



Zinātniskā monogrāfija

Bīstamības novērtēšana rūpniecisko risku objektos

2025

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Inženierekonomikas un vadības fakultāte

Pārvaldības un drošības institūts

Mihails Urbans

Jeļena Pundure

Jānis Ieviņš

BĪSTAMĪBAS NOVĒRTĒŠANA RŪPNIECISKO RISKU OBJEKTOS

Zinātniskā monogrāfija

RTU Izdevniecība

Rīga 2025

Mihails Urbans, Jeļena Pundure, Jānis Ieviņš.
**Bīstamības novērtēšana rūpniecisko risku
objektos.** Rīga, RTU izdevniecība, 2025. 146 lpp.

Zinātniskajā monogrāfijā apkopotās riska novērtēšanas metodes sniedz vispārēju priekšstatu par riska novērtēšanu, aplūkojot vairākas zinātniskajās metodēs balstītas pieejas. Lasītājam būs iespēja iepazīties gan ar vienkāršām riska novērtēšanas metodēm, kas nosaka riska līmeni puskvantitatīvā veidā, gan ar kvantitatīvajām metodēm, kas balstītas matemātiskajā modelēšanā. Atsevišķi aplūkots algoritms par to, kā noteikt vidēji statistiskā cilvēka dzīvības vērtību, notiekot avārijai rūpnieciskā riska objektā (RRO).

Monogrāfijas zinātniskā novitāte ir dažādu riska novērtēšanas metožu apkopojums, kas sniedz iespēju riska un zaudējumu novērtēšanai avārijas RRO gadījumā. Monogrāfija būs noderīga plaša spektra speciālistiem – RRO vadībai, valsts institūcijām, pilsētplānošanas iestādēm, apdrošināšanas uzņēmumiem, kā arī studentiem, mācībspēkiem, pētniekiem un citiem interesentiem.

Recenzenti

Sanita Šuriņa, *Ph. D.*, lektore, Rīgas Stradiņa universitāte
Daina Vasiļevska, *Dr. sc. admin.*, asociētā profesore, Biznesa augstskola Turība
Piia Tint, *Ph. D.*, profesore, *Tallinn University of Technology*

Zinātniskais redaktors

Māris Ziemelis, *Dr. sc. ing.*, Rīgas Tehniskā universitāte

Publicēšanai apstiprināta RTU Zinātnes padomes 2025. gada 22. septembra sēdē, protokols Nr. 04000-3-e/10.

Literārā redaktore Rūta Lapsa
Tehniskā redaktore Anita Vēciņa
Maketētāja Baiba Puriņa
Vāka dizainers Vilnis Laizāns
Vāka attēls no *Shutterstock.com*

<https://doi.org/10.7250/9789934372124>

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2025
ISBN 978-9934-37-212-4 © Mihails Urbans, Jeļena Pundure, Jānis Ieviņš, 2025

Mihails Urbans, Jeļena Pundure, Jānis Ieviņš.
Risk Assessment at Industrial Risk Facilities.
Rīga, RTU Press, 2025. 146 p.

The risk assessment methods summarised in the scientific monograph provide a general overview of risk assessment, examining various assessment approaches based on different scientific methods for assessing the level of risk at industrial risk facilities. An algorithm on how to determine the life value of an average statistical person in the event of an accident at industrial risk facilities (hereinafter – RRO) is considered separately. The scientific novelty of the monograph is a collection of different risk assessment methods that provide an opportunity for risk assessment and loss assessment in the event of an emergency RRO. The monograph will be useful for a wide range of professionals – RRO management, public institutions, city planning authorities, insurance companies, as well as students, lecturers and researchers.

Reviewers:

Sanita Šuriņa, Ph. D., lecturer, Rīga Stradiņš University
Daina Vasiļevska, Dr. sc. admin., associated professor,
Turība University
Piia Tint, Ph. D., profesore, Tallinn University of Technology

Scientific Editor

Māris Ziemelis, *Dr. sc. ing.*, Rīga Technical University

The monograph is published in accordance with the resolution of RTU Scientific Council of 12 september, 2025, minutes No. 04000-3-e/10.

Literary Redactor Rūta Lapsa
Technical Redactor Anita Vēciņa
Layout Designer Baiba Puriņa
Cover Designer Vilnis Laizāns
Cover picture from *Shutterstock.com*

<https://doi.org/10.7250/9789934372124>

© Rīga Technical University, 2025
ISBN 978-9934-37-212-4 © Mihails Urbans, Jeļena Pundure, Jānis Ieviņš, 2025

Darbā lietotie saīsinājumi

ĀS	ārkārtas situācija
ANO	Apvienoto Nāciju Organizācija
CA	civilā aizsardzība
DP	drošības pārskats
ES	Eiropas Savienība
KM	katastrofu medicīna
MK	Ministru kabinets
RRO	rūpniecisko risku objekts
RANP	rūpnieciskās avārijas novēršanas programma
SOG	sašķidrināta oglekļa dioksīda gāze
VUGD	Valsts ugunsdzēsības un glābšanas dienests
VUŠ	viegli uzliesmojošs šķidrums

Satura rādītājs

IEVADS	6
1. RŪPNIECISKĀ RISKĀ TEORĒTISKIE JAUTĀJUMI	7
1.1. Riska būtība	7
1.2. Statistiskie riska rādītāji	13
1.3. Riska aprēķina piemēri	19
2. AVĀRIJU APMĒRU NOVĒRTĒŠANAS METODES	20
2.1. Vides zaudējumu un gaisa piesārņojuma izraisīto zaudējumu novērtēšanas metodes	20
2.2. Iespējamās avārijas noplūdes apjoma aprēķins	36
2.3. Ar ugunsbīstamību un sprādzienbīstamību saistīto seku zaudējumu novērtēšanas metodes	37
2.4. Ugunslode	47
2.5. Peļķes siltumstarojums	52
2.6. Pārspiediens	54
3. TEHNOĢĒNĀ RISKĀ NOVĒRTĒŠANAS METODES	67
3.1. Kvalitatīvās un ekspertu vērtēšanas metodes	71
3.2. Bīstamības un darbības metode	74
3.3. Atteices režīma un efekta analīzes metodes	78
3.4. Koka analīzes metodes	81
3.5. Cilvēka drošuma analīzes un cilvēka kļūdas identifikācijas metodes...	90
3.6. Kvantitatīvās riska novērtēšanas (QRA) metodes	92
3.7. Sistēmu analīzes riska novērtēšanas metodes	95
3.8. “Bow-Tie” riska analīze, jauktā metode	101
4. EKONOMISKO UN VIDES ZAUDĒJUMU NOVĒRTĒŠANAS METODES	106
4.1. Cilvēka veselībai nodarītā kaitējuma novērtēšanas metode	106
4.2. Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodes	113
NOBEIGUMS	121
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN AVOTU SARAKSTS	123
PIELIKUMI	131
SUMMARY	145

IEVADS

Grāmatā apskatītas rūpniecisko risku novērtēšanas metodes, īpašu uzmanību pievēršot kvantitatīvā riska novērtēšanas metodikai. Līdz ar ražošanas uzņēmumu dibināšanu un attīstību aktuāls kļuva jautājums par bīstamajiem ražošanas apdraudējumiem, un tas nav zudis arī modernajā postindustrializācijas laikā, pārejot uz daļēju deindustrializāciju. Tehnoloģiju attīstības vēsture un sabiedrības esošās vērtības ir veidojušas mūsdienu sabiedrības izpratni, fobijas un priekšstatu par ražošanas avārijām un to iespējamo bīstamību. Riska novērtēšanas metodes sāka attīstīties 20. gadsimta 50. gados. Tas saistīts ar straujo rūpniecības attīstību visā pasaulē. 21. gadsimta rūpnieciskā riska novērtēšanai tiek izmantotas dažādas riska novērtēšanas metodes, un tā rezultātā riska novērtēšana, izmantojot klasisko pieeju ar kalkulatora aprēķiniem, ir kļuvusi pārāk laikietilpīga. Mūsdienās pasaulē tiek piedāvātas dažādas datorprogrammas skaitliska risinājuma realizācijai, kas palīdz saīsināt aprēķinu laiku, kā arī samazināt iespēju kļūdīties aprēķinu gaitā. Diemžēl jākonstatē, ka Latvijas zinātniekiem un speciālistiem rūpnieciskā riska jomā valsts valodā pieejams ļoti ierobežots literatūras klāsts, kurā ir aprakstītas rūpnieciskā riska novērtēšanas metodes, bet veidu, kā apvienot dažādas metodes kopā, lai sasniegtu labāku rezultātu, praktiski nav. Īpaša uzmanība rūpnieciskā riska novērtēšanā sarežģīto tehnoloģiskā aprikojuma bojājumu modelēšanai un seku prognozēšanai jāpievērš jautājumiem, kas saistīti ar riska novērtēšanas metožu lietošanu kopā ar datormodelēšanas metodēm. Līdz ar to pēc pamata līmeņa apgūšanas studiju kursā “Rūpnieciskā riska novērtēšana” students, vēloties uzzināt par šo zināšanu tālāku izmantošanu, var nonākt informācijas vakuumā. Pieejamas vairākas ārzemju grāmatas, bet tām nereti ir šaura specializācija un tās ir grūti saprotamas, it īpaši cilvēkam, kurš tikai iesāk savu darbību šajā nozarē vai nepārvalda konkrēto svešvalodu pietiekamā līmenī. Šīs grāmatas saturu autori veidojuši tā, lai grāmata būtu lietderīga gan pieredzējušiem speciālistiem, gan studentiem. Priekšzināšanu apjoms, ko šī grāmata prasa no lasītāja, aprobežojas ar elementārām zināšanām algebrā. Grāmatā iekļauti gan vairāki avāriju varianti rūpniecisko iekārtu avārijas gadījumu varbūtības noteikšanai, gan pašu bojājumu bīstamo seku noteikšanas piemēri, kas, pēc autoru domām, varētu palīdzēt studentiem materiāla apgūšanā un netraucēs arī pieredzējušajiem speciālistiem.

Grāmatā aplūkotas gan vienkāršas riska novērtēšanas metodes, kas nosaka riska līmeni puskvantitatīvā veidā, gan kvantitatīvās metodes, kas balstītas matemātiskajā modelēšanā.

1. Rūpnieciskā riska teorētiskie jautājumi

1.1. Riska būtība

Mobilitāte un sociālais spiediens joprojām ik dienu maina ierasto lauku un pilsētu dzīves vidi, kā arī sistēmās notiekošo procesu ātrumu. Nepārtraukti tiek atklāti jauninājumi tehnikas un zinātnes jomā; zināšanas un tehnoloģiju attīstība uzlabo ražošanas procesus un drošību, preču un pakalpojumu kvalitāti un dzīves vidi, vienlaikus mainot biznesa, dzīves un darba ieradumus un nosakot jaunas prasības cilvēkiem, uzņēmumiem, iestādēm un valdībai. Digitālā, fiziskā un cilvēciskā pasaule turpina savstarpēji integrēties, un notiek vērienīga pārveide, ko mēdz dēvēt par ceturto industriālo revolūciju. Mainās lietu veidi, veidojas liels datu apjoms, mainās arī dzīvesveids, preču un pakalpojumu projektēšanas, ražošanas un piegādes paņēmieni, transporta veidi un dzīves temps.

Procesu vadība un rūpniecisko risku objekta (turpmāk – RRO) droša ekspluatācija ir tieši saistīta ar tehnoloģiju drošību, drošām konstrukcijām un to aizsardzību pret tehnogēniem, dabas, kā arī nesankcionētas darbības apdraudējumiem, un šīs drošības nolūkā tiek izmantoti teorētiskie materiāli un praktiskā pieredze. Avārijas situācijas iespējamība tehnogēnās vides objektos ir atkarīga no RRO aizsardzības līmeņa, kas saistīts arī ar iespējamo risku vadību – jo lielākas avārijas sekas, jo mazāka ietekme ir riska vadībai, un, lai gan hipotētiskās avārijas risks ir ļoti zems un atbilst 10^{-11} pakāpei, tā vadība praktiski nav iespējama. Vadības loma avārijas situācijā parādīta 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Avāriju situāciju veidi un RRO aizsardzības pakāpe¹

Nr.	Avārijas situācija	Aizsardzības līmenis	Riski
1.	Standarta ekspluatācijas apstākļi	Paaugstināts	Vadāmi
2.	Nobīde no standarta ekspluatācijas apstākļiem	Pietiekams	Regulējami
3.	Projekta avārijas	Daļējs	Analizējami
4.	Paredzamas avārijas	Nepietiekams	Paaugstināti
5.	Hipotētiskas avārijas	Zems	Augsti

Mašīnu elementu un konstrukciju bojājumi rodas vairāku faktoru sakritības rezultātā, tos ietekmē konstrukciju īpatnības, ekspluatācijas vide un apmērs, materiālu fizikālās un ķīmiskās īpašības, kā arī apkārtējās vides faktori. Avāriju un katastro-

1 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 15. lpp.

fu novērsšana RRO ir viens no pamatvirzieniem, lai garantētu drošu un nekaitīgu ekspluatāciju, pamatojoties uz robežvērtības stāvokļa novērtējumu dažādos avārijas attīstības scenārijos. Galvenie drošības pasākumi ir pareiza darbības procedūra, uzglabāšanas monitorings, uzraudzība, kontroles mērījumi un drošības aizsardzības līmeņa noteikšana.² Jebkurš izstrādājums (detāļa vai agregāts) var veikt noteiktas funkcijas tikai tad, ja visu ekspluatācijas laiku tas atbilst noteiktiem kritērijiem un prasībām, kas ir noteiktas iekārtas tehniskajā specifikācijā. Novirzoties no tehniskajiem parametriem, var rasties iekārtas, detaļas atteikums jeb darbības kļūda, kā rezultātā iekārta nedarbojas vai darbojas nepilnīgi.

Tehnogēnās vides negadījumu cēloņus var iedalīt divās pamatkategorijās. Pirmās negadījumu kategorijas iespējamie cēloņi ir arvien sarežģītākas ražošanas tehnoloģijas un indīgo, radioaktīvo un citu bīstamo materiālu biežāka izmantošana. Otrās negadījumu kategorijas iespējamie cēloņi ir tehnisko noteikumu un reglamenta apzināta neievērošana, zems darbinieku disciplīnas līmenis un vēlme ietaupīt.

Kopumā risku avārijas un katastrofas gadījumu ietekmi izsaka kā noteikto zaudējumu iestāšanās varbūtību cilvēkam un apkārtējai videi. Šo varbūtības risku skaitliski izsaka, izmantojot trīs komponentu kopumu (1.1. vienādojums):³

$$R = R_1 \times R_2 \times R_3, \quad (1.1.)$$

kur R_1 – bīstama gadījuma varbūtība, kas veido bīstamos ietekmes faktorus (avārijas, katastrofas varbūtība RRO, retrospektīvā – biežums);

R_2 – varbūtība, ka bīstamie faktori ietekmēs cilvēkus vai apkārtējās vides objektus, kam jānosaka ietekmes vērtība, piemēram, pārspiediena un siltumstarojuma zonas izveidošanās;

R_3 – varbūtība, ka tehnogēno faktoru iedarbība nerada noteiktos zaudējumus (īsilaicīgi – objektu vai infrastruktūras bojājumi, ilgilaicīgi – biosfēras sagraušana, cilvēku veselības pasliktināšanās).

R_1 izsaka kā materiālo vērtību zaudējumus – ēkas, iekārtas, bojājumi, cilvēku veselības pasliktināšanās un letāli gadījumi. R_2 ir negatīvs ekoloģiskais stāvoklis, piemēram, floras un faunas degradācija, cilvēku veselības pasliktināšanās. Vienu un to pašu RRO var novērtēt ar tehnogēnā un ekoloģiskā riska rādītājiem. Vissarežģītāk ir noteikt R_3 komponenti, jo nav zināms, vai ietekme būs pietiekama. Grāmatas "Objekta riska novērtēšana" autori riska vērtības noteikšanai piedāvā izmantot līdzīgu vienādojumu. Atšķiras tikai elementu apzīmējumi, un noteikšanas būtība nemainās (1.2. vienādojums):⁴

$$R = E \times A \times S, \quad (1.2.)$$

2 Liu, X., Li, J., Li, X. (2017). Study of dynamic risk management system for flammable and explosive dangerous chemicals storage area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 49, pp. 983– 988.

3 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 28. lpp.

4 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU izdevniecība, 7. lpp.

kur R – risks

E (*existence*) – varbūtība, ka pastāv noteiktie riski;

A (*avoidance*) – varbūtība, ka var izvairīties no riskiem;

S (*severity*) – kategorija, kas nosaka riska smaguma pakāpi.

Kopumā abi vienādojumi parāda, ka risku veido daži elementi, ko ir svarīgi apzināties, lai nodrošinātu RRO vadības procesus un samazinātu iespējamās zaudējumus.

Prognozējot zaudējumus (W), jāņem vērā zaudējumu varbūtība, kas atkarīga no sadales funkcijas (1.3. vienādojums):

$$F(w) = P(W < w). \quad (1.3.)$$

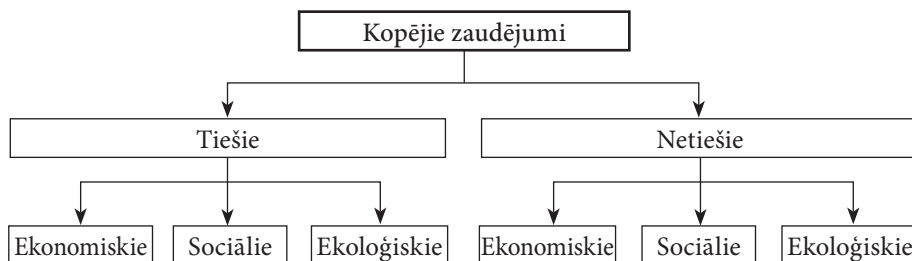
Matemātiski novērstos zaudējumus var izteikt ar 1.4. vienādojumu:⁵

$$\Delta W = W_0 - W_1, \quad (1.4.)$$

kur 1.3. un 1.4. vienādojumā W_0 un W_1 ir zaudējumi pirms un pēc aizsardzības pasākumu veikšanas.

Izvērtējot tehnogēnās vides avārijas rezultātus, izšķir tiešo, netiešo, pilno un kopējo zaudējumu apmēru.

Tehnogēnā apdraudējuma gadījumā, veicot aposterioru novērtējumu, ir svarīgi novērtēt zaudējumu kopējo apmēru, kā arī zaudējumu komponentes. Zaudējumu struktūras shēma redzama 1.1. attēlā. Veicot aprioru novērtējumu, var aprēķināt risku un iespējamās sociāli ekonomiskos zaudējumus, ņemot vērā iespējamās ietekmes varbūtību.



