sienas defektu skaits. Kā ir redzams no diagrammas (2. att.), bojājumu lielāka daļa ir koroziālie defekti.



2. att. Iekšējās diagnostikas rezultātā atklātie defekti Latvijas maģistrālajos gāzesvados.

Cauruļvadu korozijas aprēķini detalizēti aprakstīti metodiskajos norādījumos DNV-RP-F101 Corroded pipelines un ASV standartā ASME B31 G. Šīs metodes apskata korozijas defektu radītos bojājumus iekšējā noslogojuma ar spiedienu iedarbībā. Visu apskatīto aprēķinu metodiku pamatā ir tā saucamā „cilindru teorija”. Tā ļauj noteikt maksimālo spiedienu vai pieļaujamo sienas biezumu, ņemot vērā laika gaitā nemainīgās metāla īpašības, cauruļu sākotnējos izmērus un vienmērīgu sprieguma sadalījumu cauruļu sienās.

$$P_{rob} = 2\sigma_s S_0 / D_0, \quad (1)$$

kur  $P_{rob}$  – iekšējā spiediena maksimālā vērtība, MPa;

$\sigma_s$  – spriegums, MPa;

$S_0$  – caurules sienas biezums, mm;

$D_0$  – caurules diametrs, mm.

Neviena no nosauktajām metodikām neņem vērā materiāla novecošanas efektu spiediena ietekmē. Precīzākiem pieļaujamā darba spiediena aprēķiniem nepieciešams ņemt vērā konstrukcijas materiālu mehānisko īpašību izmaiņas to novecošanas procesa gaitā, kas apliecina šīs disertācijas aktualitāti.

### 3. KONSTRUKCIJAS MATERIĀLU MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU IZMAIŅAS NOVECOŠANAS PROCESA GAITĀ

Konstrukciju raksturlielumu prognozēšanai, ņemot vērā materiāla novecošanu, ir vērtīts ievērojams darbu skaits. Vairumā no tiem tiek pieņemts, ka materiāla īpašības laika gaitā mainās dažu iekšējo procesu rezultātā, kas nav atkarīgi no slodzes piemērošanas, bet gan notiek neprognozējami.

Interesi izraisa novecošanas efektu piemērošanas metožu izskatīšana, gan universālās (plašai materiālu grupai), gan atsevišķās (konkrētiem materiāliem) fizikālās sakarībās. Saistībā ar novecojošiem materiāliem ir piedāvāts liels dažādu lineāru fizikālu sakarību skaits un ievērojami mazāk nelineāru sakarību. Ņemot vērā slogojuma ietekmi uz novecošanas procesu, fizikālās sakarības ir nelineāras. Tāpēc novecojošo materiālu lineārie modeļi disertācijā netiek apskatīti.

#### V. Hričkova modelis

Fizikālā sakarība parādīta šādā veidā:

$$\sigma(t) = Q^{(1)} \left[ \begin{matrix} t \\ \varepsilon(\tau) \end{matrix} \right] + Q^{(2)} \left[ \begin{matrix} t \\ \varepsilon(\tau), t \end{matrix} \right] + Q^{(3)} \left[ \begin{matrix} t \\ \varepsilon(\tau), t \end{matrix} \right], \quad (2)$$

Ir zināms neliels skaits vispārējo modeļu, kas ļautu aprakstīt materiālu uzvedību, ņemot vērā slodzes ietekmi uz novecošanas procesu. Starp tiem tikai autora V. Hričkova modelis ļauj izmantot zināmus, labi izpētītus modeļus laikā invariantiem materiāliem. V. Hričkova izstrādātais atsevišķais modelis, kurā izmantota pazīstamā mazo elastoplastisko deformāciju teorija, ir vienīgais, kas ņemot vērā slodzes ietekmi uz novecošanas procesu ļauj iegūt skaitliskus rezultātus konstrukcijas stiprības aprēķinos. Vispārējais autora modelis ļauj aprakstīt novecojošo materiālu uzvedību gan saistībā ar mazām, gan lielām beigu deformācijām un ņemt vērā fizikālo nelinearitāti. Tomēr autora atsevišķajā modelī nav ņemtas vērā slodzes uz elastīgo īpašību izmaiņām elastoplastiskā materiāla novecošanas procesā. Tas neļauj izmantot atsevišķo modeli cauruļu parametru aprēķiniem, kurām elastīgās īpašības novecošanas procesā ievērojami mainās. Lai saglabātu šī modeļa aktualitāti cauruļvadu parametru aprēķinos, promocijas darbā ir ņemti vērā elastīgo īpašību izmaiņas novecošanas procesā.

#### 4. NOVECOJOŠA MATERIĀLA ELASTOPLASTISKĀ UZVEDĪBA. MATEMATISKO MODEĻU VEIDOŠANA

Kā sakarību cauruļvada novecojoša materiāla elastoplastiskās uzvedības modeļu veidošanai izmantojam sakarību (2),

kur  $Q^{(1)}$  - raksturo materiāla reakciju, neņemot vērā novecošanu;

$Q^{(2)}$  - nosaka perturbāciju, kuru izsauc materiāla novecošana, neņemot vērā slodzes ietekmi uz novecošanas procesu;

$Q^{(3)}$  – deformācijas procesa ietekme uz novecošanas procesu.