1.1. att. Pilno zaudējumu struktūra.⁶

Avāriju rezultātā par tiešiem zaudējumiem uzskata visu to ekonomisko struktūru zaudējumus, kas bija katastrofas vai avārijas zonā. Šie zaudējumi attiecas uz ēku un būvju bojājumiem, nesaražoto produkciju un līdzīgiem aspektiem. Sociālie zaudējumi ir cilvēku gūtās traumas vai dzīvības zaudējums. Ekoloģiskie zaudējumi ir saistīti ar zemes atmosfēras vai ūdens resursu piesārņojumu.

5 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 16. lpp.

6 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 17. lpp.

Veicot aprioru novērtējumu, zaudējumu novērtēšanai svarīga ir riska novērtēšanas procedūra, kas palīdz noteikt iespējamās tehnogēnās vides zaudējumus. Risku matemātiski var izteikt ar 1.5. vienādojumu:⁷

$$R = Q \times P, \quad (1.5.)$$

kur Q – iespējamība (negadījuma varbūtība);

P – sekas (zaudējumu apmērs).

Risks kā objekta mērvienība nav pats objekts, un to nevar pārvaldīt. Risks nevar functionēt, tādējādi nevar būt vadības objekts un tam nav funkcionēšanas rezultātu – vadīt risku nav iespējams. Nepieciešams pārvaldīt pašu bīstamības objektu, nevis tā parametrus un risks ir bīstamības parametrs. Tādējādi automašīnas vadītājs vada mašīnu, bet ne spidometra bultu, rezultātā spidometra bulta parāda tikai ātrumu, bet no ātruma ir atkarīgas avārijas sekas. Tas pats attiecās uz RRO, kur tiek pārvaldītas bīstamās iekārtas, kas saistītas ar tehnoloģiju, bet devēji un cita aparātūra parāda konkrētus datus (līdzīgi, kā spidometra bulta), piemēram, spiedienu, līmeni utt. Nevienam nav noslēpums – jo vairāk ķīmisko vielu atrodas RRO teritorijā, jo lielāka ir tā bīstamība, līdz ar to, salīdzinot ar viena tipa objektiem, avārijas sekas vienmēr būs lielākas. Rezultātā risks kā mērvienība parāda, ar kādu varbūtību var iestāties negadījums un kādas var būt šī konkrētā negadījuma sekas.

Ikvienas drošības sistēmas mērķis ir saglabāt cilvēku dzīvību un vidi, nodrošināt ekonomisko, sociālo un rūpniecisko attīstību un mūsdienu dzīves kvalitāti, tomēr vadošie nozares pētnieki, piemēram, S. Dekers (S. Dekker) un K. Picers (C. Pitzer), apgalvo, ka pastāv noteiktas aktuālas problēmas, lai uzlabotu drošības sistēmas un līdz minimumam samazinātu nevēlamas blakusparādības drošības jomā.⁸ T. Šulers (T. Schuller) apgalvo, ka nākotnē valdības lēmumi būs jāpamato ar pierādījumiem.⁹ Statistikas dati ir viens no labākajiem pierādījumiem, ko izmantot pamatotu lēmumu pieņemšanā.

Analizējot statistikas datus par avārijām un katastrofām, var identificēt procesu likumsakarības un paredzēt iespējamās tendences, kuru pamatā ir iepriekšēja negatīva vai pozitīva pārmaiņu procesa pieredze. Statistikas dati ļauj arī laikus plānot nepieciešamos pasākumus, lai samazinātu iespējamās apdraudējumus konkrētā tautsaimniecības jomā. Statistiskās datu precizitāte ir svarīgs informācijas ticamības nosacījums, lai datus varētu izmantot turpmākās situācijas prognozēšanai. Zemas kvalitātes datu izmantošana var radīt negatīvas sekas, maldināt sabiedrību un uzraudzības iestādes par sistēmas faktisko stāvokli. Izmantojot zemas kvalitātes datus, nav iespējams sniegt precīzu drošības sistēmas stāvokļa raksturojumu, kas savukārt var negatīvi ietekmēt kopējo sistēmas darbību. Turpretī augstas kvalitātes dati var

7 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība. 7. lpp.

8 Dekker, S., Pitzer, C. (2016). Examining the asymptote in safety progress: a literature review. *Int. J. Occup. Safety Ergon.* 22 (1), pp. 57–65.

9 Schuller, T. (2006). Evidence and policy research. *European Educational Research Journal*, Volume 5 (1), pp. 57–70.

ievērojami uzlabot objekta darbību un sistēmas drošību.

Statistikas datu pieejamība un to kvalitāte ietekmē RRO darbu, drošību valstī un pasaulē, kā arī sniedz iespēju RRO vadībai, valsts pārvaldes struktūrām un sabiedrībai pieņemt atbilstošus un pamatotus lēmumus, lai noteiktu optimālo problēmas risinājumu un lai to īstenotu. Pētniece M. Martinē (*M. Martine*) uzskata, ka statistikas uzdevums nav tikai apkopot datus, bet ir daudz plašāks, aptverot ne tikai statistikas metodoloģiju, bet vairākas darbības, ko veic, apkopojot statistiskos datus, – nepieciešamo datu savākšanu, apstrādes procesa plānošanu un faktisko procesu, kas ietver datu vākšanu, datu analīzi un izplatīšanu mērķauditorijai.¹⁰ Statistika neprognozē sekas, bet ar datu palīdzību kvantitatīvi raksturo iepriekšējo lēmumu pieņemšanas kļūdas un panākumus. Statistika ir tikai rīks, ar kura palīdzību var veidot pamatotas prognozes.

Par tehnogēniem vides apdraudējumiem, kas var izraisīt avāriju vai katastrofu, uzskatāmi šādi faktori:

- 1) avārijas vai katastrofas cēloņi, kas pamatoti ar tehnogēnās vides neizpētītām likumsakarībām (dažus procesus, ko cilvēce šajā attīstības posmā nevar izskaidrot un līdz ar to nevar arī pārvaldīt);
- 2) nepareizs objektu izvietojums, kas var apdraudēt vidi;
- 3) būtisks iekārtu nolietojums, novēlota detaļu un novecojošu tehnoloģiju nomaiņa;
- 4) ražošanas, glabāšanas, pārvadāšanas materiālu apjomu pieaugums un nepareiza bīstamo vielu un tehnoloģisko iekārtu izmantošana;
- 5) atbildības un pienākuma apziņas samazināšanās, kā arī noteikumu un reglamentu neievērošana;
- 6) nepietiekami drošības pasākumi;
- 7) objekta tehniskā stāvokļa nepietiekama vai vāja uzraudzība;
- 8) tehniskās kontroles iekārtu zema efektivitāte, procesu bezavārijas apstādināšanas ierīču vājās tehniskais stāvoklis;
- 9) personāla nepietiekama gatavība rīcībai avārijas gadījumā;
- 10) neefektīva lokālo un centralizēto vides monitoringa, kontroles, identifikācijas iekārtu izmantošana.

Kopumā var konstatēt, ka nav vienota bīstamības novērtēšanas veida un riska novērtēšanas metožu. Nav vienas vienotas metodikas, kā novērtēt risku, katrai situācijai nepieciešams izvēlēties piemērotāko riska novērtēšanas metodi, kā arī riska novērtēšanu nepieciešams veikt, balstoties pieejamajā informācijā par RRO, tehnoloģijām un pieejamajiem resursiem, ņemot vērā, kādam cilvēku lokam ir paredzēti riska novērtēšanas rezultāti. Tādējādi riska jēdziena lietojums ļauj pārnest bīstamību uz izmērāmu kategoriju un var secināt, ka risks ir bīstamības mērvienība, kas ietver negadījuma varbūtību un iespējamās sekas.

Pasaulē ir noteikti divi galvenie principi, no kuriem ir atkarīgs drošības līmenis RRO. Pirmais princips ir *ALAPA* (angļu val. – *as low as practicably achievable*) jeb

10 Martin, M. (1981), Statistical Practice in Bureaucracies, *Journal of the American Statistical Association*, Volume 76, pp. 1–8.

absolūtās drošības princips, kas paredz nepieciešamību noteikt praktiski zemāko iespējamo apdraudējuma līmeni. Šī principa galvenā nepilnība ir neefektīvs naudas izlietojums vai pat bīstamības palielināšanās pretēji vēlamajam tās samazinājumam. *ALAPA* principa galvenais izaicinājums ir noteikt pieļaujamo bīstamības līmeni jeb to, cik drošam jābūt objektam, tāpēc pasaules RRO bīstamības novērtēšanai mūsdienās izmanto *ALARA* principu (angļu val. – *as low as reasonably achievable*), kas paredz noteikt tik zemu apdraudējuma līmeni, kādu saprātīgi ir iespējams sasniegt,¹¹ t. i., lai bīstamība būtu samazināta līdz pieļaujamam līmenim. Pieļaujamais risks ietver pieļaujamus zaudējumus, kas nepārsniedz līdzekļus, kas nepieciešami radušos zaudējumu apmaksai, nepazeminot kopējo dzīves līmeni. Savukārt nepieļaujamais risks samazina dzīves kvalitāti zem kritiskā līmeņa, un tā atjaunošanai paredzētos naudas līdzekļus nav iespējams piešķirt nepieciešamā apmērā, piemēram, tiek pārsniegts budžets. Tas var izraisīt sabiedrības neapmierinātību, masu nekārtības un politiskā kursa izmaiņas.

ALARA principu pasaulē mēdz apzīmēt arī citādi. Citi šim principam ļoti tuvi un līdzīgi nosaukumi apkopoti 1.2. tabulā. Vispirms tika ieviests saīsinājums *ALAPA*, 20. gadsimta 70. gadu sākumā to aizstāja ar *ALARA* – ASV un *ALARP* – Eiropā.¹²

1.2. tabula

Bīstamības novērtēšanas principi

Nr.	Saīsinājums	Skaidrojums angļu valodā	Skaidrojuma tulkojums
1.	<i>ALAPA</i>	<i>as low as practicably achievable</i>	pēc iespējas zemāk
2.	<i>ALARAC</i>	<i>as low as reasonably achievable</i>	tik zemu, cik saprātīgi iespējams
3.	<i>ALARAT</i>	<i>as low as reasonably attainable</i>	tik zemu, cik pamatoti sasniedzams
4.	<i>ALARP</i>	<i>as low as reasonably practicable</i>	tik zemu, cik praktiski iespējams
5.	<i>SFAIRP</i>	<i>so far as is reasonably practicable</i>	ciktāl tas praktiski iespējams

Zaudējumu novērtēšanas RRO vadības pamatpienākumi ir:

- sistematizēt un uzskaitīt visas avārijas pēc vienotiem ekonomiskiem kritērijiem;
- novērtēt RRO riskus;
- pieņemt pamatotus lēmumus drošības sistēmas ietvaros;
- novērtēt bīstamības un iespējamo zaudējumu samazināšanas pasākumus.

Nepieciešams uzsvērt, ka ar vieniem un tiem pašiem izejas datiem, izmantojot dažādas riska novērtēšanas metodes, var iegūt dažādus rezultātus, tāpēc pieredzējuši speciālisti, manipulējot ar konkrēto metožu nepilnībām, var panākt riska līmeņa samazināšanu vai palielināšanu, īpaši tas attiecas uz ekspertu vērtēšanas metodēm, kad tiek vērtētas tehnoloģijas, kas nav īpaši labi izpētītas.

11 Black, S. C., Niehaus, F., Simpson, D. M. (1979). *How Safe is "Too" Safe? WP-79-68*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

12 Wilson, R. (2002). Precautionary principles and risk analysis. *Technology and Society Magazine, IEEE*, Vol. 21 (4), pp. 40–44.

1.2. Statistiskie riska rādītāji

Katrs nevēlamais notikums var notikt saistībā ar konkrētu upuri – riska objektu. Riska objektu un nevēlamo notikumu attiecība ļauj atšķirt individuālo, avārijas (tehnisko), ugunsgrēka, vides, grupveida, sociālo un ekonomisko risku.

Lai novērtētu risku, nepieciešams izmantot šādus kvantitatīvos rādītājus:

- avārijas risks (tehniskais risks), kas parāda avārijas situāciju biežumu gadā;
- individuālais risks, kas parāda cilvēka bojāejas biežumu (vai traumēšanu) gadā;
- grupveida risks (matemātiski sagaidāmais bojāgājušo vai traumēto cilvēku skaits gadā) raksturo ar objekta darbību nesaistīta cilvēka bojāejas varbūtību avārijas gadījumā, tam atrodoties noteiktā punktā attiecībā pret bīstamo objektu; individuālo risku aprēķina viena gada ilgai ekspozīcijai;
- sociālais risks atspoguļo varbūtību, ka avārijas rezultātā dzīvību var zaudēt noteikts cilvēku skaits; nosakot sociālo risku, tiek novērtēts cilvēku skaits, kas var tikt pakļauts noteikta līmeņa kaitīgai iedarbībai un aprēķināts potenciāli iespējamo upuru skaits.¹³

Tomēr jāuzsver, ka šie plaši izmantotie termini parasti neraksturo tādus gadījuma mērogus, kas ir ļoti reti, bet – ļoti smagi, kā arī gadījumus, kas ir ļoti bieži, bet ar ļoti maziem zaudējumiem. Tomēr šie rādītāji ir izmantojami, un no tiem var gūt kopēju priekšstatu par avāriju risku.

Visvairāk izplatītie rādītāji

1. Avārijas risks (tehniskais risks, R_t) – raksturo avāriju biežumu (avārijas varbūtība vienā objektā laika vienībā)

$$R_t = \frac{n}{N \times \Delta T}, \text{ vienības/gads; } \quad (1.6.)^{14}$$

kur n – objektu vai sistēmu skaits, kur notikusi avārija periodā ΔT ;

N – identisko ekspluatējamo sistēmu vai objektu skaits.

Mērvienības dažādām situācijām var atšķirties, piemēram:

- komunikācijām – avār./km · gads;
- autotransportam – avār./mašīn. · gads;
- aviācijas lidojumiem – avār./reisi · gads.

2. Individuālais risks

$$R_i = \frac{n}{N \times \Delta T} \times \frac{m_{\text{let}}}{m_{\text{dar}}}, \text{ vien./gads vai letāl. iznāk./strādājošie, } \quad (1.7.)^{15}$$

13 Vadlīnijas rūpniecisko avāriju riska objektu izvietošanas minimālo drošības attālumu un teritorijas izmantošanas un apbūves ierobežojumu noteikšanai teritorijas plānošanas dokumentos (2017). Rīga. 3. lpp.

14 Jemeljanovs, A., Leviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība. 16. lpp.

15 Jemeljanovs, A., Leviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība. 17. lpp.

kur n – objektu vai sistēmu skaits, kur notika avārija periodā ΔT ;
 N – identisko ekspluatējamo sistēmu vai objektu skaits tajā pašā periodā;
 m_{let} – vidējais letālo iznākumu skaits vienā objektā;
 m_{dar} – vidējais strādājošo skaits objektā;
 ΔT – laiks (objekta ekspluatācijas laiks).

Individuālais risks var būt mazāks vai vienāds nekā tehniskais risks. Piemēram:

- aviokatastrofas, kad bojā iet visi, kas atradās uz borta: $m_{\text{let}} - m_{\text{dar}}$ un $R_i = R_t$;
- cehs, kurā notiek bīstama ražošana:

$$R_i = \frac{n}{N \times \Delta T} \times \frac{m_{\text{let}}}{m_{\text{dar}}} \leq R_t; \quad (1.8.)^{16}$$

- iedzīvotājiem bīstama objekta tuvums:

$$R_i = \frac{n}{N \times \Delta T} \times \frac{m_{\text{let}}}{m_{\text{iedz}}} \leq R_t; \quad (1.9.)$$

- iedzīvotājiem bīstama objekta tuvums ar nosacījumu, ka cilvēki pastāvīgi ne-atrodas savā dzīves vietā:

$$R_i = \frac{n}{N \times \Delta T} \times \frac{m_{\text{let}}}{m_{\text{iedz}}} \times \frac{T_{\text{past}}}{T_{\text{gads}}} \leq R_t, \quad (1.10.)$$

kur T_{past} – laiks, cik ilgi iedzīvotāji pastāvīgi atrodas dzīves vietā (stundas);
 $T_{\text{gads}} - 8760$ (st.).

Pēc būtības individuālais risks ir tehniskā riska reizinājums uz vienu vai vairāku nesaistīto gadījumu varbūtību, kas izraisa cilvēka nāves gadījumu.

$$R_i = R_t Q_i, \quad (1.11.)$$

kur $Q_i - i$ notikuma varbūtība.

Pieņemams individuālais risks ir risks, ko pieņem iestādes visā pasaulē dažādu apdraudējumu diapazonā no 1×10^{-4} un 1×10^{-6} gadā.¹⁷ Ja konkrētam iemeslam ir zināms individuālais risks, piemēram, $R_i = 10^{-6}$, tas nozīmē, ka viens no miljona cilvēku, kuri ir pakļauti šīs bīstamības iedarbībai, ies bojā šīs ietekmes dēļ. Parasti visi riska novērtējumi tiek sniegti laika vienībā – gadā. Šajā gadījumā tiek aprēķināts nevis katras personas individuālais risks, bet gan individuālais risks cilvēku grupām, kurām raksturīga vairāk vai mazāk vienāda laika pavadīšana dažādās nelabvēlīgās zonās apkārt RRO vai objekta teritorijā. Parasti runa ir par individuālu risku darbiniekiem un RRO apkārtējo teritoriju iedzīvotājiem vai šaurākām grupām, piemēram, dažādu specialitāšu darbiniekiem. Individuālā riska skaitliskā vērtība ir riska līmeņa kvantitatīvs raksturlielums. Individuālā riska novērtēšana ir universālais bīstamības raksturojums cilvēkiem, kas padara to par pamatu pieļaujamā riska līmeņa normēšanā. Tajā pašā laikā jāatceras, ka šī vērtība nekādā gadījumā nav pietiekama, lai pilnībā raksturotu negatīvo notikumu ar nevēlamām sekām.

16 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 14. lpp.

17 Baecher, G. B., Abedinsohi, F., Patev, R. C. *Societal Risk Criteria for Loss of Life*. University of Maryland, p. 15.