Ja  $Q^{(1)} + Q^{(2)} \gg Q^{(3)}$ , tad aprēķiniem var izmantot (matemātisko) perturbācijas metodi vai tā saucamo mazā parametra metodi. Šī nevienādība nozīmē to, ka slodze (funkcionālis  $Q^{(3)}$ ) maz ietekmē novecošanas procesu. Mehānikā visizplatītākie un labi izpētīti ir šāda tipa lineārie pēctecības tipa funkcionāļi:

$$Q^{(3)} = \int_0^t K(t-\tau) \varepsilon_{in}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

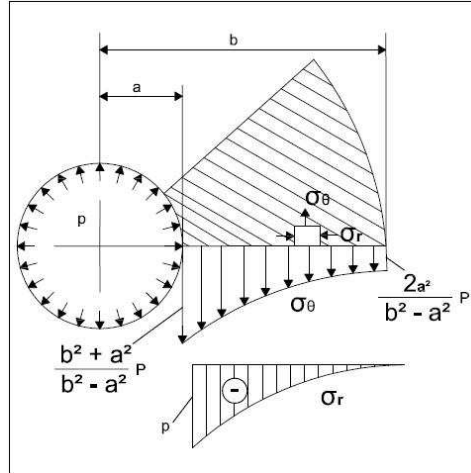
kur  $K(t-\tau)$  – kodols, kurš raksturo materiālam piemītošo ietekmes  $\varepsilon(\tau)$  atmiņu laika momentā  $0 \leq \tau \leq t$ .

Ja slodzes ietekme ir neliela, tad trešo saskaitāmo pieņem pēctecību lineārā formā, un to uzskata par perturbāciju. Šis apstāklis automātiski norāda uz atbilstošu uzdevumu risināšanas iterāciju algoritmu.

Aplūkosim cilindrisku ķermeni slogotā stāvoklī (3.att.), kura iekšējais rādiuss ir  $a$ , ārējais rādiuss ir  $b$ , slogošanas spiediens ir  $P$ . Caurules materiālu uzskatīsim par nespījamu. Jebkurā fiksētā laika momentā  $t = \text{const}$  materiāls ir aprakstāms ar Prandtla diagrammu ar elastības parametru un plūstamības parametru šādā veidā:

$$G_* = G_0 + f_G(t) + \int_0^t G(t-\tau) \varepsilon_{in}(\tau) d\tau, \quad G_0 + f_G(t) \gg \int_0^t G(t-\tau) \varepsilon_{in}(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$S_T^* = S_T + f_T(t) + \int_0^t S(t-\tau) \varepsilon_{in}(\tau) d\tau, \quad S_T + f_T(t) \gg \int_0^t S(t-\tau) \varepsilon_{in}(\tau) d\tau \quad (5)$$



3.att. Sprieguma sadalīšanas epīra

Uzdevuma atrisināšanas algoritms sastāvēs no divām daļām:

1. No zināmā lineāri-elastīgā Lamē vienādojuma nosaka deformācijas intensitāti  $\varepsilon_{in}$  pie  $G^* = G_0 + f_G(t)$ , kura ietilpst (4) un (5).
2. Pie atrastajām (4) un (5) vērtībām nosaka caurules robežstāvokli.

Jebkurā fiksētā laika momentā Lamē vienādojums garai elastīgai caurulei ir šāds:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{Pa^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right), \\ \sigma_z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Spriegumu grafiks ir parādīts 3. att.

Pieņemsim, ka  $b = a + \delta$ ,

kur  $\delta$  – caurules sienīņu biezums plānsienu caurulei.

$$\sigma_r \approx 0, \quad \sigma_\theta \approx p \frac{a}{\delta}, \quad \sigma_z = 0, \quad (7)$$

un spriegumu intensitāte:

$$\sigma_{in} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2} = P \frac{a}{\delta}, \quad (8)$$

kur  $\sigma_{in} \sim \varepsilon_{in}$  saikne, neņemot vērā slodzes ietekmi uz novecošanas procesu (risinājums bez perturbācijas).

$$\sigma_{in} = 3(G_0 + f_G(t))\varepsilon_{in}, \quad t = const, \quad (9)$$

Šajā vienādojumā atrodam deformācijas intensitāti:

$$\varepsilon_{in}(t) = \frac{\sigma_{in}}{3(G_0 + f_G(t))} = \frac{a}{3\delta(G_0 + f_G(t))} P(t), \quad (10)$$

kur  $P=P(t)$  – uzdotā slogošanas vēsture elastīgā apgabalā.

Aprobežosimies ar Hubera-Mizesa kritēriju:

$$\sigma_{in} = S_T^*, \quad t = const, \quad (11)$$

Pie uzdotās slogošanas vēstures attiecība (5), ņemot vērā (10), iegūst šādu formu:

$$S_T^* = S_T + f_T(t) + \frac{a}{3\delta} \int_0^t S(t-\tau) \frac{P(\tau)}{(G_0 + f_G(\tau))} d\tau, \quad (12)$$

(8), (12) ievietojot (11), iegūstam plastiskuma kritēriju:

$$P(t) \frac{a}{\delta} = S_T + f_T + \frac{a}{3\delta} \int_0^t S(t-\tau) \frac{P(\tau)}{(G_0 + f_G(\tau))} d\tau, \quad t = const, \quad (13)$$

Pieņemot, ka pie  $t=const$  nenotiek materiāla novecošana, saskaņā ar attiecību (13) iegūstam caurules slodzes robežvērtību:

$$P^*(t, P) = \frac{\delta}{a} \left( S_T + f_T + \frac{a}{3\delta} \int_0^t S(t-\tau) \frac{P(\tau)}{(G_0 + f_G(\tau))} d\tau \right), \quad (14)$$

Pie  $t=0$  attiecība (14) noved pie laikā invarianta materiāla rezultāta. Pie  $f_G=0$  novecošanas procesā elastīgās īpašības nemainās.

## **5. LABORATORIJAS IZMĒGINĀJUMI. MATEMATISKĀ MODEĻA PIELIETOŠANAS PIEMĒRI**

Lai, pielietojot formulu (14), iegūtu skaitliskos rezultātus un lai novērtētu cauruļvada stiprību kopumā, ir jāzina cauruļu tērauda mehānisko īpašību izmaiņas laikā gaitā saskaņā ar rekomendācijām. Šim nolūkam ir jāveic no gāzes vada, kurš kādu laiku tika ekspluatēts zem spiediena, izgrieztu paraugu laboratorijas izmēģinājumi. Lai pilnībā izmantotu šo metodiku, ir jāzina arī metāla sākotnējās mehāniskās īpašības (arhīva dati, cauruļu piegādes sertifikāti). Precīzāk, jāuzzina plūstamības robeža  $R$  un elastības modulis  $E$  vai nobīdes modulis  $G$ , triecienizturību. Bez tam jānoskaidro bez slodzes novecojuša metāla īpašības. Mehāniskie pētījumi metāla paraugiem, kuri tika ņemti no novecojušiem gāzesvadiem tika veikti Minskas pilsētas Fizikāli - tehniskā institūta laboratorijā, kā arī Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnbūves fakultātes laboratorijā (4.att.).

Pamatmetāla mehāniskie raksturojumi tika noteikti pēc izgriezumiem no sekojošo maģistrālo gāzesvadu (MG) ekspluatējamām caurulēm: 1 – MG "Virieši– Tallina", taisnšuves

caurule 720x7,0, tērauds X60; 2.1 – MG "Pleskava – Rīga", bezšuves caurule 720x9,0, st."Ц"; 2.2 – MG "Pleskava – Rīga", taisnšuves caurule 720x8,0, st.17GS; 3 – MG "Rīga–Daugavpils", bezšuves caurule 530x7,5, st."Ц"; 4 – MG "Iecava - Liepāja", bezšuves caurule 529x8,0, tērauds «C»; 5– MG "Iecava - Liepāja", bezšuves caurule 377x9,0, tērauds 2sp. Cauruļvadu ekspluatācijas ilgums ir norādīts tabulā 1.



4. att. Laboratorijas izmēģinājumi RTU laboratorijā. Materiāla stiepšana (mašīna „Zwick z150”)

Stiepes pārbaude istabas temperatūrā (+23°C ± 5°C)

Pēc metāla, kurš tika izgriezts no novecojošiem gāzes vadiem, parauga mehānisko izmēģinājumu rezultātiem ir sastādīts izmēģinājumu protokols. Materiāla faktiskas īpašības ir apkopoti 1 tabulā.

1. tabula

#### Izturīguma un plastiskuma pamatraksturojumi

Paraugu izgriezuma virziens	R, MPa	R <sub>m</sub> MPa	A, %	ε <sub>k</sub>	Ekspluatācijas ilgums, gadi
šķēr. (caurule 1)	445	564	27,1	1,31	14
garen. (caurule 1)	446	564	32,8	1,51	14
šķēr. (caurule 2.1)	332	530	29,5	1,03	35
šķēr. (caurule 2.1)	340	530	33,2	1,16	35
šķēr. (caurule 2.2)	427	617	25,4	1,28	35
garen.(caurule2.2)	410	619	30,2	1,42	35
šķēr. (caurule 3)	356	557	21,7	1,24	21
garen (caurule 3)	364	568	24,3	1,13	21
šķērs. (caurule 4)	348	521	27,0	1,34	41
<b>garen. (caurule 4)</b>	<b>327</b>	<b>518</b>	<b>35,5</b>	<b>1,2</b>	<b>43</b>
garen. (caurule 5)	290	487	33,5	1,0	41