Ugunsgrēka risks

Ar ugunsgrēka riska analīzi saprot nevēlamo notikumu atklāšanu, kas izraisa bīstamu ugunsgrēku, šāda veida notikumu iestāšanās mehānismu analīzi, iespējamo negatīvo iedarbību un briesmu realizācijas seku atklāšanu. Ugunsgrēka riska novērtēšana paredz ugunsgrēka riska skaitliskās novērtēšanas procedūru. Riska vadība ir pasākumu komplekss, kas vērsts uz ugunsgrēka cēloņu preventīvu novēršanu vai to seku samazināšanu, t. i., praktisko darbību riska samazināšanai. Pie tās pieder normatīvi tiesiskā darbība un ugunsdrošības valstiskā regulēšana.

Visas zināmās metodes, ko izmanto riska analīzei un novērtēšanai, var sagrupēt vispārējās pieejās.

Pirmā pieeja ietver metodes, kas balstās ugunsgrēka izcelšanās biežumā un tā radīto gaidāmo zaudējumu indeksācijā. Vairumā gadījumos šīs metodes balstās to speciālistu, kas nodarbojas ar uguns un sprādziendrošības nodrošināšanas problēmām, pieredzes apkopošanā, tāpēc tās pieskaitāmas empīriskām metodēm.

Otrā pieeja paredz statistisko datu izmantošanu par ugunsgrēkiem, to izcelšanās cēloņiem un radīto kaitējumu. Ja ir objektīvi statistiskie dati, statistiskās metodes ļauj saņemt patiesus rezultātus. Tādas metodes labāk piemērotas riska novērtēšanai objektos ar lielu praktiskās darbības pieredzi, kur uzkrāta nepieciešamā statistiskā informācija. Modernajām tehnoloģijām un jaunajiem objektiem, kuros statistika par ugunsgrēkiem un avārijām nav, izmanto aprēķina analītiskās metodes.¹⁸ Kopumā var konstatēt, ka par vienu no efektīvākajām un biežāk izmantotajām metodēm informācijas ieguvei par negadījumu iemesliem RRO, par iepriekšējiem negadījumiem un to zaudējumu apmēru uzskatāma iepriekšējo avāriju, ugunsgrēku, katastrofu un negadījumu analīze. Tā sniedz nenovērtējamu informāciju par pieļautajām kļūdām, un šo informāciju var izmantot, izstrādājot efektīvu stratēģiju un nodrošinot procesu efektīvu pārvaldību.

Ugunsgrēka izcelšanās risku (ugunsgrēka risku) var noteikt pēc tās pašas formulas kā avārijas (tehnisko) risku (1.6. vienādojums), ja uzdevums ir noteikt riska līmeni viena tipa objektiem.

Kopumā ugunsdzēsības apstākļi teritorijā (valstī, pilsētā) var būt noteikti atkarībā no ugunsgrēku skaita, un to var attiecināt ne tikai uz objektu skaitu, bet arī uz iedzīvotāju skaitu.

Ugunsgrēka risks ietver nejaušu notikumu plūsmas intensitāti, autoru apskatītajā gadījumā – ugunsgrēku gadā, ko nosaka uz statistiskā pamata no korelācijas. Kopumā to var atspoguļot šādi:

$$R_u = \frac{n}{N \times \Delta T}, \text{ vienības/gads,} \quad (1.12.)$$

kur N – iedzīvotāju skaits, cilvēki;

n – ugunsgrēku skaits novērojumu periodā ΔT .

Individuālais ugunsgrēka risks (cilvēka bojāejas risks)

18 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība, 90. lpp.

$$R_{ui} = \frac{N_n}{N \times \Delta T}, \text{ vienības/gads,} \quad (1.13.)^{19}$$

kur N_n – bojāgājušo skaits pēc statistikas datiem novērojumu periodā ΔT .

Ugunsgrēka izcelšanās risks pētījuma objektā

$$R_{uo} = \frac{N_{ob}^{ug}}{N_{ob} \times \Delta T}, \text{ objekti/gads,} \quad (1.14.)$$

kur N_{ob}^{ug} – ugunsgrēku skaits pilsētā noteiktā laika periodā ΔT ;

N_{ob} – objektu skaits pilsētā.

Ņemot vērā to, ka bojāgājušo skaits ugunsgrēka gadījumā atkarīgs no dažādiem papildu faktoriem, bet galvenokārt no cilvēku savlaicīgas evakuācijas no ugunsgrēka vietas, teorētiski prognozējot individuālo ugunsgrēka risku, tiek izmantots 1.15. vienādojums²⁰.

$$R_i = R_u (1 - P_e)(1 - P_{ul}), \text{ gads}^{-1}, \quad (1.15.)$$

kur R_u – ugunsgrēka izcelšanās ēkā varbūtība gada laikā;

P_e – cilvēku evakuācijas varbūtība;

P_{ul} – varbūtība, ka ugunsdrošības līdzekļi sekmīgi izpilda savu uzdevumu.

Rādītāju P_{ul} aprēķina ar ugunsdrošības līdzekļu elementu drošības analīzes palīdzību, kā arī saskaņā ar to secīgu ieviešanu darbībā ugunsgrēka gadījumā. Šim nolūkam izstrādā ugunsgrēka attīstības scenāriju, uzbūvē notikumu koku, ar kura palīdzību veic attiecīgus aprēķinus.

Lai salīdzinātu dažādas pilsētas vai novadus, kur var būt dažāda situācija ar ugunsgrēkiem, ir iespējams izmantot riska indeksu pieeju, kas tiek noteikta kā riska indeksu grupu summa: R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 .²¹

$$k'_{n0} = \sum_{i=1}^5 n(R_i), \quad (1.16.)$$

kur $n(R_i)$ – riska grupas indekss, kur $i = 1, \dots, 5$.

Riska grupas indekss $n(R_i)$ tiek noteikts saskaņā ar ugunsgrēka bīstamības riska rādītāju ranžēšanu (no R_1 līdz R_5) pētāmajām pilsētām vai novadiem, pēc kā indeksi tiek summēti, un tiek noteikts kompleksais rādītājs par ugunsgrēka bīstamību konkrētai pilsētai vai novadam – jo lielāks riska rādītājs, jo zemāks ir indekss.

- R_1 – risks cilvēkam saskarties ar ugunsgrēka bīstamajiem faktoriem (uz 1000 cilvēkiem);
- R_2 – letāla iznākuma risks (uz 100 ugunsgrēkiem);
- R_3 – letāla iznākuma risks, notiekot ugunsgrēkam gadā (uz 100 000 cilvēkiem);

19 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 15. lpp.

20 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU izdevniecība, 91. lpp.

21 Kusainov, A. B. (2017). *Ocenka kompleksnogo pokazatelja požarnoj opasnosti gorodov respubliki Kazahstan*. (Kazahstānas pilsētu ugunsbīstamības kompleksā rādītāja novērtēšana). Kokšetau Tehniskā institūta vēstnesis Nr. 1. 19.–28. lpp.

- R_4 – risks iegūt traumas (uz 100 ugunsgrēkiem);
- R_5 – traumēšanas risks, notiekot ugunsgrēkam gadā (uz 100 000 cilvēkiem).

Grupveida un sociālais risks

Grupveida un sociālais risks raksturo avārijas vai katastrofas mērogu. Grupveida risks ir saistīts ar iedzīvotāju sociālās grupas atrašanos potenciālās bīstamības rajonā (nodarbinātība objektā vai dzīvesvietas atrašanās RRO tuvumā). Grupveida risks ir noteiktu veidu bīstamības realizācijas seku integrālais raksturojums noteiktā ģeogrāfiskā punktā, un tas raksturo avārijas mērogu (atšķirībā no individuālā riska).²² Grupveida risks teritorijā, kas tieši robežojas ar RRO, raksturojams kā matemātiski sagaidāms ietekmēto cilvēku skaits (letālie un sanitārie zaudējumi):

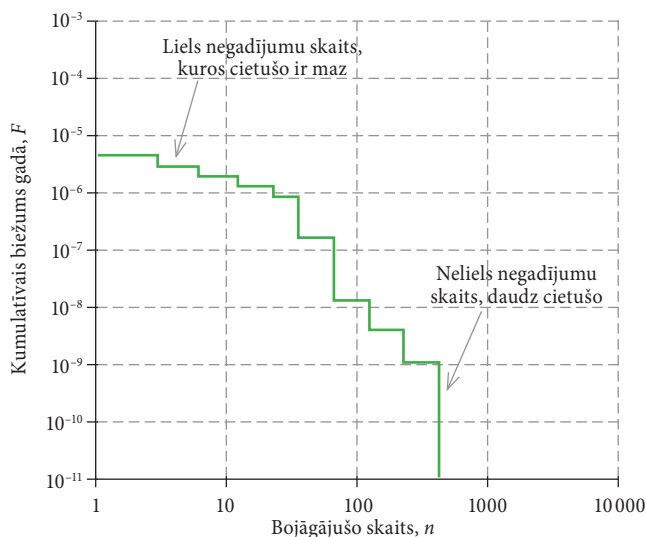
$$M(n) = R_i f_n F = R_i N, \text{ cilv.}, \quad (1.17.)$$

kur $f_n = N/F$ – iedzīvotāju blīvums, cilv./km²;

F – teritorijas platība, kur tiek novērtēts grupveida risks, km²;

N – cilvēku skaits.

Sociālais risks atspoguļo cilvēku bojāejas mērogu, notiekot katastrofai vai avārijai. Sociālo risku atspoguļo, izmantojot F/n diagrammu, kas atkarīga no bojāgājušo skaita un situācijas biežuma ar bojāgājušo skaitu ne mazāku par n (Farmera likne). Diagramma F/n parasti parāda nāves gadījumus no visiem avārijas notikumiem un visiem atteikuma režīmiem kādā noteiktā objektā, līknes piemērs redzams 1.2. attēlā.



1.2. att. Diagramma F/n .²³

22 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība, 123. lpp.

23 Risk Engineering [tiešsaiste]. [Skatīts 2023. gada 16. aprīlī]. Pieejams: <https://risk-engineering.org/concept/Farmer-diagram>.

Potenciālais sociālais risks ir tāds riska līmenis, kas ir noteikts sabiedrībai kopumā noteiktā tās attīstības līmenī un kas ir attaisnots no sabiedrības ekonomisko iespēju un morāles viedokļa. Tas ir neizbēgams risks, ko sabiedrība ir gatava uzņemt tehnosfēras pārvaldībā un kas dod iespēju iegūt atbilstošu atdevi, salīdzinot ar zaudējumiem tās radīšanai un funkcionēšanai, t. i., kas nodrošina dzīves kvalitātes uzlabošanos.

Vienkāršs piemērs, kas ilustrē atšķirību starp individuālo un sociālo risku. Divas identiskas situācijas, katrā no tām ir 1000 cilvēku liela grupa. Pirmā situācija – avārijas notikums notiek 1000 reizes gadā, katru reizi ietekmējot vienu cilvēku. Pastāv varbūtība, kas ir 0,001, ka katrā avārijas reizē viens cilvēks tiks nogalināts. Tādējādi individuālais risks ir 0,001, paredzamais nāves gadījumu skaits – 1,0. Otrā situācija – nejauša avārija notiek tikai vienu reizi ar varbūtību 0,001, taču tiek nogalināti visi 1000 cilvēki. Individuālais risks joprojām ir 0,001, un paredzamais bojāgājušo skaits joprojām ir 1,0. Daudzi cilvēki uzskatītu par pieņemamām abas situācijas, lai gan šīs situācijas ir ļoti atšķirīgas.²⁴

24 Linnerooth, J. (1996). "Does Society Mismanage Risk?" In *Wise Choices*, 133–51. Cambridge: Harvard University Press.

1.3. Riska aprēķina piemēri

1. piemērs

Nepieciešams noteikt individuālo risku, lidojot ar uzņēmuma "X" lidmašīnām.

Pēc esošiem datiem uz miljonu reisu šim uzņēmumam ir 15,43 katastrofas. Uzņēmuma gada pārskata dati liecina, ka kopējais lidojumu skaits gadā ir 225×10^3 .

Risinājums.

Laiks, kurā izpildīts viens miljons reisu, ir

$$\Delta T = \frac{10^6}{225 \times 10^3} = 4,44, \text{ gadi.}$$

Pēc 1.6. formulas:

$$R_i = R_t = \frac{15,43}{4,44 \times 10^6} = 3,4 \times 10^{-6}, \text{ reisi/gads.}$$

2. piemērs

Avārijas risks RRO, kur pēc statistikas datiem viena tipa RRO no 2000. līdz 2020. gadam notika 15 avārijas, kopā pasaulē šajā periodā strādāja 420 viena tipa RRO ar vidējo ekspluatācijas laiku 12 gadi.

Risinājums.

Avārijas risks pēc 1.6. formulas ir

$$R_t = \frac{15}{420 \times 12} = 2,9 \times 10^{-3}, \text{ avārijas/gads.}$$

3. piemērs

Pēc statistikas datiem Latvijā 2021. gadā notika 6717 ugunsgrēki, kuros gāja bojā 102 cilvēki. Iedzīvotāju skaits Latvijā 2021. gadā bija 1 893 223. Nepieciešams noteikt ugunsgrēka un individuālo ugunsgrēka risku.

Risinājums.

Ugunsgrēka (tehniskais) risks tiek aprēķināts, izmantojot 1.12. formulu.

$$R_u = \frac{6717}{1893223 \times 1} = 3,5 \times 10^{-2}, \text{ vienības/gads.}$$

Ugunsgrēka individuālais risks tiek aprēķināts, izmantojot 1.13. formulu.

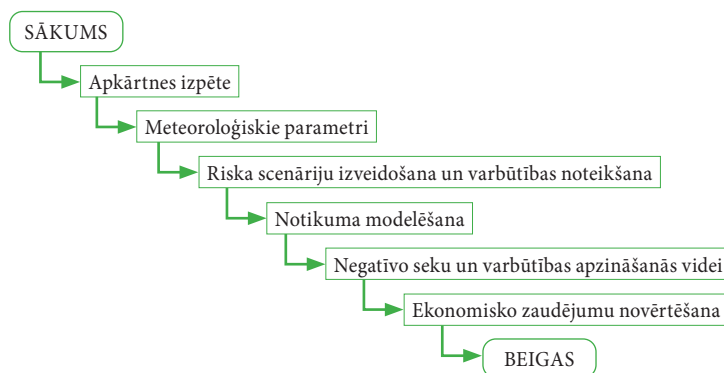
$$R_{ui} = \frac{102}{1893223 \times 1} = 5,3 \times 10^{-4}, \text{ vienības/gads.}$$

2. AVĀRIJU APMĒRU NOVĒRTĒŠANAS METODES

Otrajā daļā ir aprakstītas pasaulē esošās ugunsbīstamības un sprādzienbīstamības saistīto zaudējumu novērtēšanas metodes un riska novērtēšanas metodes, kas palīdz veidot izpratni par avārijas seku novērtējuma procesu, tehnogēnās vides riskiem un riska novērtēšanas modeļiem.

2.1. Vides zaudējumu un gaisa piesārņojuma izraisīto zaudējumu novērtēšanas metodes

Tehnogēnā riska analīzes metodes ir specifisks instruments, kas var palīdzēt pieņemt pamatotus vadības lēmumus, nodrošinot ražošanas procesa drošību, ugunsdrošību un ekoloģisko drošību RRO. Vispārējās metodes vienkāršota blokshēma redzama 2.1. attēlā, 11. pielikumā sniegta detalizēta metodes struktūra.



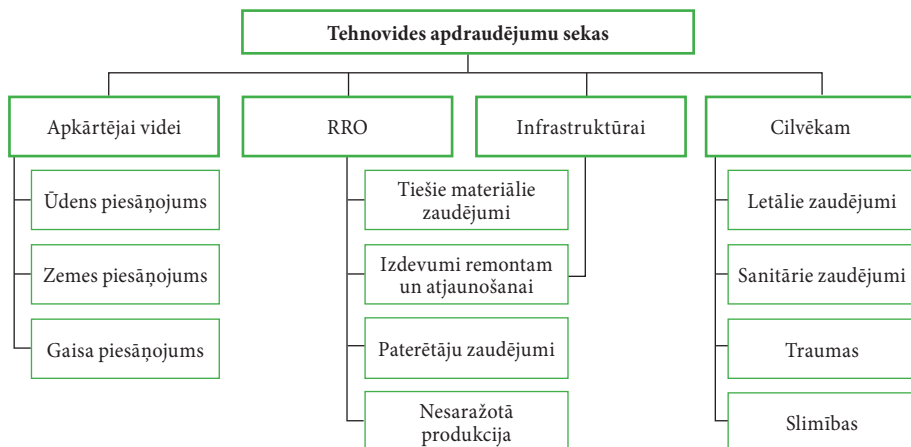
2.1. att. Piedāvātās metodes vienkāršota blokshēma (avots: autoru veidots).

Tehnogēno avāriju riska novērtējumam ir izvēlēta vienota metode, izmantojot Gausa funkciju ar augšējo integrēšanas robežu *probit* jeb varbūtību. Tā palīdz noteikt varbūtību, prognozēt riska līmeņus un pieņemt pamatotākus lēmumus. Tehnovides apdraudējumu iespējamās sekas apkopotas 2.2. attēla tabulā.

Mūsdienās aktuālākais izaicinājums ir antropogēns atmosfēras, ūdens un augšnes piesārņojums, kā arī iespējamo ekonomisko seku apzināšana infrastruktūrai un cilvēkam. Dzīvo organismu eksistences, dažādu dabas procesu un cilvēku saimnieciskās darbības rezultātā izdalās dažāda veida gāzes, kuru sastāvā ir šķīdrias vai cietas vielas, kas nokļūst atmosfērā. Gaisa piesārņojums lielajās pilsētās ir nopietna problēma, un tā mazināšanai ir izstrādātas tādas zinātniskās metodes kā kompleksā novērtēšana, ekonomiskā rentabilitāte, izmaksu un ieguvumu novērtēšana, kā arī mērķu un kritēriju analīze, ko izmanto visā pasaulē.²⁵ Saskaņā ar Eiropas Vides aģentūras

25 Pisoni, E., Carnevale, C., Volta, M. (2009). *Multi-criteria analysis for PM10 planning*. Atmospheric Environment. Vol. 43, pp. 4833–4842.

publicētajiem datiem Eiropā pēdējās desmitgadēs dažādu gaisu piesārņojošo vielu emisijas ir ievērojami samazinājušās, un gaisa kvalitāte šajā reģionā ir uzlabojusies. Tomēr gaisu piesārņojošo vielu koncentrācija joprojām ir pārāk augsta, un ar gaisa kvalitāti saistīts apdraudējums joprojām pastāv.²⁶ ES ilgtermiņa mērķis ir sasniegt tādu gaisa kvalitātes līmeni, kas nerada nepieņemamu ietekmi un risku cilvēku veselībai un videi.