## Triecienstigrības izmēģinājumi

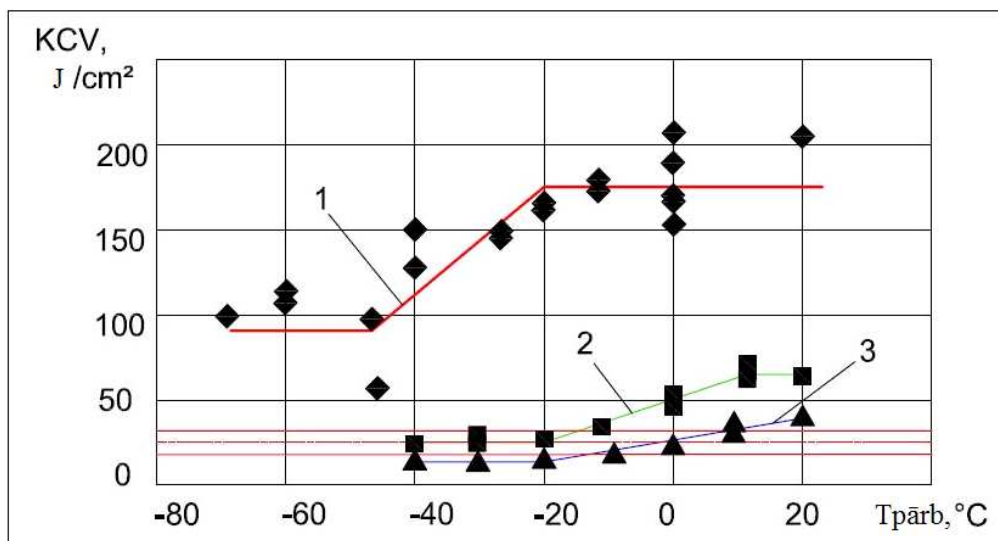
Triecienstigrības izmēģinājumi tiek plaši pielietoti, lai novērtētu metāla tieksmi uz trauslo sabrukumu zemās temperatūrās iedarbībā.

Metode balstās uz iegriezta parauga sagraušanu ar vienu svārsta vesera triecienu. Materiālu triecienstigrības izmēģinājumi tika veikti saskaņā ar EN 10045-1 standartu ar mērķi nodrošināt eksperimentu atkārtojamību un iespēju salīdzināt rezultātus. Triecienstigrības pārbaudes tika veikti Minskas pilsētas Fizikāli - Tehniskā institūta laboratorijā pielietojot pārbaudzi kompleksu AK15/30.

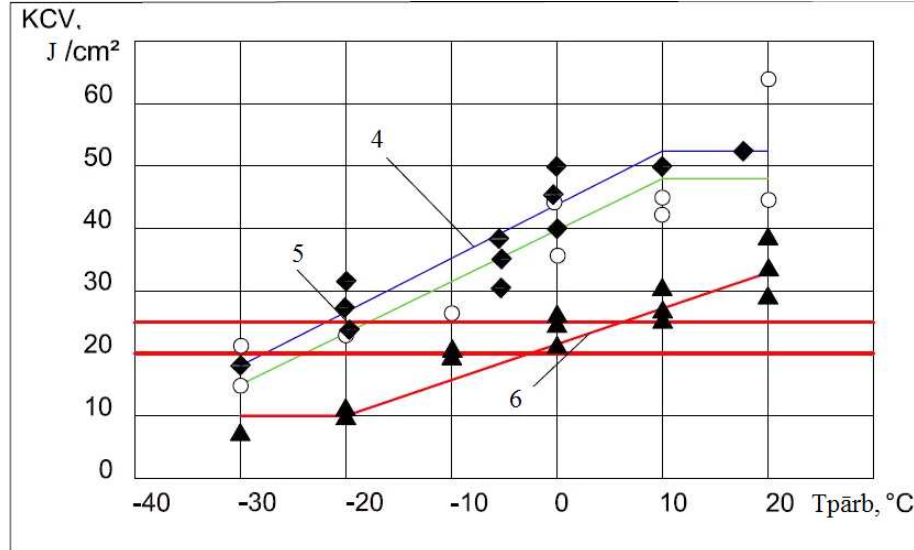
2. tabula

**Pamatmetāla nostiprinājuma līknes un stigrības parametru vidējās vērtības**

Paraugu izgriešanas virziens	A, MPa	n	Wp, MJ/m <sup>3</sup>	KCV, MJ/m <sup>2</sup>
šķērs. (caurule 1)	917	0,177	1106	2,04
garen. (caurule1)	958	0,201	1366	—
šķērs. (caurule 2.1)	861	0,179	767	0,65
garen. (caurule 2.1)	886	0,189	884	—
šķērs. (caurule 2.2)	950	0,146	747	0,425
garen. (caurule2.2)	1027	0,186	1217	—
šķērs. (caurule 3)	889	0,163	1080	0,525
garen. (caurule 3)	896	0,160	927	—
šķērs. (caurule 4)	965	0,211	948	0,545
<b>garen. (caurule 4)</b>	<b>947</b>	<b>0,236</b>	<b>930</b>	—
garen. (caurule 5)	928	0,260	682	0,335