2.2. att. Tehnovides apdraudējumu iespējamās sekas (avots: autoru veidots).

Lai samazinātu gaisa piesārņojuma nelabvēlīgo ietekmi, ES veic dažādu līmeņu pasākumus, pieņemot tiesību aktus, sadarbojoties ar to nozaru pārstāvjiem, kas rada vislielāko gaisa piesārņojumu, kā arī ar starptautiskām, valsts un reģionālā līmeņa iestādēm, nevalstiskām organizācijām un pētniecības institūcijām. ES politikas mērķis ir mazināt gaisa piesārņojuma ietekmi, samazinot emisijas un nosakot ierobežojumus un robežvērtības gaisa kvalitātes jomā. Eiropas Komisija 2013. gadā pieņēma Tīra gaisa kvalitātes paketi (angļu val. – *Clean Air Quality Package*) un jaunus pasākumus gaisa piesārņojuma samazināšanai. Latvijai kā ES dalībvalstij ir jāņem vērā uzdevumi, kas noteikti ES programmā “Tīrs gaiss Eiropai” un ES astotā vides rīcības programmā līdz 2030. gadam. Šajā programmā ir noteiktas trīs prioritārās jomas, kurās ir jāīsteno pasākumi, lai aizsargātu dabu un stiprinātu ekoloģisko izturētspēju, lai veicinātu resursu izmantošanas ziņā efektīvu izaugsmi ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni, samazinātu draudus iedzīvotāju veselībai un labklājībai saistībā ar piesārņojumu, ķīmiskām vielām un klimata pārmaiņu ietekmi.²⁷

Daudzi pētījumu rezultāti liecina, ka ar gaisa piesārņojumu saistītās globālās

26 Eiropas Vides aģentūra [tiešsaiste]. Eiropas Vides aģentūra mājaslapa [skatīts 2018. gada 7. martā]. Pieejams: <https://www.eea.europa.eu/lv/themes/air/intro>.

27 Astotā VRP – vispārējā Savienības vides rīcības programma līdz 2030. gadam [tiešsaiste]. An official website of the European Union [skatīts 2022. gada 15. maijā]. Pieejams: https://environment.ec.europa.eu/strategy/environment-action-programme-2030_en?prefLang=lv.

ekonomiskās izmaksas pakāpeniski palielināsies un ka 2060. gadā tās varētu sasniegt 1 % no pasaules IKP, vislielākos IKP zaudējumus piedzīvojot Ķīnā, Kaspijas jūras reģiona valstīs un Austrumeiropas valstīs.²⁸ Šīs ekonomiskās sekas ir tieši saistītas ar gaisā esošo bīstamo vielu augsto koncentrāciju, kā arī ar sabiedrības novecošanos un augstiem izdevumiem veselības jomā. Tiešās izmaksas palielinās vienmērīgi un proporcionāli ekonomiskajai aktivitātei, taču būtiski palielinās netiešās izmaksas. Latvija atrodas Austrumeiropas reģionā, tāpēc šīs problēmas izpētes aktualitāte ir pašsaprotama.

Pirmie starptautiskie dokumenti atmosfēras piesārņojuma un tā negatīvās ietekmes mazināšanas jomā, kuros minēta atmosfēras aizsardzība pret tehnogēnās vides iedarbību, bija 1985. gada 22. martā parakstītā starptautiskā Vīnes Konvencija par ozona slāņa aizsardzību, ko Latvija ratificēja 1995. gada 28. aprīlī, kā arī Monreālas 1987. gada protokols par ozona slāni noārdošām vielām.

Gaisa piesārņojumam jau vairākus gadu desmitus tiek pievērsta pastiprināta uzmanība vietējā, reģionālā un globālā mērogā.²⁹ Tiek uzskatīts, ka gaisa piesārņojums izraisa fizioloģiskus traucējumus, piemēram, nervu sistēmas, smadzeņu darbības un kognitīvo funkciju traucējumus, kā arī ietekmē mirstības gadījumu skaita pieaugumu, cilvēku saslimšanu ar elpceļu, sirds un asinsvadu slimībām. Gaisa piesārņojums var radīt arī psiholoģisku ietekmi uz indivīdiem vai grupām, piemēram, samazinot subjektīvo labsajūtu, izraisot trauksmi un depresiju un palielinot pašnāvību risku.³⁰

Viens no tipiskiem atmosfēras piesārņotājiem ir dūmi, kas izdalās vielu un materiālu degšanas procesā. Dūmi ir pastāvīga dispersijas sistēma, kas sastāv no sīkām cietajām daļiņām, kas atrodas gāzēs suspendētā stāvoklī. Dūmi, kas satur no 10^{-7} līdz 10^{-5} lielas cietās daļiņas, ir viens no bīstamiem ugunsgrēka faktoriem.³¹ Dūmi, kas atrodas atmosfēras zemajos slāņos, piesārņo piezemes apkārtējo vidi, bet nelabvēlīgos laikapstākļos var veidoties smogs un migla.

Gaisa piesārņojums ir visu lielo pilsētu centrā, jo īpaši – lielpilsētās, kur viens no galvenajiem gaisa piesārņotājiem ir transportlīdzekļu un rūpniecīdu radītās emisijas. Gaisa piesārņojuma sastāvs, koncentrācija un iedarbības ilgums var dažādi ietekmēt cilvēku veselību,³² gaisa piesārņotāji var izraisīt dažādas veselības problēmas, piemēram, hematotoksisku, genotoksisku un kancerogēnu iedarbību, kā arī hroniskas

28 Lanzi, E., Dellink, R., Chateau, J. (2018). The sectoral and regional economic consequences of outdoor air pollution to 2060, *Energy Economics*. Vol. 71, pp. 89–113.

29 Geng, L., Wu, Z., Zhang, S., Zhou, K. (2019). The end effect in air pollution: The role of perceived difference. *Journal of Environmental Management* Vol. 232, pp. 413–420.

30 Bakian, A. V., Huber, R. S., Coon, H., Gray, D., Wilson, P., McMahon, W. M., Renshaw, P. F. (2015). Acute air pollution exposure and risk of suicide completion. *Am. J. Epidemiol.* Vol. 181 (5), pp. 295–303. <https://doi.org/10.1093/aje/kwu341>.

31 Šmidre, P., Jemeljanovs, A., Ieviņš, J. (2008). *Vides aizsardzība no tehnogēno avāriju un katastrofu ģenerētajiem piesārņojumiem*. Rīga: RTU Izdevniecība. 30. lpp.

32 Siquieroli, D., Boas, V., Matsuda, M., Toffoletto, O., Garcia, M. L. B., Saldiva, P. H. N., Marquezini, M. V. (2018). Workers of São Paulo city, Brazil, exposed to air pollution: Assessment of genotoxicity. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* Vol. 834, pp. 18–24.

elpceļu saslimšanas, sirds un asinsvadu slimības, nervu sistēmas darbības traucējumus, ādas un acu kairinājumu, alerģiskas reakcijas. Veselības problēmas var rasties ļoti drīz pēc saskares ar piesārņotāju vai arī vairākus mēnešus, vai gadus pēc pirmās piesārņojuma iedarbības. Piemēram, Ķīnā, kas ir viena no lielākajām ekonomiskajām sistēmām pasaulē, gaisa piesārņojums 2010. gadā pārsniedza pieļaujamo PM 2,5 (cietas daļiņas, kuru diametrs ir 2,5 mikrometri vai mazāks) un ietekmēja līdz pat 1,2 miljoniem cilvēku; 600 000 nāves gadījumu saistīti ar gaisa piesārņojuma izraisītām cerebrovaskulārajām slimībām, bet vairāk nekā 200 000 nāves gadījumu – ar hronisku plaušu obstrukciju. Tāpēc 2015. gadā PM 2,5 iedarbības rezultātā labklājības līmenis Ķīnā kritās par 248 miljardiem USD.³³ Pētījumā par slimību slogu pasaulē (*Global Burden of Disease*) konstatēts, ka 2013. gadā gaisa piesārņojums bija iemesls 5,5 miljoniem priekšlaicīgu nāves gadījumu visā pasaulē.³⁴

Papildus veselības apdraudējumam gāzu daļiņu ieelpošanas rezultātā gaisa piesārņojums pilsētās izraisa arī citas problēmas, piemēram, pastiprinātu koroziju, materiālu fiziskā stāvokļa pasliktināšanos, vēstures pieminekļu un ēku bojājumus, kā arī kaitējumu dabai pilsētā.³⁵

Atmosfērai radītos zaudējumus var izteikt kvantitatīvi ar skaitliskiem rādītājiem. Pasaulē ar toksisku vielu izdalīšanos saistīto zaudējumu aprēķināšanai tiek izmantotas dažādas metodes, bet to galvenie principi ir ļoti līdzīgi. Ieguldījumiem apkārtējās vides aizsardzībā nevajadzētu pārsniegt novērsto zaudējumu apmēru. Riska pārvaldības kontekstā vispirms tiek noteikts pieņemamais riska līmenis, cenšoties ieviest pēc iespējas labākas riska samazināšanas stratēģijas, vienmēr ņemot vērā stratēģijas iespējamo ietekmi uz sociālo un ekonomisko darbību. Tāpēc gaisa piesārņojuma ietekmes novērtējums ir būtisks, lai pareizi noteiktu iespējamo saistību starp gaisa piesārņojumu un veselības apdraudējumu.³⁶ Ar piesārņojumu saistītās izmaksas ir neizbēgamas, taču bieži vien tās tiek ignorētas, un netiek aprēķināta vides piesārņojuma ietekme. Jebkura vides degradācija neatkarīgi no tā, vai tas ir gaisa, vai ūdens piesārņojums, poligonu piesārņojums ar toksiskiem atkritumiem, vai bērnu pakļaušana bīstamu ķīmisko vielu ietekmei, rada izmaksas. Izmaksu veidu piemēri:

- a) tiešie medicīniskie izdevumi personām, kas saslimušas toksisku vielu ietekmes rezultātā;

33 Zeng, B., Wub, T., Guo, X. (2019). Interprovincial trade, economic development and the impact on air quality in China. *Resources, Conservation & Recycling* Vol. 142, pp. 204–214.

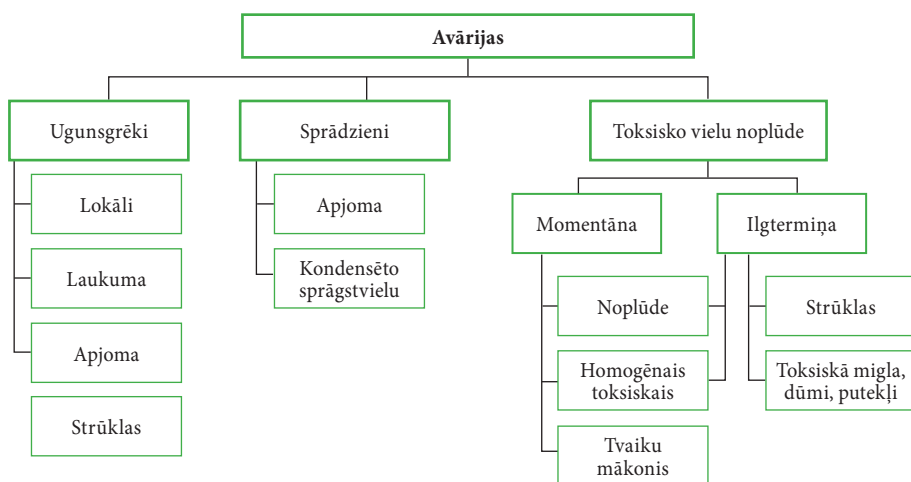
34 Forouzanfar M. H., et al., (2015). Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* Vol. 386 (10010), pp. 2287–2323.

35 Vlachokostas, Ch., Achillas, Ch., Moussiopoulos, N., Banias, G. (2011). Multicriteria methodological approach to manage urban air pollution. *Atmospheric Environment* Vol. 45, pp. 4160–4169.

36 Cocheo, C., Sacco, P., Zaratin, L. (2011). Assessment of Human Exposure to Air Pollution Assessment of Human Exposure to Air Pollution. *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 230–237.

- b) ar veselību saistītas netiešās izmaksas, piemēram, zaudētais laiks, kas netika veltīts mācībām vai darbam, rehabilitācijas izmaksas un speciālās izglītības izmaksas;
- c) samazināta ekonomiskā produktivitāte personām, kuru smadzenes, plaušas vai citi orgāni ir pastāvīgi bojāti toksisku vielu ietekmes rezultātā;
- d) dabas bagātību zudums;
- e) vides attīrīšanas izmaksas.³⁷

Avāriju veidi, kas saistīti ar bīstamo vielu izmešiem atmosfērā, redzami 2.3. attēlā.



2.3. att. Shēma, kas ilustrē iespējamās avārijas attīstību, bīstamām vielām nokļūstot atmosfērā.³⁸

ASV 1980. gadu sākumā ekspertu komiteja Medicīnas institūta Stenfordas Universitātes Nobela prēmijas laureāta ekonomikā profesora K. Eroua (*K. Arrow*)³⁹ vadībā izstrādāja vides piesārņojuma izraisīto saslimšanu izmaksu novērtēšanas metodi, tās pamatā ir aprēķins par daļēju ieguldījumu noteiktā iedzīvotāju grupā. Vides piesārņojuma veida daļa definēta kā konkrētas slimības, kas tiktu novērstas, ja vides riska faktori tiktu samazināti līdz iespējami zemākajam līmenim, kategorijas procentuālā daļa. Šīs slimības izmaksas aprēķina konkrētā iedzīvotāju grupā, izmantojot 2.1. vienādojumu.⁴⁰

37 Landrigan, P. J. (2012). The hidden costs of environmental contamination. *European Respiratory Journal*. Vol. 40, pp. 286–288.

38 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 25. lpp.

39 Arrow, J. (1981). *Costs of Environment-Related Health Effects: A Plan for Continuing Study*. Washington, National Academy Press, Institute of Medicine, p. 18.

40 Landrigan, P. J. (2012). The hidden costs of environmental contamination. *European Respiratory Journal* Vol. 40 pp. 286–288.

$$\text{Izmaksas} = \boxed{\text{slimības biežums}} \times \boxed{\text{vides piesārņojuma veida daļa}} \times \boxed{\text{iedzīvotāju skaits}} \times \boxed{\text{katra atsevišķa gadījuma izmaksas}} \quad (2.1.)$$

Izmaksas parasti tiek iedalītas tiešajās un netiešajās ar veselību saistītajās izmaksās, un abi šie veidi ir iekļauti aprēķinos. Šī metode tiek izmantota, lai novērtētu ar vidi un arodslimībām saistītas izmaksas, un tās rezultāti ir ietekmējuši sabiedrības veselību un labklājību visā pasaulē. Tā ir spēcīga jaunā metode vides piesārņojuma ietekmes novērtēšanas jomā – pilnīga izmaksu uzskaitē jeb zaļā grāmatvedība. Pilnīga izmaksu uzskaitē ir grāmatvedības termins, kas attiecas uz uzņēmējdarbības, valsts vai pašvaldības darbības izmaksu apguvi un kvantitatīvu novērtēšanu. Pilnīga izmaksu uzskaitē atšķiras no tradicionālās uzskaites, kas rūpīgi fiksē materiālu, darbaspēka un enerģijas izmaksas, bet neņem vērā ārējos faktorus, kas neietilpst standarta tirgus mehānismos, piemēram, vides degradāciju un slimības. Pilnīgas izmaksu uzskaites mērķis ir noteikt ārējos faktorus, no kuriem daudzi var būtiski ietekmēt sabiedrības veselību, labklājību un monetāras vērtības.

Turpmāk tiks apskatītas galvenās modelēšanas metodes atmosfēras piesārņojuma paredzēšanai. Tās palīdz noteikt, kāda koncentrācija uzskatāma par bīstamu un var ietekmēt iedzīvotājus un viņu veselības stāvokli. Meteoroloģiskie parametri var ātri izmainīties laikā un telpā, tāpēc nav vienota modeļa visu iespējamo piesārņojumu gadījumu raksturošanai.

Bīstamo vielu izplatības modelēšana atmosfērā no avota līdz konkrētai vietai ir ļoti svarīga un sarežģīta, pasaulē ir daudzas modelēšanas metodes bīstamo vielu koncentrācijas noteikšanai gaisā. R. Epiratukula (*R. Apiratukul*) aprakstītais matemātiskais modelis ir ļoti nozīmīgs instruments ietekmes uz vidi novērtēšanai, jo īpaši gaisa piesārņojuma jomā, un to var izmantot vēl pirms projekta sākšanas, lai paredzētu iespējamo ietekmi.⁴¹ Tādējādi pasaulē patlaban nav vienota modeļa, lai noteiktu visus faktorus, kas ietekmē bīstamo vielu izplatību atmosfērā. Veicot novērtējumu, parasti tiek ņemti vērā tādi faktori kā vēja ātrums, virziens, atmosfēras spiediens un citi meteoroloģiskie parametri, kas palīdz noteikt piesārņojuma vielu negatīvo ietekmi noteiktā punktā x , ar koordinātēm (x, y, z) .

RRO, kur glabājas sašķidrinātas un sprādzienbīstamas gāzes, var nopietni apdraudēt cilvēku veselību un dzīvību, kā arī apkārtējo vidi, jo intensīvas iztvaikošanas rezultātā veidojas lieli toksiskie un sprādzienbīstamie mākoņi.⁴² Dūmu sastāvu, kas veidojas bīstamo vielu degšanas rezultātā, ietekmē dažādi faktori, piemēram, degšanas laukums, ugunsgrēka veids, meteoroloģiskie apstākļi, apkārtne, degošā viela vai materiāls un citi faktori. Biežākais cilvēku bojāejas iemesls ir toksisko gāzu ietekme.⁴³

41 Apiratikula, R. (2015). Approximation Formula For The Prediction Of Downwind Distance That Found The Maximum Ground Level Concentration Of Air Pollution Based On The Gaussian Model. *Social and Behavioral Sciences* Vol. 197, pp. 1257–1262.

42 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums Rīga: RTU Izdevniecība. 26. lpp.

43 Šmidre, P., Jemeljanovs, A., Ieviņš, J. (2008). *Vides aizsardzība no tehnogēno avāriju un katastrofu ģenerētajiem piesārņojumiem*. Rīga: RTU Izdevniecība, 32. lpp.