5. att. Trieciena stigrības atkarība KCV no pārbaudes temperatūras maģistrālā gāzvada cauruļu pamata metālam



5.13. att. Trieciņa stigrības KCV atkarībā no pārbaudes temperatūras maģistrālā gāzveda cauruļu pamata metālam

Matematiskā modeļa pielietošanas piemērs. Ierobežojums – materiāls brīvā stāvoklī laika gaitā saglabā savus sākotnējos parametrus.

Aplūkojamam gadījumam pēc attiecības (14) robežslodze ir šāda:

$$P^*(t, P) = \frac{\delta}{a} \left( S_T - \frac{a}{3\delta} \int_0^t S(t-\tau) \frac{P(\tau)}{G} \cdot d\tau \right) \quad (15)$$

Matematiskā modeļa pielietošanas piemērs. Brīvā stāvoklī esošs materiāls laika gaitā ir mainījis savus parametrus.

Aplūkojamam gadījumam robežslodze pēc attiecības (14):

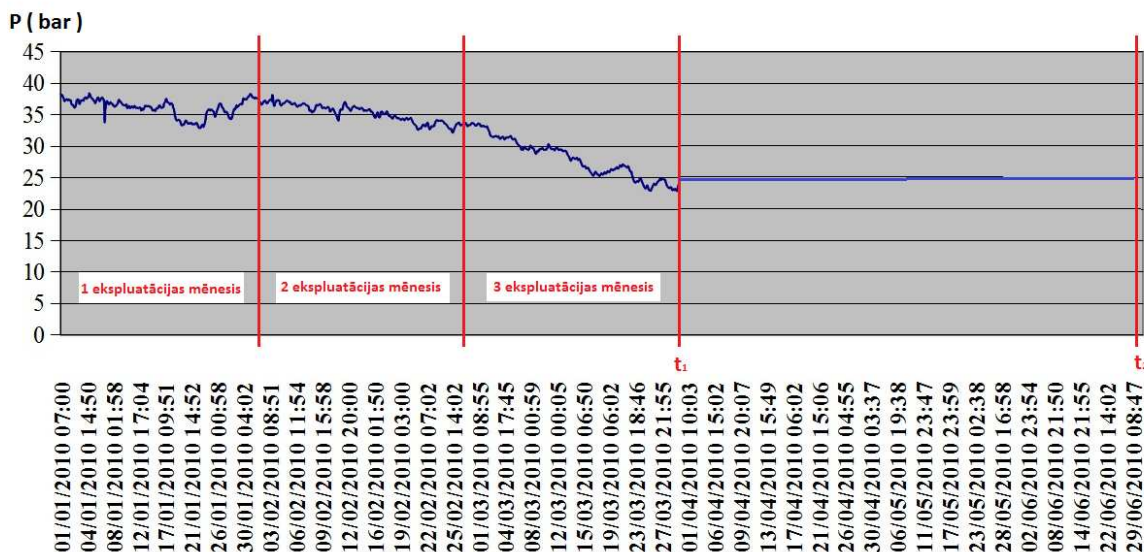
$$P^*(t, P) = \frac{\delta}{a} \left( S_T - k_1 t - \frac{a}{3\delta} \int_0^t S(t-\tau) \frac{P(\tau)}{(G_0 - k_3 t)} d\tau \right), \quad (16)$$

Matematiskā modeļa pielietošanas piemērs. Materiāls brīvā stāvoklī laika gaitā ir mainījis savus sākotnējos parametrus. Nestacionāra slodze

Spiediens P caurulē ekspluatācijas laikā var mainīties. Ir jāaplūko  $P = P(t)$ .

Kā piemēru aplūkosim iepriekšējos piemēros aplūkotā Latvijas gāzveda nestacionāru slogošanu. Spiediena izmaiņu grafiks ir parādīts 6. attēlā. Līkne  $t_1$  gāzvedu ekspluatācija 3 mēneši,  $t_2 = 6$  mēneši (prognozējamais).

## GRS Ziemeļi I - VI 2010.



6. att. Gāzesvada nestacionārā noslogošana. Spiediena izmaiņa pie GRS Ziemeļi

Otrās kārtas polinoms ir iegūts šādā veidā:

$$P(t) = 38,4 - 39,65t - 51,48t^2 \text{ bar}, \quad t \leq 3/12 \text{ gadi}, \quad (17)$$

Robežslodzes izteiksmi pieņemsim pēc attiecības (16):

$$P^*(t, P) = \frac{\delta}{a} \left( S_T - k_1 t - \frac{a}{3\delta} \int_0^t S(t-\tau) \frac{P(\tau)}{(G_0 - k_3 \tau)} d\tau \right), \quad (18)$$

Vai arī, ņemot vērā attiecību (17) iegūstām:

$$P^*(t, P) = \frac{\delta}{a} \left( S_T - k_1 t - \frac{a}{3\delta} \int_0^t k_2 \frac{38,4 - 39,65\tau - 51,48\tau^2}{(G_0 - k_3 \tau)} d\tau \right), \quad (19)$$

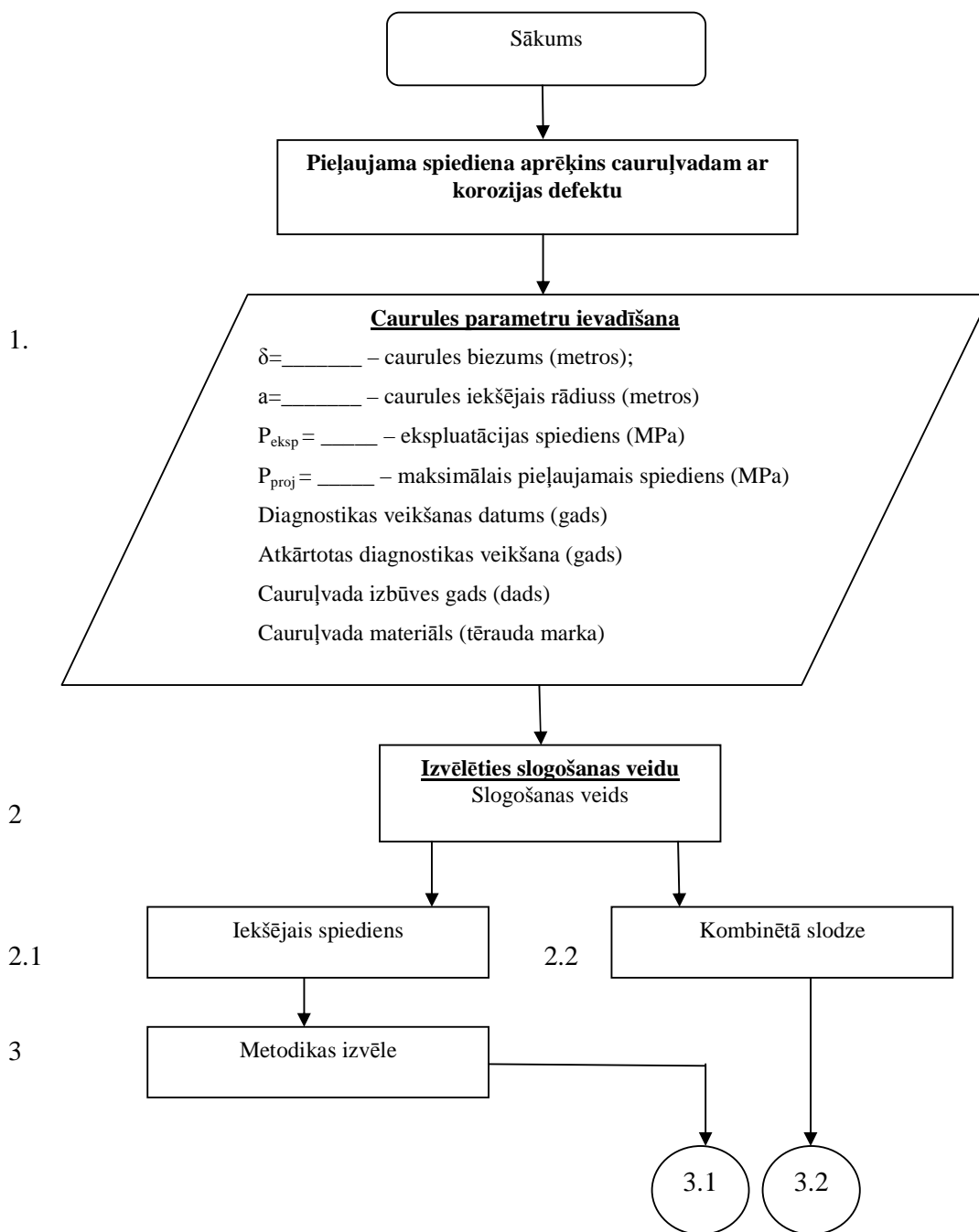
Integrējot (19), piemēram, pie  $t=3/12$  gadi, atrodam robežslodzi cauruļvadam.