Šīs monogrāfijas sadaļas aktualitāte ir acīmredzama, jo gaisa piesārņojuma modelēšana palīdz noteikt un izmantot ugunsgrēka dzēšanas metodiku, aizsargāt iedzīvotājus un VUGD darbiniekus no koncentrētu bīstamo vielu ietekmes, kā arī samazināt nelabvēlīgo ietekmi uz dabu un noteikt iespējamo seku apmēru.

Lai iegūtu ticamus datus par atmosfēras piesārņojumu ar bīstamām vielām, kas noplūdes gadījumā izdalās, degot vai iztvaikojot toksiskiem šķidrumiem, būtu jāveic ļoti daudz eksperimentu, izmantojot gāzes aerosolu paraugus, kas ir dārgi. Laikus plānojot nepieciešamos riska samazināšanas pasākumus, lai noteiktu vielu bīstamo koncentrāciju, izplatības rādītājus un lai samazinātu iespējamo kaitējumu iedzīvotājiem un dabai, ekoloģiskā apdraudējuma bīstamību var aprēķināt arī matemātiski. Piesārņojošo vielu koncentrācijas apmēru konkrētā attālumā no notikuma vietas vēja virzienā var noteikt, izmantojot dažādas metodes. Izmantojot matemātiskās modelēšanas metodes, tiek ņemti vērā šādi galvenie faktori:

- piesārņojuma avots un tā raksturojums;
- pārneses process – ķīmisko reakciju mijiedarbība un pārveide atmosfēras procesa ietekmes rezultātā; reljefa ietekme un meteoroloģiskie apstākļi;
- ietekme uz apkārtējo vidi un cilvēkiem (toksiskās kategorijas robežvērtība).

Gausa gaisa piesārņojuma modelis ir viens no populārākajiem matemātiskajiem modeļiem, ar kura palīdzību var prognozēt piesārņojošo vielu koncentrāciju un pārnesi ar vēju, kas var ietekmēt gaisa kvalitāti. Atbilstoši Gausa dispersijas modelim piesārņojuma izplatība tiek raksturota ne tikai horizontāli, bet arī vertikāli, pamatojoties uz eksperimentāliem datiem. Tieši šajā modelī tika ieviests Paskvila–Giforda horizontālā un vertikālā sadalījuma jēdziens, kas parametrizēts kā atmosfēras stabilitātes funkcija.⁴⁴ Gausa modelis paredz, ka stabilas temperatūras apstākļos pastāvīgā vēja virzienā un ātrumā neitrāli peldoši piemaisījumi horizontālā un vertikālā virzienā izkļiedžas neatkarīgi cits no cita, kur attiecībā uz fiziskajiem faktoriem, kas ietekmē pārnesi, tiek izmantoti labojuma koeficienti.

Galvenais dispersijas modeļu uzdevums ir paredzēt emitēto gaisu piesārņojošo vielu koncentrāciju (arī toksisko piesārņojumu), kas rodas turbulentās difūzijas rezultātā. Paskvila–Giforda modeli var izmantot ļoti precīzai piesārņojuma koncentrācijas noteikšanai 10 km attālumā no piesārņojuma vietas. Šo modeli izmanto arī Starptautiskā Atomenerģētikas organizācija, un to iesaka izmantot arī Pasaules Meteoroloģijas organizācija. Dažādas šī modeļa modifikācijas ir aprakstītas normatīvajos aktos, piemēram, Starptautiskās Atomenerģijas aģentūras (SAEA) (angļu val. – *International Atomic Energy Agency; IAEA*) drošības vadības dokumentā

44 Šteinberga, I. (2007). *Kvazistatisku atmosfēras piesārņojuma līmeņu kompleksā analīze un modelēšana*. Promocijas darbs. Rīga: Latvijas Universitāte. Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte. 23. lpp.

Nr. 50-SG-S3, kā arī programmatūrā “GENII”,⁴⁵ “SILAM”,⁴⁶ “COSIMA”,⁴⁷ “AIDA”,⁴⁸ “BSAVVL version 2.3h”.

Lai iegūtu rezultātu, Paskvila–Giforda modeļa vienādojumā (2.2. vienādojums)⁴⁹ jānorāda teritorijā esošo izmešu avotu novietojums, augstums, diametrs, izmešu ātrums un apmērs, jānosaka, vai izmešu avots atrodas pilsētā vai ārpus tās, kā arī jānorāda atmosfēras stabilitātes kategorija, lai izmantotu atbilstošas dispersijas parametru noteikšanas formulas.

$$C(x, y, z) = \frac{f(a) \times Q}{2\pi \partial_y \partial_z U} \times \exp\left(-\frac{y^2}{2\partial_y^2}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\partial_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\partial_z^2}\right) \right), \quad (2.2.)$$

kur $C(x, y, z)$ – bīstamas vielas koncentrācija piesārņojuma vietā;

Q – avota izmešanas jauda, kg/s;

U – vēja ātrums, m/s;

∂_y, ∂_z – dispersijas parametri, kas atkarīgi no atmosfēras stabilitātes klases, no vēja virziena un plūsmas x , m;

H – augstums, m;

x, y, z – ass, platums, augstums, punkta Dekarta koordinātes;

$f(a) = 1$, ja ($H < 100-200$ m).

Tiek izmantoti Gausa modeļi ar dažādām ∂_y, ∂_z dispersijas izplatības funkcijām, piemēram, Paskvila–Brigsa modelis, Paskvila–Giforda modelis un citi modeļi. Paskvila–Brigsa modeļi dispersijas parametru izplatības funkcijas ir atkarīgas no atmosfēras stabilitātes klases, kur katrai stabilitātes klasei atbilst noteikts vēja ātrums, insolācijas pakāpe dienā un mākoņu daudzums naktī. 2.2. vienādojumā parametri ∂_y, ∂_z palielinās atkarībā no attāluma uz x ass. Šo parametru palielinājums atkarīgs no turbulences intensitātes un atmosfēras stabilitātes.

45 Napier, B. A., Peloquin, R. A., Strenge, D. L., Ramsdell, J. V. (1988). *GENII-The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System*. Volume 1: Conceptual Representation. Pacific Northwest Laboratory. Washington, pp. 3.

46 Sofiev, M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M., Kukkonen, J. (2006). A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data. *Atmospheric Environment* Vol. 40, pp. 674–685.

47 Naumann, K-H. (2003). COSIMA—a computer program simulating the dynamics of fractal aerosols. *Journal of Aerosol Science*. Vol. 34, Issue 10, pp. 1371–1397.

48 Serbo, V. V. (2003). Status of AIDA and JAS 3. *Nucl.Instrum.Meth.* Vol. A502 pp. 663–665.

49 Stern, E. (2017). *Risk Assessment of Severe Accidents Involving Atmospheric Dispersion of Anhydrous and Hydrated Ammonia mixtures*. [tiešsaiste]. Presented at Ammonia World New and Old – 2017 conference Technion, Haifa, Israel 15.11.17 Pieejams: https://www.youtube.com/watch?v=p_ldUMMZVPo.

Brigsa ieteiktās formulas⁵⁰ ∂_y , ∂_z dispersijas parametru attāluma no 100 m līdz 10 km noteikšanai apkopotas 2.1. tabulā. Šie parametri noteikti, veicot teorētisko izpēti un reālus eksperimentus atkarībā no zemes reljefa. 2.1. tabulā apkopotas dažādas dispersijas parametru ∂_y , ∂_z aprēķina formulas.

2.1. tabula

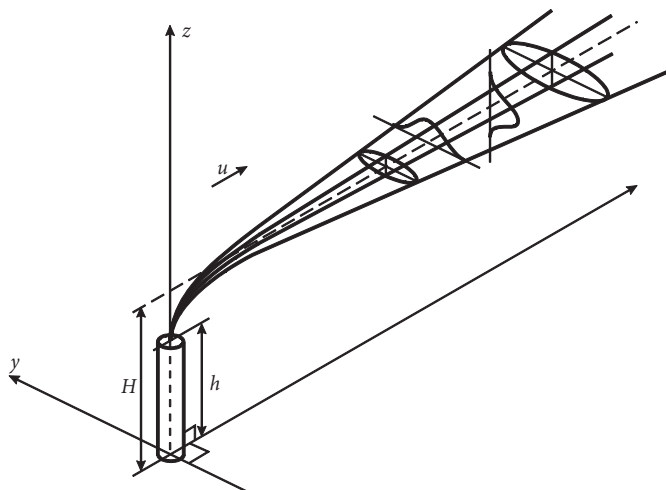
∂_y , ∂_z dispersijas parametru izplatības funkciju aprēķina formulu pieraksts⁵¹

Paskvila–Giforda stabilitātes klase	Atmosfēras stabilitāte	∂_y (m)	∂_z (m)
Atklāts laukums (lauku teritorija)			
A	Ļoti nestabila	$0,22x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,2x$
B	Nestabila	$0,16x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,12x$
C	Nedaudz nestabila	$0,11x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,08x(1 + 0,0002x)^{-0,5}$
D	Neitrāla	$0,08x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,06x(1 + 0,0015x)^{-0,5}$
E	Nedaudz stabila	$0,06x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,03x(1 + 0,0003x)^{-0,5}$
F	Ļoti stabila	$0,04x(1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,016x(1 + 0,0003x)^{-0,5}$
Pilsētas teritorija			
A–B	Nestabila	$0,32x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,24x(1 + 0,001x)$
C	Nedaudz nestabila	$0,22x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,2x$
D	Neitrāla	$0,16x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,14x(1 + 0,0003x)^{-0,5}$
E–F	Ļoti stabila	$0,11x(1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x(1 + 0,0015x)^{-0,5}$

Nestacionāro Gausa modeli var izmantot tad, ja norādītais mērogs ir pietiekams gaisa piesārņojuma novērtēšanai apdzīvotā teritorijā. Gausa modelis ir iekļauts lielākajā daļā valstu standartu, kas palīdz noteikt koncentrāciju un attālumu no avota. Gausa strūkļas shēma redzama 2.4. attēlā.

50 Briggs, G. A. (1974). Diffusion Estimation for Small Emissions, Report ATDL-106 (Washington, DC: Air Resources, Atmospheric Turbulence, and Diffusion Laboratory, Environmental Research Laboratories.

51 *Guidelines for Chemical process Quantative Risk Analysis*. (2000). American institute of chemical engineers. New-York: A John Wiley & sons, inc., publication p. 122.



2.4. att. Gausa strūklas shēma.⁵²

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \partial_y \partial_z U} \times -\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\partial_y^2} + \frac{z^2}{\partial_z^2} \right), \quad (2.3.)$$

kur $C(x, y, z)$ – bīstamās vielas koncentrācija piesārņojuma vietā;

Q – avota izmešanas jauda, kg/s;

U – vēja ātrums, m/s;

∂_y, ∂_z – dispersijas parametri, kas atkarīgi no atmosfēras stabilitātes klases, no vēja virziena un plūsmas x , m;

x, y, z – ass, platums, augstums, punkta Dekarta koordinātes.

Vidējas koncentrācijas avotam virs zemes līmeņa (piemēram, kūdras ugunsgrēka gadījumā) var izmantot 2.3. vienādojumu, kur augstums ir zemes līmenī ($H=0$).

Parasti ir jānoskaidro tikai koncentrācija zemes līmenī, zemāk par šleifa līmeni tikai uz x ass, un tad var izmantot 2.4. vienādojumu.

$$C(x, 0, 0) = \frac{f(a) \times Q}{2\pi U \partial_y(x) \partial_z(x)}, \quad (2.4.)$$

kur $C(x, y, z)$ – bīstamas vielas koncentrācija piesārņojuma vietā;

Q – avota izmešanas jauda, kg/s;

U – vēja ātrums, m/s;

∂_y, ∂_z – dispersijas parametri, kas atkarīgi no atmosfēras stabilitātes klases, no vēja virziena un plūsmas x , m;

H – augstums, m;

x, y, z – ass, platums, augstums, punkta Dekarta koordinātes;

$f(a) = 1$ (ja $H < 100-200$ m).

52 Zaripov, Sh. H., Mardanov, R. F., Sharafutdinov, V. F., Gilfanov, A. K., Nikonenkova, T. V. (2018). Matematicheskie modeli perenosa zagriznenij v okruzhajushhej srede, Kazan: Kazanskij universitet. p. 34.

Koncentrāciju gaisa plūsmā var ietekmēt lietus vai sniegs, jo šādos apstākļos tvaiki vai gāzveida vielas iekļūst ūdens pilienos vai sniegpārslās un nonāk uz zemes nokrišņu veidā.

Gaisa piesārņojuma radīto zaudējumu noteikšanai Štutgartes Universitātes zinātnieki izveidojuši modeli “EcoSense” piesārņojuma ietekmes uz cilvēka organismu novērtēšanai. Ar šī modeļa palīdzību ir iespējams modelēt PM , NO_2 , SO_2 , NH_3 izplatību atmosfērā. Lai novērtētu ietekmi uz indivīdu veselību, tiek izmantota Eiropas līmeņa datubāze. Modelēšanā tiek izmantoti standarta meteoroloģiskie modeļi.

Salīdzinot datus par pētāmajā teritorijā esošajiem receptoriem un piesārņojuma sadalījumu, “EcoSense” var aprēķināt ekspozīcijas līmeni un sekas piesārņojuma skartajām personām. “EcoSense” nosaka kopējos zaudējumus naudas izteiksmē, piešķirot katrai iespējamai ietekmei atbilstošu vērtību naudas izteiksmē.⁵³ “EcoSense” ir ļoti viegli izmantot, un pirmajiem 100 modelējumiem to var izmantot bez maksas. Datus var ātri ievadīt, un rezultātus ir ļoti viegli interpretēt. Zaudējumu aprēķināšanai izvēlēti divi rādītāji – zaudējumi 2010. un 2020. gadā, kas atspoguļo piesārņojuma izraisīto zaudējumu apmēru naudas izteiksmē šodien un nākotnē.

Gaisa piesārņojuma un sprādzienbīstamās zonas novērtēšanai bieži tiek izmantota ALOHA (angļu val. – *Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) simulācijas programma, tās pamatā ir iepriekš tekstā apskatītais Gausa dispersijas modelis. Simulācijas modeli kopīgi izstrādājušas vairākas organizācijas, ieskaitot ASV Vides aizsardzības aģentūru, Ķīmisko avāriju sagatavotības un novēršanas biroju un ASV Nacionālās Okeānu un atmosfēras administrācijas reaģēšanas un atjaunošanas biroju.⁵⁴ ALOHA ir bezmaksas programma, kas pieejama ikvienam interesentam. Ar šī modeļa palīdzību var imitēt vairāk nekā 900 ķīmisko vielu dispersiju, un to parasti izmanto bīstamu vielu nejaušas noplūdes simulācijai⁵⁵ vai ķīmisko tvaiku izkļiedes gadījumā. Ievadot sākotnējos noplūdes datus, piemēram, laikapstākļus, vielas daudzumu, atrašanās vietu un citus parametrus, ar ALOHA simulācijas modeļa palīdzību iespējams identificēt toksiskās zonas platību, koncentrāciju, siltumstarojuma intensitāti un pārspiediena iespējamās sekas, ko var izmantot zaudējumu aprēķināšanai. Prognozējot zaudējumus cilvēkiem un infrastruktūrai, varbūtību un seku apmēru nav iespējams novērtēt, ja nav zināms bīstamo vielu koncentrācijas laukums un siltumstarojuma un pārspiediena iedarbības attālums, tāpēc var lietot, piemēram, ALOHA programmu, kas tiek izmantota negadījumu apmēra modelēšanai un iedarbības nelabvēlīgo seku novērtēšanai.

RRO darbība ir saistīta ar tehnogēniem apdraudējumiem, to negatīvo seku iestā-

53 Brizio, E., Genon, G. (2005). The influence of different mixing heights on the “ECO-SENSE” model results at a local scale. *Environmental Modelling & Software* Vol. 20, pp. 917–933.

54 Tseng, J. M., Su, T. S., Kuo, C. Y. (2012). International Symposium on Safety Science and Technology Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering* Vol. 45, pp. 384–389.

55 I, Y. P., Shu, C. M., Chong, C. H. (2009). Applications of 3D QRA technique to the fire/explosion simulation and hazard mitigation within a naphtha-cracking plant. *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 22, pp. 506–515.

šanos ir grūti paredzēt, jo to ietekmē varbūtības princips un nav zināms ietekmes apmērs uz iedzīvotājiem un dabu. ĀS vienmēr notiek īsākā laikā, savukārt bīstamo vielu koncentrācija ir lielāka, piemēram, avārijas rezultātā bojāto iekārtu toksisko šķidrumu vai gāzes iztvaikošanas vai degšanas gadījumā. Tāpēc ietekmes uz dabu un cilvēkiem novērtēšanai avārijas gadījumā RRO ir jāizmanto citas metodes, jo novērtējumu ietekmē varbūtības princips. Līdz ar to ir sarežģīti noteikt visus ietekmes faktorus, jo katra avārija un potenciālā piesārņojuma skartā persona ir atšķirīga. Veibula sadalījums ir piemērotākā metode retu ĀS gadījumu pētīšanai dabiskā un tehnogēnā vidē, jo tas labi apraksta varbūtības apmēru. Veibula sadalījumu izmanto detaļu un elementu drošības līmeņa novērtēšanai un tam, lai noteiktu posmu, kad iespējama vislielākā šo elementu atteice.

Bīstamas situācijas varbūtības novērtēšanai, izmantojot noteiktu integrālu, parasti tiek izmantota plaši pazīstamā Gausa funkcija (klūdu funkcija), ko var izteikt kā ietekmes (zaudējumu) risku (2.5. vienādojums).⁵⁶

$$R_{\text{iet}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2.5.)$$

kur R_{iet} – ietekmes (zaudējumu) risks.

Augšējā integrēšanas robeža ir sakarība starp skaitlisko kaitīgās ietekmes mērvienību, piemēram, bīstamās vielas saņemto devu, siltumenerģijas daudzumu, kas ietekmē cilvēku un objekta ietekmes varbūtību.⁵⁷ Izmantojot šo funkciju, tiek veidotas speciālas *probit* modeļa tabulas, ar kurām, izmantojot interpolācijas metodi, var noteikt nepieciešamo lielumu (2.3. tab.). Šī sasaiste atspoguļota, izmantojot *probit* modeli.

Viens no modernākajiem veidiem vērīenīgu seku uz cilvēkiem, materiāliem un dabas resursiem novērtēšanai ir *probit* vai *Erfik* modeļa izmantošana. Ar *probit* modeli, apkopojot datus par reģionu un potenciāli bīstamo objektu tehnoloģiskajām īpašībām, var noteikt iespējamo ietekmi uz cilvēkiem, precīzi nosakot, iespējamās sanitāros un letālos zaudējumus atkarībā no apdraudējuma sekām, kas ir atkarīgas no bāriskās kāpes (tvaiku un gāzes sprādzieni), termiskās radiācijas (piemēram, noplūdes ugunsgrēki, ugunslode, strūklas ugunsgrēks), mehāniskās iedarbības, sabrūkot konstrukcijām, sprādziena vai citu faktoru ietekmē un toksiskās iedarbības, ja bīstamās vielas nonāk cilvēka organismā. *Probit* modeļa nevienādojuma formulā (2.6. formula) a un b ir katras vielas konstantes, kas raksturo bīstamības pakāpi un ietekmi. Būtībā Pr ir Gausa klūdu funkcijas augšējā robežvērtība, tā dēvētā *Erfik* funkcija Q , kas tiek izmantota konkrētu zaudējumu varbūtības noteikšanai. Funkcijas $Q = \text{erf}(Pr)$ aprēķināšanai un *probit* robežvērtības, kas apgrūtina koeficientu piemērošanu, noteikšanai izmanto divas metodes – $Q = \text{erf}_f(Pr=0)$ un $Q = \text{erf}_f(Pr=5)$. Dažādām bīstamām vielām Pr funkcijas ir dažādas konstantes. *Probit* modeļa kopējā

56 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 56. lpp.

57 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 57. lpp.

izteiksme analītiskajā formā ir sniegta 2.6. vienādojumā.⁵⁸

$$Pr = a + b \ln D, \quad (2.6.)$$

kur a un b – konstantes;

D – skaitliskais lielums, ar ko apzīmē negatīvo ietekmi uz piesārņojuma skarto personu vai nelabvēlīgās ietekmes devu.

Zinātnieks N. Eisenbergs (N. Eisenberg) pirmais izstrādāja koeficientus un izveidoja vienādojumu kaitējuma varbūtības novērtēšanai, izmantojot *probit* modeli, ar ko tiek novērtēta attiecība starp devas ietekmi un cilvēka reakciju uz siltumstarojumu, toksisku vielu un pārspiedienu.⁵⁹ Dati tika iegūti, analizējot siltuma ietekmi kodolsprādziena gadījumā. Šīs metodes pamatā ir pieņēmums, ka vienāda līmeņa iedarbība dažādos gadījumos (absorbēto vielu daudzums, radiācijas deva, spiediena impulss utt.) var izraisīt dažāda smaguma sekas dažādiem cilvēkiem – iedarbības efekts ir cieši saistīts ar varbūtības principu. *Probit* modelis agrāk tika bieži izmantots, jo tas bija vienkāršs un pielāgojams.⁶⁰ Medicīniskajā statistikā *probit* modelis tiek plaši lietots, lai prognozētu toksisko vielu iedarbību, sprādziena viļņa sekas un termisko iedarbību.

Probit modeļa rādītājus toksiskās vielas iedarbības uz cilvēku novērtēšanai nosaka, izmantojot 2.7. vienādojumu.⁶¹

$$Pr = a + b \ln \left(C_{ppm}^n \tau \right), \quad (2.7.)$$

kur a , b un n – konstantas katrai ķīmiskai vielai;

τ – iedarbības ilgums, min;

C_{ppm}^n – vielas koncentrācija katrā piesārņojuma vietā, ppm;

n – pakāpes rādītājs, ko (tāpat kā a un b rādītāju) nosaka, veicot medicīniski bioloģiskus izmeklējumus.

2.2. tabulā apkopoti *probit* modeļa parametri dažādām ķīmiskām vielām, pieņemot, ka toksiskais efekts izteikts kā recipienta nāves iestāšanās. Citām toksiskām vielām *probit* konstantes sniegtas zinātniskajā un izziņas literatūrā. Lai pareizi noteiktu *probit* konstanti attiecībā uz iedzīvotājiem, jāņem vērā arī recipienta vecums, veselības stāvoklis un citi faktori.

58 Cozzani, V., Salzano, E. (2004). The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials* Vol. A107, pp. 67–80.

59 Eisenberg, N. A., Lynch, C. J., Breeding, R. J. (1975). Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills, Report CG-D-136-75, Enviro Control Inc., Rockville, MD.

60 Hosseinnia, B., Khakzad, N., Reniers, G. (2018) Multi-plant emergency response for tackling major accidents in chemical industrial areas. *Safety Science* Vol. 102, pp. 275–289.

61 Sato, T., Watanabe, Y., Toyota, K., Ishizaka, J. (2005). Extended probit mortality model for zooplankton against transient change of PCO2. *Marine Pollution Bulletin* Vol. 50, pp. 975–979.

2.2. tabula

Probit konstantes letālam toksisko vielu izraisītam iznākamam (pieaugušajiem)⁶²

Viela	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>n</i>
Akroleīns	-4,931	2,049	1
Amonjaks	-30,90	1,85	2
Benzols	-104,78	5,3	2
Hlors	-3,29	0,92	2
Formaldehīds	-7,24	1,3	2
Fosgēns	-14,27	3,686	1
Toluols	-1,794	0,408	2,5

Sakarību starp letāla iznākuma varbūtību, *P* %, *probit* un *Erfik* funkciju var noteikt, izmantojot Laplasa funkciju un 2.3. tabulā sniegtos datus. *Probit* modeli var izmantot, lai skaitliski izteiktu ietekmi uz recipienta veselību, ņemot vērā iedarbības devu, ilgumu, recipienta atrašanās vietu un toksiskās vielas koncentrāciju.

2.3. tabula

Sakarība starp *probit* robežvērtību un varbūtību, ko izsaka procentos⁶³

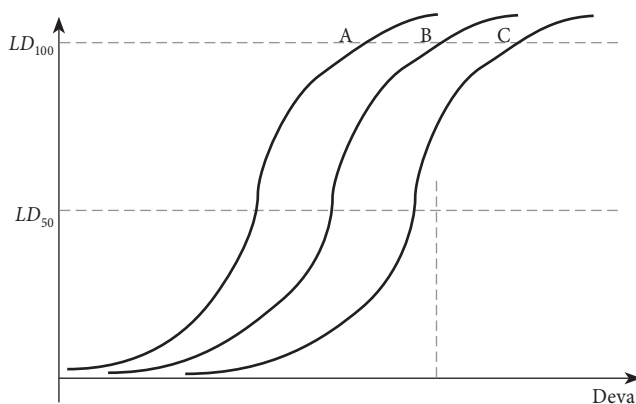
<i>P</i> %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,92	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,56	6,64	6,75	6,88	7,05	7,19
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Ja ir zināms toksiskas devas apmērs un ekspozīcijas ilgums, var noteikt varbūtību *P* % attiecībā uz iedarbības seku pakāpi toksiskā piesārņojuma recipientu kopskaitam.

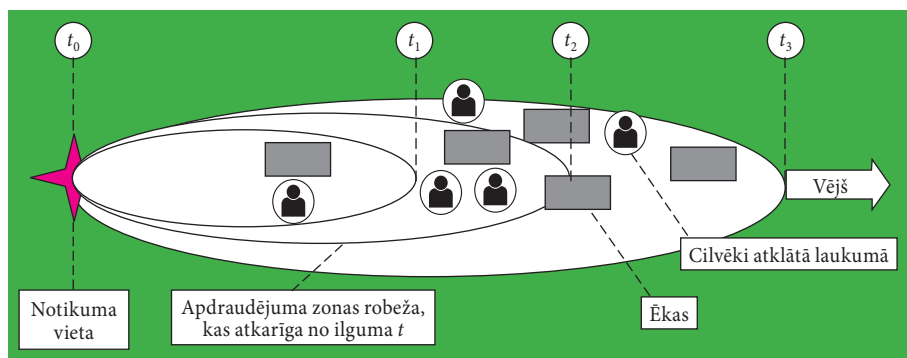
2.5. attēlā redzama sakarība starp toksisko devu un ietekmi uz cilvēka organismu – jo lielāka deva, jo stiprāka ietekme. Līknē parādītie ietekmes veidi: A – kairinājums; B – sistemātiskais efekts; C – nāve; LD_{100} – organisma nāve.

62 Akimov, V. A., Bykov, A. A., Vostokov, V. Yu., Dolgin, N. N. (2007). Emergency Risk Assessment Methods and Risk Standards for emergency situations. *Issues of Risk analysis*. Vol. 4, pp. 369–397.

63 Kuzmina, M. S. (2014). Methods of predicting a probability of damnification of human and material resources. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, 9. izdevums, 1.–12. pp.


2.5. att. Sakarība starp devu un iznākumu.⁶⁴

Ja deva nav letāla, cilvēka organisms toksiskās vielas no organisma izvada dabiskā veidā, un tas var ilgt no dažām stundām līdz daudziem desmitiem gadu. Devas lielums ir atkarīgs arī no tā, cik tuvu cilvēks atrodas notikuma vietai. Noteiktas koncentrācijas ietekmes zonu var attēlot kā ovālus vēja virzienā, kur būtiska nozīme ir vēja ātrumam konkrētā laika periodā un atmosfēras stratifikācijai. Noplūdes shēma redzama 2.6. attēlā.


2.6. att. Bīstamās vielas pārvietošanās zonu laukumi atmosfērā
(avots: autoru veidots).

Zaudējumu zona ir ar līniju norobežota vieta, kur katrā punktā pastāv apdraudējuma varbūtība, kas vienāda ar vienu, un kur pastāv apdraudējuma un sekas (letāls iznākums, infrastruktūras bojājumi) iespējamība, notiekot konkrēta veida ĀS vai avārijai, ja varbūtība ir vienāda ar vienu.

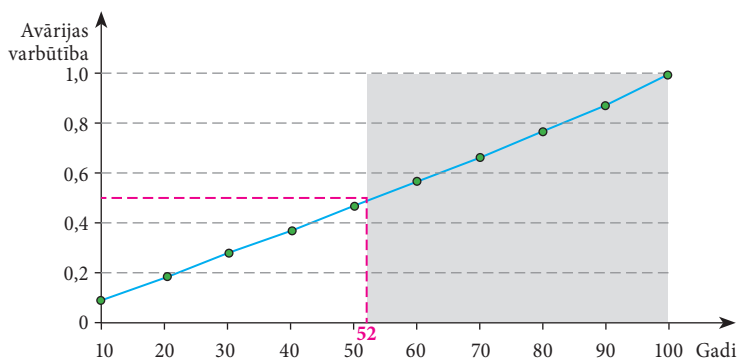
Ķīmiskās rūpniecības apmēru un degvielas patēriņa pieaugums visā pasaulē rada

64 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 59. lpp.

nepieciešamību būvēt jaunus bīstamo vielu (šķidrumu) uzglabāšanas rezervuārus. Lielai daļai Latvijā izmantoto rezervuāru ir pašu izstrādāts projekts. RRO viegli uzliesmojošs šķidrums (turpmāk – VUŠ) un sašķidrināta ogļūdeņražu gāze (turpmāk – SOG) tiek uzglabāta rezervuāru parkā esošajos rezervuāros vai spiedientvertnēs. Šie rezervuāri un spiedientvertnes ir visbīstamākās tehnoloģiskās iekārtas, un to ekspluatācija parasti ir saistīta ar visiem RRO notiekošajiem procesiem. Lai gan RRO dažādu faktoru ietekmē var samazināties pārkrauto naftas produktu apjomi, rezervuāru skaits objektā var būtiski nesamazināties. Turklāt rezervuāru būvniecība saistīta ar lieliem finansiāliem ieguldījumiem, tāpēc vienmēr jānovērtē rezervuāru parkā esošo rezervuāru nolietojums, lai noteiktu to vispārējo drošības līmeni.

Ekspluatācijas dokumentos katrai tehnoloģiskajai iekārtai noteikts drošas ekspluatācijas ilgums. Vertikālā dzelzs rezervuāra VUŠ glabāšanai ekspluatācijas termiņš parasti ir 40 gadu, SOG rezervuāriem – 35 gadi, un pēc šī termiņa beigām, pārbaudot iekārtu, termiņu var pagarināt, tātad Latvijā izmantoto iekārtu ekspluatācijas termiņš nav ierobežots. Iekārtas un objekti ir tik izturīgi, ka bieži vien tos lieto vēl ilgi pēc noteiktā ekspluatācijas termiņa beigām, tātad – pēc kritiskā ekspluatācijas termiņa sasniegšanas.⁶⁵

Analizējot RRO iekārtu tehnisko stāvokli, jāizmanto zinātnisko pētījumu dati, piemēram, RRO iekārtu kritiskā ekspluatācijas termiņa robežvērtība, lai novērtētu objekta rezervuāru nolietojumu un no tā izrietošo rezervuāra parka stāvokli.



2.7. att. Rezervuāra ar naftas produktiem ekspluatācijas ilgums gados.⁶⁶

RRO ĀS aktivizējošie faktori var būt zibens, stiprs vējš, ekspluatācijas noteikumu neievērošana, gaisa temperatūra, nokrišņi, ražošanas brāķis un savstarpēji nesaistīti faktori. Modelēšanas ietvaros (2.7. att.) ir novērtēts sagruvuma termiņš no tehnogēniem un dabas izraisītiem faktoriem gados. Diagrammā redzams, ka kritiskais rezervuāru ekspluatācijas termiņš ir no 50 līdz 52 gadiem.

65 Marston, A., Winfrey, R., Hemperstea, J. (1953). *Engeneering Valuation and Deprecation*. Iowa State University Press, p. 15.

66 Urbans, M. (2021). *Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 60. lpp.

2.2. Iespējamās avārijas noplūdes apjoma aprēķins

Šķidruma noplūde

Noplūdes laukums ir atkarīgs no meteoroloģiskiem apstākļiem, vietas reljefa un noplūde no vienas cisternas parasti ir 160–500 m²/min. Naftas produktu noplūdes pa visu platību ar nenozīmīgu kritumu, brīvas noplūdes diametrs un noplūdes (izplūdes) laukums tiek aprēķināts pēc 2.8. un 2.9. formulas.

$$d = \sqrt{25,5 \times V}, \text{ m}, \quad (2.8.)$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ m}^2, \quad (2.9.)$$

kur V – noplūdušo naftas produktu apjoms, m³.

Produktu izplūde ir atkarīga no bojājuma lieluma un vietas. Jo lielāks bojājums un zemāk uz rezervuāra tas atrodas, jo ātrāk notiek noplūde (2.10. vienādojums).

$$Q = S \times w, \quad (2.10.)$$

kur Q – izplūde,

S – šķērsriezuma laukums,

w – pārvietošanās ātrums.

Ideāla šķidruma iztecēšanas gadījumā šķidruma plūsmas ātrumu w [m/s] iztecē raksturo Torričelli vienādojums (skat. kinētiskās enerģijas komponenti Bernulli vienādojumā)⁶⁷.

$$w = \sqrt{2gH}, \quad (2.11.)$$

kur g – brīvās krišanas paātrinājums, 9,81 m/s²;

H – šķidruma staba augstums virs izteces vietas, m.

$$S = \mu \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.12.)$$

kur μ – izplūdes koeficients.

Kopējais apjoma izplūdes ātrums tiek noteikts pēc 2.13. formulas.

$$Q_1 = \mu \frac{\pi d^2}{4} \times \sqrt{2gH_1}, \text{ m}^3/\text{s}. \quad (2.13.)$$

Masas izplūdes ātrums ir

$$G_1 = Q_1 \times \rho_1, \text{ kg/s}, \quad (2.14.)$$

kur ρ_1 – šķidruma blīvums, kg.

⁶⁷ Ozoliņš, J., Stunda-Zujeva, A., Bušs, A. Praktikum. *Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti. Hidromehāniskie procesi*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 26. lpp.

Sašķidrinātas gāzes noplūde caur caurumu rezervuārā

Masas izplūdes ātrums (kg/s) ir

$$G_l = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{P_C M}{RT_C} P_C \left(0,167 P_R^5 + 0,534 P_R^{1,95} \right) \frac{\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_V} P_R}}{1,22 T_R^{3/2}}}, \quad (2.15.)$$

kur μ – izplūdes koeficients;

M – molmasa, kg/mol;

P_C – kritiskais sašķidrinātas gāzes spiediens, Pa;

R – universālā gāzes konstante, vienāda ar 8,31 J/(K·mol);

T_C – sašķidrinātas gāzes kritiskā temperatūra, K;

$P_R = P_V / P_C$ – bezizmēra sašķidrinātas gāzes spiediens rezervuārā;

P_V – sašķidrinātas gāzes spiediens rezervuārā, Pa.

Gāzes noplūdes gadījumā daļa no produkta ātri iztvaiko, izveidojot aerosola mākonī. Iztvaikojoša šķidruma daļa ir

$$\delta = 1 - \exp \left(- \frac{C_p (T_a - T_b)}{L_g} \right), \quad (2.16.)$$

kur C_p – SOG nosacītā siltumietilpība, J/(kg·K);

T_a – apkārtējā gaisa temperatūra, K;

T_b – SOG vārīšanās temperatūra pie atmosfēras spiediena, K;

L_g – SOG nosacītais tvaika siltums, J/kg.

Tiek pieņemts, ka pie $\delta \geq 0,35$ visa šķidruma masa, kas atrodas iekārtā, pāriet tvaika mākonī. Pie $\delta < 0,35$ atlikusī daļa no noplūdes vietas iztvaiko no siltuma, kas nāk no atmosfēras un noplūdes pārklājuma.

Šķidruma apjoms rezervuārā tiek noteikts pēc 2.17. formulas.

$$V_a = V \times 0,85, \text{ m}^3, \quad (2.17.)$$

kur V – rezervuāra tilpums;

0,85 – maksimālā uzpilde, kas veido 85 %.