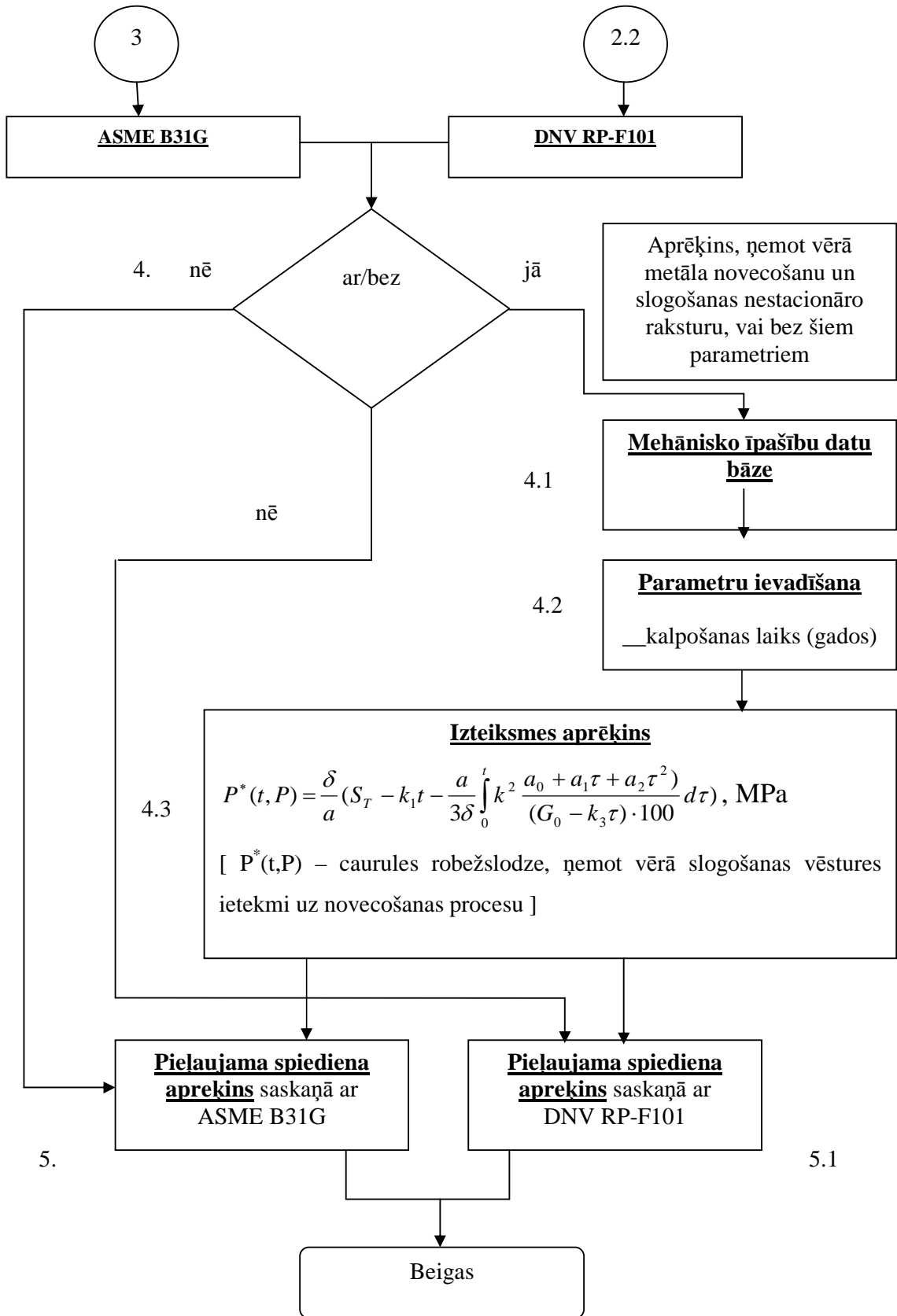
Promocijas darbā apskatāmā piemēra robežslodzes vērtība ir vienāda:

$$P^*(t_1=3/12 \text{ gadi}, p(t)) = 11,135 \text{ MPa}, \quad (20)$$

## 6. APRĒĶINA ALGORITMA VEIDOŠANA GĀZES APGĀDES SISTĒMU DROŠĪBAS PAAUGSTINĀŠANAI

Lai paātrinātu aprēķinus un modeļa adaptēšanu praktiskam pielietojumam, jāizmanto programmu komplekss, kuru ir iespējams izveidot uz šajā nodaļā piedāvātā spiediena ietekmē novecojoša cauruļvada robežslodzes aprēķina algoritma bāzes (izmantojot eksperimentālus datus). Kā cauruļvada ar korozijas defektu aprēķina bāzes modeli izmantosim 2 nodaļā aprakstītos metodes ASME B31 G un DNV RP-F101.





## SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā ir veikta detalizēta Latvijā esošo maģistrālo gāzesvadu apsekošana un darbības izvērtēšana, pielietojot pastāvošos normatīvos dokumentus un praktisko pieredzi. Maģistrālo gāzesvadu, kuru ekspluatācijas laiks sasniedz 43 gadus atzīmi, nestspējas precīzākiem aprēķiniem ierosināts ieviest materiāla novecošanas faktoru un slodzes ietekmes faktoru uz gāzesvada novecošanu tā ekspluatācijas gaitā.