Maksimālais šķidruma izplūdes laiks ir

$$t_i = V_l \times Q_l, \text{ s.} \quad (2.18.)$$

Šķidruma apjoms peļķē ir

$$V_l = (1 - \delta) \times Q_l \times t_i, \text{ m}^3. \quad (2.19.)$$

Iztvaikošanas laiks $t_i = 3600 \text{ s.}$

Šķidrās gāzes apjoms peļķē ir

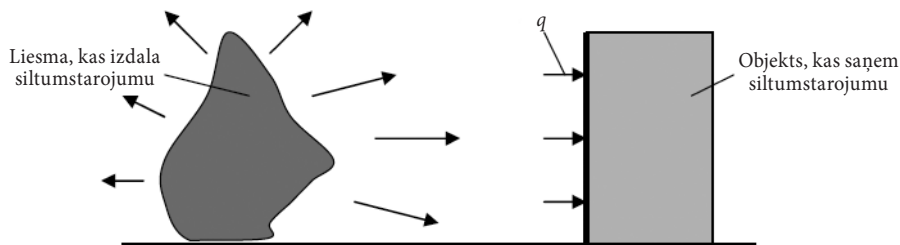
$$V_l = (1 - \delta) \times Q_l \times t_i, \text{ m}^3. \quad (2.20.)$$

2.3. Ar ugunsbīstamību un sprādzienbīstamību saistīto seku zaudējumu novērtēšanas metodes

20. gadsimta 40. gados pēc kodolieroču izmēģinājumiem un izmantošanas Hirosimā un Nagasaki tika konstatēts, cik sarežģīti ir veikt siltumstarojuma ietekmes kvantitatīvo analīzi. Latvijā siltumstarojuma ietekmes novērtēšanas metodes ir nepieciešamas, jo tiek ekspluatēti daudzi RRO, kuros glabājas ogļūdeņraži, un kur negadījuma rezultātā viens no iespējamākajiem apdraudējumiem ir dažādu veidu ugunsgrēki, savukārt galvenais negatīvās iedarbības faktors ir siltumstarojums, kas tiek pārnests uz objektu ar starojumu un konvekciju. Ugunsgrēks ir būtisks apdraudējums cilvēkiem un materiālajām vērtībām, tāpēc tas ir aktuāls sociāli ekonomisks problēmjautājums.

Siltumstarojums jeb infrasarkanais starojums ir optiskā diapazona elektromagnētiskais starojums, kas no garo viļņu puses piekļaujas redzamai gaismai un kas cilvēkam nav redzams.⁶⁸ Vielu un materiālu ugunsbīstamību un sprādzienbīstamību izsaka kā degšanas nosacījumu robežvērtību un maksimālo bīstamību degšanas gadījumā.⁶⁹ Tātad siltumstarojums RRO var veidoties tehnoloģisku procesu vai nekontrolējamās degšanas rezultātā. Sprādzienbīstamība galvenokārt ir saistīta ar pārspiedienu, kas rodas vielā vai materiālā, strauji atbrīvojoties lielam daudzumam enerģijas. Būtībā siltumstarojums un sprādziens ir cieši saistīti, jo sprādziena rezultātā var izdalīties siltumstarojums, kas var izraisīt sprādzienu. Siltumenerģijas pārnese veidi ir starojums, konvekcija, siltumvadītspēja un šo veidu kombinācija.⁷⁰

Novērtējot ar ugunsgrēkiem saistītus avārijas riskus, parasti tiek definēti četri ugunsgrēka veidi: noplūdes ugunsgrēks; ugunsgrēks ar strūkļas izveidošanos; uzliesmojums; ugunsgrēks ar ugunslodes izveidošanos. Siltumstarojuma pārnese uz apkārtējiem objektiem ugunsgrēka gadījumā redzama 2.8. attēlā.



2.8. att. Siltumstarojuma pārnese ugunsgrēka gadījumā.

No siltumstarojuma intensitātes ir atkarīgs cilvēka ādas bojājumu apmērs. Ādas

68 Kaļķis, V., Roja, Ž., Kaļķis, H. (2015). *Arodveselība un riski darbā*. Rīga: Medicīnas apgāds. 384. lpp.

69 Urbans, M. (2021). *Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 60. lpp.

70 Urbans, M. (2021). *Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 61. lpp.

bojājumi var apdraudēt cilvēka dzīvību, jo āda ir lielākais cilvēka orgāns, un tas aizņem 14–16 % no pieauguša cilvēka ķermeņa un 1,5–2,0 m² ķermeņa virsmas atkarībā no auguma. Cilvēka neaizsargātās ķermeņa daļas drīkst uzsilt līdz +40 °C. Neskot siltuma ietekmi uz cilvēka organismu, galvenais kritērijs ir **deva**, kas ir atkarīga no cilvēka auguma un RRO nelabvēlīgās ietekmes, un šo devu aprēķina, izmantojot 2.21. formulu.

$$Q = q \times t, \quad (2.21.)$$

kur Q – apstarojuma apmērs, J/m²;

q – pastāvīga siltuma plūsmas blīvums, W/m²;

t – iedarbības ilgums, s.

Siltumstarojuma laikā cilvēka organisms tiek apstarots ar siltuma enerģiju, ko aprēķina, reizinot pastāvīgās siltuma plūsmas blīvumu (q), ko cilvēka āda absorbējusi attiecīgajā laika periodā (t). Siltumstarojuma kritiskā robežvērtība noteikta eksperimentos ar bioobjektiem, izsakot to ar šādu formulu: $Q_{kr} = f(t_{kr})$,⁷¹ ko pierādīja zinātnieks V. P. Bēnke (*W. P. Behnke*).

ASV zinātnieku (*N. A. Eisenbergs (N. A. Eisenberg) et al.*) 1975. gadā ierosinātā ietekmes indeksa galvenā priekšrocība ir tā, ka tas ļauj prognozēt siltuma ietekmi uz cilvēka organismu, izmantojot *probit* modeli visu iespējamo varbūtību diapazonā (2.22. formula).⁷²

$$I = q^{4/3} \times t, \quad (2.22.)$$

kur q – siltuma plūsmas blīvums, kW/m²;

t – ekspozīcijas ilgums, s.

Vairākos pētījumos ar bioobjektiem tika konstatēts, ka noteiktas pakāpes apdegumu varbūtība ir cieši saistīta ar normālo sadalījuma funkciju, par **devas** kritēriju pieņemot ar *probit* modeli saistīto apstarojuma ietekmes rādītāja logaritmu.

Zinot siltumstarojuma intensitāti un recipienta atrašanās vietu RRO, kur tajā vai tā tuvumā notikusi avārija, ir iespējams novērtēt zaudējumus cilvēka veselībai. Intensīva siltumstarojuma ietekmē cilvēkam uz atsegtām un ar apģērbu aizsegtām ķermeņa daļām var veidoties I–IV pakāpes apdegumi. Medicīnas enciklopēdijā sniegtie skaidrojumi⁷³ par apdegumu pakāpēm apkopoti 1. pielikumā. Atbilstoši apdeguma pakāpei norādīta siltumstarojuma deva, intensitāte un ilgums (sek.), kādā cilvēkam izveidojas attiecīgās pakāpes apdegumi.

I pakāpes apdegumu gadījumā cilvēks atveseļojas pēc 2–4 dienām, II pakāpes apdegumu gadījumā – pēc 1–2 nedēļām.

71 Behnke, W. P. (1984). *Predicting Flash Fire Protection of Clothing from Laboratory Tests Using Second Degree Burn to Rate Performance*. Fire and materials, Vol. 8, pp. 53–63.

72 Tsao, C. K., Perry, W. W. (1979). Report Nr. CG-D-38-79, pp. 64.

73 *Apdegums* (2012). [tiešsaite]. Medicine.lv [skatīts 2019. gada 7. jūlijā]. Pieejams: https://medicine.lv/raksti/apdegums_pme.

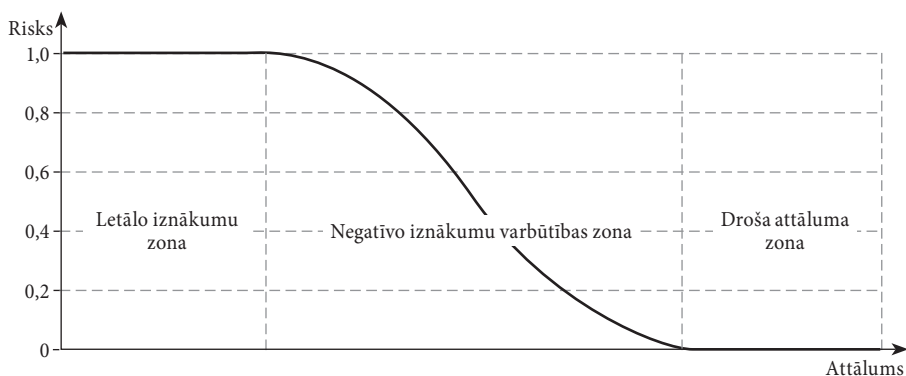
Atsaucoties uz grāmatu “Основы промышленной безопасности” (“Ražošanas drošības pamati”), vidējā pieļaujamā siltumstarojuma intensitāte ir $2,5 \text{ kW/m}^2$. Lai nebūtu nelabvēlīgas ietekmes ilgtermiņā, robežvērtība ir $1,4 \text{ kW/m}^2$, savukārt brezenta apgērbā tērptam cilvēkam robežvērtība ir $4,2 \text{ kW/m}^2$. Šajā literatūras avotā arī teikts, ka pieļaujamā cilvēka ādas uzsilšanas temperatūra ir $+45 \text{ }^\circ\text{C}$; pārsniedzot šo robežvērtību, cilvēks izjūt sāpes. Cilvēka ādas uzsilšanas laiku aprēķina, izmantojot 2.23. formulu.⁷⁴

$$t = \left(\frac{35}{q} \right)^{1,33}, \quad (2.23.)$$

kur t – ilgums, s;

q – siltumstarojuma intensitāte, kW/m^2 .

Jo tuvāk notikuma vietai cilvēks atrodas, jo lielāka ir dzīvības zaudējuma iespējamība. Kā redzams 2.9. attēlā, attālinoties no negadījuma vietas, samazinās negatīvā ietekme, bīstamība un traumu gūšanas varbūtība. Jo tālāk no notikuma vietas, jo mazāka ietekme un mazāks risks (R). Šī sakarība ilustrēta ar likni “Risks–attālums”.



2.9. att. Līkne “Risks–attālums”.

Katrai termiskā apdeguma pakāpei ir noteikti specifiski *probit* modeļa koeficienti, ko izmanto, lai noteiktu apdegumu pakāpi un ietekmēto cilvēku skaita varbūtības rādītāju. *Probit* modeļa vērtības dažādām apdegumu pakāpēm apkopotas 2.4. tabulā. Šie ir empiriskie *probit* modeļa rādītāji, turklāt dažādi autori izmanto atšķirīgus *probit* modeļa rādītājus, tāpēc tos ir grūti praktiski lietot, jo atšķiras arī aprēķina rezultāti.

74 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 62. lpp.

Probit modeļa vērtības (avots: autoru veidots)

Nr.	Medicīnas kritērijs	Varbūtības kritērijs, <i>Pr</i>	Datu avots
1.	Sāpju sliekšnis	$-8,74 + 2,99 \ln(t \times q^{4/3})$ (2.24. formula)	Enaleev, R. Sh., Teljakov, Je. Sh., Kachalkin, V. A., Chistov, Ju. S., Zakirov, A. M. (2011). Prognozirovanie sanitarnyh poter ot vozdejstvija teplovogo izlucheniya v chrezvychajnyh situacijah. Bezopasnost zhiznedejatelnosti. Nr.1., pp. 36–41.
2.		$-8,93 + 2,99 \ln I$ (2.25. formula)	Stoll, A. M., Greene, L. C. (1959). Relationship Between Pain and Tissue Damage Due to Thermal Radiation. Journal of Applied Physiology Vol. 14, No. 3. pp. 373–382.
3.	I pakāpes apdegumi	$-9,34 + 2,99 \ln I$ (2.26. formula)	
4.	II pakāpes apdegumi	$-11,58 + 2,99 \ln I$ (2.27. formula)	
5.	III pakāpes apdegumi	$-16 + 2,99 \ln I$ (2.28. formula)	Roberts, A. F. (1981). Thermal Radiation Hazards from Releases of LPG from Pressurized Storage Fire Safety Journal. Vol. 4, No. 3. pp. 197–212.
6.	Letāls iznākums	$-14,9 + 2,56 \ln I$ (2.29. formula)	Eisenberg, N. A. (1975). Vulnerability Model A Simulation for Assessing Resulting from Marine Spills. NTIS ADAm pp. 105–245.
7.		$-12,8 + 2,56 \ln I$ (2.30. formula)	Tsao, C. K., Perry, W. W. (1979). Modifications to the Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills Report No. CG-D-38–79. pp. 64.

Izmantojot *probit* modeļa formulu, pastāv reāla iespēja ar datoru ģenerēt automātisku algoritmu, lai prognozētu sanitāros un letālos zaudējumus tehnogēnās vides RRO ietekmes zonā ĀS gadījumā un iespējamās sekas.

Lai noskaidrotu siltumstarojumu iespējamās sekas, ir jāzina kompleksā procesa, piemēram, ugunsgrēka, parametri. Jānoskaidro degošo vielu un materiālu masa uz 1 m^2 , platība (*S*), kas atbilst nosacītai siltuma slodzei P_{gn} , un ko aprēķina, izmantojot 2.31. formulu.⁷⁵

$$P_{\text{gn}} = \sum \frac{m_i}{S}, \text{ kg/m}^2, \quad (2.31.)$$

kur m_i – degošas vielas masa, kg;

S – izvietošanas laukums, m^2 .

Par ietekmes platību uzskatāms laukums, kurā atrodas vielas vai materiāli, kas norobežoti ar aizsargbarjerām pret ugunsgrēku. Uzskatāms, ka visas vielas un visi

⁷⁵ Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 63. lpp.

materiāli, kas atrodas RRO, ir potenciāli enerģijas avoti, kas degot izdala siltumstarojumu. Tāpēc jāaprēķina kopējais sadegšanas siltums, kas rodas, sadegot visam materiālam vai visām vielām, un to aprēķina, izmantojot 2.32. formulu.

$$Q_{gn} = \frac{\sum m_i \times Q_{Hi}}{S}, \quad (2.32.)$$

kur Q_{gn} – siltuma daudzums, MJ/m²;

m_i – materiāla masa, kg;

Q_{Hi} – zemākais sadegšanas siltums, sadegot gumijai, kJ/kg.

Ugunsgrēka siltumstarojumu Q , kas izdalās degšanas vietā noteiktā laika periodā ($t = 1$ min), var aprēķināt, izmantojot 2.33. formulu.⁷⁶

$$Q = t_m \times Q_H \times \beta, \text{ kW}, \quad (2.33.)$$

kur β – sadegšanas koeficients, ko attiecina uz materiāla vai vielas pilnīgas sadegšanas apmēru;

Q_H – sadegšanas siltums, sadegot materiālam vai vielai, kJ/kg.

Attiecībā uz tehnoloģijām un procesiem, kas saistīti ar VUŠ un degošas gāzes ieguvu, transportēšanu, pārstrādi, uzglabāšanu un lietošanu, vienmēr pastāv bīstamība un iespēja veidoties sprādzienbīstamiem un izgarojošiem maisījumiem. Sprādzienu biežākie iemesli ir drošības noteikumu neievērošana, iekārtu pārkaršana, pārmērīgs spiediens, nepietiekama tehnoloģisko procesu kontrole, cauruļu plīšana un citi iemesli, kuru rezultātā gāzes vai VUŠ parasti noplūst savienojumu vietās gar nehermētiskām blīvēm.

Sprādziens ir ātri notiekošs fizikāls vai fizikāli ķīmiskais process, kura laikā izdalās liels daudzums enerģijas un kas notiek īsā laika posmā. Tā rezultātā rodas pārspiediens, vibrācijas un apkārtējo vidi ietekmējošs siltumstarojums, kura iemesls ir sprādzienu izraisošās vielas strauja izplešanās.⁷⁷ Strauju sprādzienu, kas ir spēcīgāks par standarta sprādzienu, dēvē par detonāciju. Detonācija ir otrais sliktākais iespējamais iznākums pēc aizdegšanās, it īpaši attiecībā uz viegli uzliesmojošiem tvaikiem. Pārspiediena (aptuveni 20 bāru) ietekmē viegli uzliesmojošu tvaiku liesmas ātrums var sasniegt aptuveni 1800 m/s.⁷⁸ Saspiestā gaisa slāņa priekšējo robežu, ko raksturo krass spiediena pieaugums, sauc par **triecienviļņa fronti**.⁷⁹ B. Dž. Vikema (*B. J. Wiekema*) norāda, ka visbiežāk detonāciju veic ēku, sienu un konstrukciju de-

76 Urbans, M., Vilcāne, I., Malahova, J. (2019). Assessment of Technogenic Risks in Recovering Company for Worn Tyres. No: *18th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": Proceedings*, Latvija, Jelgava, 22.–24. maijs, 2019. Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, pp. 1616.–1622.

77 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 64. lpp.

78 Chamberlain, G., Oran, E., Pekalski, A. (2019). Detonations in industrial vapour cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 62, Article: 103918.

79 Jegorovs, P., Šlahovs, I., Alabins, N. (1973). *Civilā aizsardzība*. Rīga. Izdevējs: Liesma. 46. lpp.

molēšanai,⁸⁰ un tur esošie traucēkļi rada labvēlīgus apstākļus liesmas paātrināšanai. Pamatparametri, kas raksturo triecienviļņa postošo iedarbību un kas nosaka drošu attālumu no sprādziena epicentra līdz celtnei, ir pārmērīgs spiediens uz viļņa frontes (ΔP), saspiešanās fāzes darbības ilgums (τ^+) vai viļņa garums (λ) un saspiešanās fāzes impulss (I^+).⁸¹ Cilvēks šajos apstākļos gūst smagas traumas, un liela pārspiediena iedarbībā izdzīvot praktiski nav iespējams.

Lai noteiktu letāla iznākuma varbūtību tiešas pārspiediena iedarbības un spiediena impulsa gadījumā, var izmantot *probit* modeļa vienādojumus,⁸² kas apkopoti 2.5. tabulā.

2.5. tabula

Probit modeļa lielumi (avots: autoru veidots)

Nr.	Bojājumi	<i>Probit</i> modelis
1.	Letāla iznākuma varbūtība ⁸³	$Pr = -77,1 + 6,91 \times \ln(\Delta P)$ (2.34. formula)
2.	Dzirdes orgānu bojājumi ⁸⁴	$Pr = -12,6 + 1,524 \ln(\Delta P)$ (2.35. formula)
3.	Pilnīgs ražošanas ēku sabrukums ⁸⁵ , letāla iznākuma varbūtība ⁸⁶	$Pr = 5 - 0,22 \left[\left(\frac{40000}{\Delta P} \right)^{7,3} + \left(\frac{460}{I^+} \right)^{11,3} \right]$ (2.36. formula)
4.	Grūti restaurējami ēku bojājumi, kā arī vidēji lieli ēku bojājumi	$Pr = 5 - 0,26 \left[\left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I^+} \right)^{9,3} \right]$ (2.37. formula)
5.	Nelieli ēku bojājumi	$Pr = 5 - 0,26 \left[\left(\frac{4600}{\Delta P} \right)^{3,9} + \left(\frac{110}{I^+} \right)^{5,0} \right]$ (2.38. formula)

ΔP – pārspiediens, Pa; I^+ – impulss, Pa · s.