2. Veikti laboratorijas izmēģinājumi ar metāla paraugiem, kuri tika ņemti no novecojušiem gāzesvadiem. Mehāniskās pārbaudes tika veiktas Minskas pilsētas Fizikāli - tehniskā institūta laboratorijā, kā arī Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnbūves fakultātes laboratorijā. Rezultāti tika apbēti un jau tiek izmantoti uzņēmuma A/S «Latvijas gāze» ekspluatācijas iecirknī «Gāzes transports» maģistrālo gāzesvadu defektu bīstamības analīzei.

3. Laboratorijas izmēģinājumu veikšanas metodika, iegūto datu apstrāde un analīze ir ieviesta uzņēmumā „Latvijas gāze” un tiek izmantota novecojušo gāzesvadu metāla mehānisko īpašību izmaiņu pētījumiem.

4. Izmēģinājumu analīze rāda, ka galvenās mehāniskās īpašības (plūstamības robeža un izturības robeža), kas nosaka gāzesvada statisko izturību, ir mainījušās, bet atbilst standartu prasībām, kuri tika pielietoti gāzesvadu būvniecības un projektēšanas periodā. Pārbaudāmā materiāla plūstamības robežas vidējā faktiskā vērtība sastāda 327 MPa. Plūstamības faktiskās robežas vērtība atšķiras no novecojušā vada plūstamības robežas par 20%. Savukārt triecienstīgrība paraugiem Nr. 2.2 un 5 samazinājās līdz kritiskai vērtībai, kas negatīvi ietekmē cauruļvadu drošību. (triecienstīgrības rezerves koeficients  $k \geq 0,9 - 1,1$ .)

5. Balstoties uz datiem, kas iegūti laboratorijas izmēģinājumos, kā arī ņemot vērā pastāvošos modeļus laikā invariantiem materiāliem, izveidots matemātiskais modelis novecojušo gāzesvadu nestspējas novērtēšanai. Modelī tiek ņemta vērā elastīgo īpašību atkarība  $E=E(t)$ ,  $G=G(t)$  no vecuma un slodzes, saistībā ar kuru notiek novecošanas process. Deformācijas intensitātes  $\epsilon_{in}$  noteikšanai ierosināts izmantot lineāri - elastīgo Lamē risinājumu.

6 Izstrādātais matemātiskais modelis guvis arī praktisku pielietojumu 2010. gadā maģistrālajā gāzesvadā Rīga – Paņevēža, novērtējot un prognozējot nestacionāri noslogoto gāzesvadu nestspēju.

7. Balstoties uz darbā izstrādāto modeli, tika izveidots aprēķina algoritms, kā arī izstrādāta novecojušo maģistrālo gāzesvadu nestspējas novērtēšanas metodika. Metodikas

pielietojums paredzēts gāzesvadu robežslodzes noteikšanai un prognozēšanai, precīzam defektu aprēķinam un ir īpaši aktuāls, kad investīcijas ekspluatācijas laiku nokalpojušo gāzesvadu rekonstrukcijā ir nepietiekamas.

8. Pētījuma rezultāti ir pielietojami arī naftas vadu un ūdensvadu inženiersistēmās.

9. Promocijas darba materiāli tiek izmantoti inženieru un maģistru studijās RTU mācību programmā „Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija”.

## PUBLIKĀCIJAS

1. Batrakovs A. Maģistrālo gāzes vadu tehniskā diagnostika: metodes un risinājumi// Latvijas būvniecība, 2008, Nr.6, 70-73. lpp.

2. Batrakov A. Reassessment of the aging arterial gas pipelines//Sc.Journal of RTU, part 7, “Geomatics”, 2010, vol. 11, p.35-38.

3. Батраков А. Е., Лаубе И. Анализ коррозионных дефектов на магистральном газопроводе с пленочным покрытием//Тр. II международной науч. заоч. конф. «Актуальные вопросы современной техники и технологии», Липецк, 02.10.2010, с.81-85

4. Батраков А. Е., Лаубе И. Расчет коррозионного повреждения на магистральном газопроводе с учетом анализа данных внутритрубной диагностики// Тр. II международной науч. заоч. конф. «Актуальные вопросы современной техники и технологии», Липецк, 02.10.2010, с. 85 – 87

5. Красневская И.С., Андрухов В.П., Кокинс А.А., Лупанс М.Н., Батраковс А.Е. Экспериментальное исследование фактических механических свойств основного металла эксплуатируемых газопроводов// Труды V международной н-т. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск,15-17.09. 2010, с. 112 – 117

6. Красневский С.М., Красневская И.С., Кокинс А., Лупанс М., Батраковс А. Исследование влияния длительности эксплуатации трубопроводов на механические свойства основного металла// Тр.VII международной научно – технической конференции, Том III, Новополоцк, 29-30.04. 2009, с. 93–97

7. Лаубе И.С., Батраков А. Е. Инновационные технологии в энергоснабжении домашних хозяйств// Тр. III международной науч. заоч. конф. «Актуальные вопросы современной техники и технологии», часть II, Липецк, 29.01.2011, с. 51 – 56