80 Wiekema, B. J. (1984) Vapour cloud explosions—an analysis based on accidents: Part II. *Journal of Hazardous materials*, Vol. 8, Issue 4, pp. 313–329.

81 Šmidre, P., Jemeljanovs, A., Ieviņš, J. (2008). *Vides aizsardzība no tehnogēno avāriju un katastrofu ģenerētajiem piesārņojumiem*. Rīga: RTU Izdevniecība. 56. lpp.

82 Stolecka, K., Rusin, A. (2020). *Analysis of hazards related to syngas production and transport*. *Renewable Energy* Vol. 146, pp. 2535–2555.

83 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 65. lpp.

84 Baalisampang, T., Abbassi, R., Garaniya, V., Khan, F., Dadashzadeh, M. (2019). Modelling an integrated impact of fire, explosion and combustion products during transitional events caused by an accidental release of LNG. *Process Safety and Environmental Protection* Vol. 128, pp. 259–272.

85 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 65. lpp.

86 Leksin, A. (2017). *Solution Approach for a Coherent Probabilistic Assessment of Explosion and Fire Safety for Facilities at the Chemical Process Industries*. Bergische universität Wuppertal dissertation. p. 135

Letāla iznākuma varbūtība cilvēkiem pārspiediena ietekmē redzama 2.6. tabulā. Iespējamā ietekme uz brīvā laukumā esošiem neaizsargātiem cilvēkiem apkopota 2.8. tabulā.

2.6. tabula

Nosacīta letālo gadījumu varbūtība cilvēkiem sprādziena zonā⁸⁷

Bojājuma zonas	Robežvērtība ar 55 kPa pārspiedien	Robežvērtība ar 14 kPa pārspiedien	Robežvērtība ar 7 kPa pārspiedien
Letāla gadījuma varbūtība	0,5	0,01	0

Cilvēku traumēšanas iespējamība pārspiediena rezultātā, kas atkarīga no ēku un būvju sabrukšanas pakāpes, sniegta 2.7. tabulā.

Saspiešanās impulsu I^+ , (Pa · s), var aprēķināt, izmantojot 2.39. formulu.

$$I = 123 \frac{m_{\text{red}}^{0,66}}{r}, \quad (2.39.)$$

kur m_{red} – reducēta masa.

2.7. tabula

Cilvēku traumēšanas varbūtība atkarībā no ēku bojājumiem⁸⁸

Zaudējumi	Cilvēku traumēšanās varbūtība atkarībā no ēku bojājumiem			
	Pilnīga 65–105 kPa	Liela 50–65 kPa	Vidēja 30–50 kPa	Maza 10–30 kPa
Kopējie	1	0,6	0,2	0,05
Letālie	0,95	0,4	0,05	0
Sanitārie	0,05	0,2	0,15	0,05

87 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 65. lpp.

88 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 66. lpp.

2.8. tabula

Neaizsargātu cilvēku traumas raksturojums atklātā vietā⁸⁹

ΔP , kPa	Traumas pakāpe	Traumas raksturojums
20–40	Viegla	Viegla organisma kontūzija, īslaicīgi dzirdes orgānu bojājumi, roku un kāju izmežģījumi.
40–60	Vidēja	Nopietna kontūzija, nopietni dzirdes orgānu bojājumi, asinsizplūdums no ausīm un deguna, stipri izmežģījumi un kaulu lūzumi.
60–100	Smaga	Nopietna kontūzija, iekšējo orgānu un smadzeņu bojājumi, smagi kaulu lūzumi, iespējams letāls iznākums.
> 100	Ļoti smaga	Traumu rezultātā ļoti bieži iestājas nāve.

Novērtējot zaudējumus konkrētiem objektiem, kas atrodas iespējamā pārspiediena ietekmes zonā, ir jānovērtē to parametri un izturības pakāpe. Spiediena robežvērtības, kuras sasniedzot, ēka var sabrukt, apkopotas 2.9. tabulā. Ja šīs robežvērtības ir pārsniegtas, ēkas atjaunot nav lietderīgi, jo to konstrukcijas ir neatgriezeniski bojātas un ir iespējama cilvēku masveida bojāeja. Pārspiediena izraisīto bojājumu apmēra sakarības publicētas 6. pielikumā.

2.9. tabula

Ēku un celtnu spiediena pamata robežvērtības

Nr.	Ēkas un konstrukcijas veids	$\Delta P_{\text{огр.}}$ pārspiediens, kPa
1.	Īpaši izturīgas antiseismiskās	80
2.	Ar smagu karkasu un ceļamkrānu aprīkojumu	30
3.	Ar smagu karkasu un bez ceļamkrānu aprīkojuma	25
4.	Dzelzsbetona karkasa	27
5.	Ar vieglu metālisko karkasu vai bez tā	20
6.	Ķieģeļu bez karkasa	13
7.	Ar metālisko karkasu un ar viļņoto tēraudu	10
8.	Koka celtnes	7

Lai aprēķinātu pārspiediena ietekmes iespējamo bojājumu varbūtību iekārtām un novērtētu ietekmes zaudējumus iekārtām, ir izstrādāts atsevišķs *probit* modelis (2.10. tab.).

89 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 66. lpp.

Probit modeļa vērtības

Nr.	Iekārtas veids	Probit modelis
1.	Iekārtas, kurās tiek izmantots atmosfēras spiediens	$Pr = -9,36 + 1,43 \times \ln(\Delta P)$ (2.40. formula)
2.	Iekārtas, kurās tiek izmantots iekšējais pārspiediens	$Pr = -14,44 + 1,82 \times \ln(\Delta P)$ (2.41. formula)
3.	Kolonnveida naftas un gāzes tvertnes	$Pr = -12,22 + 1,65 \times \ln(\Delta P)$ (2.42. formula)
4.	Mazgabarīta ķīmiski tehnoloģiskas iekārtas	$Pr = -12,42 + 1,64 \times \ln(\Delta P)$ (2.43. formula)

Lai prognozētu no ēku un celtnu bojājuma pakāpes atkarīgu zaudējumu apmēru, izšķir piecas galvenās pakāpes, kas apkopotas 8. pielikumā.

Novērtējot materiālos zaudējumus bojātām ēkām, konstrukcijām un infrastruktūrai, tiek summēti objekti, kas iekļuvuši ietekmes zonā, ņemot vērā to kadastrālo vērtību vai atlikušo vērtību un bojājumu apmēru, ko var aprēķināt, izmantojot 2.44. vienādojumu.

$$Y_{lk} = N_{lk} a_1 A_{oblk}, \quad (2.44.)$$

kur N_{lk} – objektu skaits, kas tika ietekmēti ar I pakāpes bojājumu A veidā;
 a_1 – koeficients, ko nosaka atkarībā no objektu bojājumu pakāpes (8. pielikums);
 A_{oblk} – objektu kadastrālā vērtība ietekmes zonā ar I pakāpes bojājumu K veidā.

Objektu, kam stipru bojājumu rezultātā ir bojātas nesošās konstrukcijas, atjaunot nav lietderīgi, un tādas būves ir jānojauc, nepieciešamības gadījumā paredzot jauna objekta celtniecību. Bojājumu varbūtību nosaka, izmantojot *probit* modeli. Jaunas celtniecības izmaksas aprēķina atbilstoši tāmei vai izmantojot 2.45. formulu.⁹⁰

$$C_j = C_m + C_a + C_{am} + C_p, \quad (2.45.)$$

kur C_m – darbam nepieciešamās materiālās izmaksas, EUR;
 C_a – darbinieku alga pirms nodokļu nomaksas, EUR;
 C_{am} – amortizācijas izmaksas par izmantotajiem tehniskajiem līdzekļiem, EUR;
 C_p – pārējās izmaksas par veikto darbu, EUR.

90 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 67. lpp.

2.4. Ugunslode

Gāzes tvertņu sprādzieni vai SOG degšana atmosfērā ir atkarīga no degošās vielas daudzuma, kas nokļuvis atmosfērā, kā rezultātā var notikt sprādziens, strūklas ugunsgrēks vai izveidoties ugunslode. Ugunslode ir gāzes mākonis, kas aizpildīts ar degošu vielu, kas sajaukta ar gaisu atkarībā no tās rašanās veida, taču tā nevar detonēt un sāk degt apkārt savai ārējai robežai. Tā veidojas ugunslode. Ugunslode nav uzskatāma par standarta ugunsgrēku, un tā spēj ietekmēt apkārtējo vidi ļoti lielā attālumā.

Strūklas ugunsgrēks parasti izveidojas tvertnes bojājuma gadījumā un tad, ja spiediena ietekmē izplūst SOG, veidojot degošu strūklu (kvazistacionārs stāvoklis), ja ir aizdegšanās avots.

Degšana ar ugunsloides izveidošanos bieži var attīstīties un kļūt par sprādzienu, ja notikums ir saistīts ar lielu daudzumu degoša šķidruma, ja šķidrums ir pārsildīts, kā arī momentāna rezervuāra vai tvertnes sabrukuma gadījumā. Ugunslode izveidojas gadījumos, kad ir momentāns aizdegšanās avots un SOG vai VUŠ nepaspēja sajaukties ar gaisu. Ja ir novēlota aizdegšanās, kad vielas paspēj sajaukties ar gaisu, tad tas izraisīs šo vielu sprādzienu. Tas var notikt, ja tvertnē uzkarst SOG vai VUŠ. Šādu siltuma ierosinātu degšanu ar ugunsloides izveidošanos zinātniskajā literatūrā parasti sauc par *BLEVE*, kas ir akronīms apzīmējumam angļu valodā – *boiling liquid expanding vapour explosion* jeb verdošs šķidrums ar paplašinošu tvaika sprādzienu. *BLEVE* ir viskardinālākais iznākums, un tas parasti notiek, kad pēc rezervuāra sabrukšanas strauji krītas spiediens, šķidrums uzvārās un kļūst par tvaiku, kas pārējo šķidrumu paņem līdzī aerosola veidā.⁹¹ Zinātnieks T. Ebasī (*T. Abbasi*) savā pētījumā par *BLEVE* gadījumiem izanalizējis vairākus terminus, un par vienu no atbilstošākajām *BLEVE* definīcijām uzskata ASV Ķīmisko procesu drošības centra definīciju – „pēkšņa, liela spiedienam pakļauta pārkarsēta šķidruma izdalīšanās atmosfērā”.⁹² T. Ebasī uzskata, ka bīstami VUŠ vai gāzes pēkšņi var izdalīties rezervuāra ārsienas bojājuma rezultātā, ko var izraisīt ugunsgrēks, raķetes trieciens, korozija, ražošanas defekti, iekšēja pārkarsēšana un citi faktori. Eksistējošo ugunsloides modeļu trūkums ir saistīts ar dažādiem rezultātiem, ko iegūst ar dažādām aprēķina metodēm, izmantojot vienotus izejas datus.

Ugunslodei saskaroties ar cilvēka organismu, cilvēks var gūt dažādas pakāpes apdegumus, kas saistīti ar ugunsloides siltumstarojumu un ugunsloides iedarbības ilgumu. Cilvēka organismu apdraudošos fizikālos, bioloģiskos un ķīmiskos faktorus medicīnā sauc par **devu**, dažādu bīstamo faktoru iedarbības rezultātu uz cilvēka organismu sauc par **efektu**, kas var būt apdegums, saindēšanās, samaņas zudums vai šoks. Visu šo veidu ietekme var izraisīt dzīvības zaudējumu atkarībā no cilvēka organisma un ietekmes apmēra. Medicīnas statistikā ir noteikta vidējā efektīvā deva

91 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 68. lpp.

92 Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2007). The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *Journal of Hazardous Materials* Vol. 141, pp. 489–519.

D_{50} , kas ietekmē 50 % negadījumā skarto cilvēku. Izsakot efektu kā letālu iznākumu, šo devu sauc par letālo DL_{50} , ir jāņem vērā arī procentuālais samērs starp letāliem zaudējumiem un sanitāriem zaudējumiem izdzīvojušajām personām.

Cilvēka dzīvības zaudējuma varbūtība siltumstarojuma ietekmē atkarībā no cilvēka vecuma apkopota 2.11. tabulā. Kā redzams, siltumstarojuma ietekme ir atkarīga no diviem galvenajiem faktoriem: pirmkārt, apdeguma laukuma uz cilvēka ķermeņa, otrkārt, ietekmētā cilvēka vecuma – jo vecāks cilvēks, jo lielāka smagu seku varbūtība, tāpēc, novērtējot iespējamās sekas cilvēkiem (iedzīvotājiem), jāņem vērā arī potenciāli ietekmēto personu vecums. Cipars “0” 2.11. tabulā nozīmē, ka cilvēkam ir visas iespējas izdzīvot un atveseļoties, savukārt cipars “1” apzīmē cilvēka bojāejas 100 % varbūtību. Cipari 0,1–0,9 parāda bīstamības (letālo negadījumu, %) pieaugumu, palielinoties cilvēka ķermeņa apdeguma laukumam.

2.11. tabula

Cilvēka dzīvības zaudējuma varbūtība atkarībā no vecuma un no apdeguma laukuma, %⁹³

Cilvēka ķermeņa apdeguma laukums, %	Cilvēka vecums, gadi						
	5–9	15–19	25–29	35–39	45–49	55–59	65–69
Vairāk nekā 93	1	1	1	1	1	1	1
83–87	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1
73–77	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1	1
63–67	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1
53–57	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1
43–47	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1
33–37	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
23–27	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,6
13–17	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3
3–7	0	0	0	0	0	0	0,1

Operatīva palīdzības sniegšana visām no siltumstarojuma cietušām personām ir iespējama, pamatojoties uz vienādojumu **deva–efekts**, kas saistīts ar termodinamiskās parametru un ietekmes faktoriem, ko izsaka ar medicīnas kritērijiem termiskā bojājuma gadījumā.

Siltumstarojumu no izplūdušas šķidras vai cietas vielas var aprēķināt dažādi. Šajā monogrāfijā izmantotas šādas 2.46. un 2.47. formulas.⁹⁴

$$q = E_f \times F_q \times \tau, \quad (2.46.)$$

$$q = E_p \times F_v \times \tau, \quad (2.47.)$$

93 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 69. lpp.

94 Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., Izarra, C., Nait-Saida R., Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 54, pp. 69–84.

kur E_p , E_v – liesmas siltumstarojuma vidējo virsmas blīvumu (kW/m^2) nosaka, izmantojot eksperimentālos datus; VUŠ vai SOG noplūdes ugunsgrēkiem: naftas produktiem – 40 kW/m^2 , SOG – 100 kW/m^2 ; ⁹⁵
 F_q , F_v – apstarojuma virziena koeficients;
 τ – atmosfēras caurlaidības koeficients.

Turpmāk tiks aplūkota ugunslobes siltumstarojuma aprēķināšanas metode. Lai izpētītu ugunslobes ietekmes faktorus uz apkārtējo vidi, infrastruktūru un cilvēkiem, laikus sagatavotos iespējamam apdraudējumam un veiktu nepieciešamos preventīvos pasākumus, ir jānosaka ugunslobes ģeometriskie parametri. Avārijas rezultātā izmestās verdošās SOG daudzums var būt no 1 t līdz 5000 t; ugunslobes maksimālais diametrs – no 50 m līdz 800 m, degšanas ilgums – no 6 s līdz 100 s. ⁹⁶ V. E. Martinsens (W. E. Martinsens) uzskata, ka nav iespējams precīzi noteikt ugunslobes degvielas masu, ⁹⁷ tāpēc dažādi zinātnieki piedāvā aprēķiniem izmantot dažādu ugunslobi veidojošo masu. Dž. Kesals (J. Casal), Dž. Arnolds (J. Arnaldos), H. Montjēls (H. Montiel), E. Planas-Kučī (E. Planas-Cuchi), Dž. A. Vilčežs (J. A. Vilchez) apkopoja datus par sākotnējās masas ietekmi uz ugunslobes diametru ⁹⁸ un konstatēja, ka esošās aprēķina metodes apraksta statistiski vidējo ugunslobes modeli, tāpēc piedāvāja savu dinamisko ugunslobes modeli. Viņu izveidotais modelis sniedz apjomīgākus datus nekā citas metodes. ⁹⁹ Dažādu metožu salīdzinājums redzams 2.10. attēlā, kā arī 10. pielikuma tabulā. Aprēķins veikts, izmantojot šādus parametrus: sfēriskās tilpnes apjoms – 175 m^3 ; šķidruma blīvums – 499 kg/m^3 (propāns); iepildes koeficients – 85 %; attālums no apstarojuma objekta – 175 m zem ugunslobes centra. Atšķirīgais rezultāts parāda, ka esošās ugunslobes aprēķina metodes ir nepilnīgas – tās sniedz dažādus rezultātus, tātad atšķiras arī sekas recipientiem, videi un infrastruktūrai. Atšķiras arī galvenais ugunslobes rādītājs – siltumstarojums un ekspozīcijas ilgums, tāpēc nav iespējams noteikt, kura metode ir precīzāka.

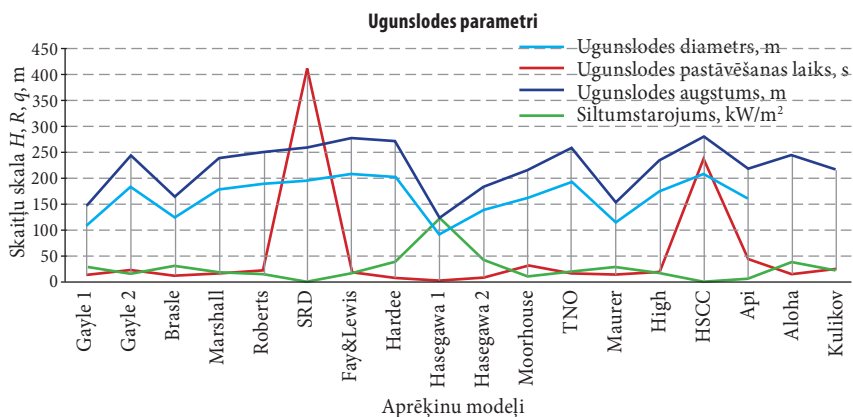
95 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 69. lpp.

96 Enaleev, R. Sh., Teljakov, Je. Sh., Hajrullin, I. R., Kachalkin, V. A. (2008). Burning of gases in a fireball: Abstracts and reports of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. pp. 327–329.

97 Martinsen, W. E., Marx, J. D. (1999). An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28–October 1, 1999, p. 4.

98 Casal, J., Arnaldos, J., Montiel, H., Planas-Cuchi, E., Vilchez, J. A. (2002). Modeling and understanding BLEVEs. [tiešsaite] Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya – Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain. [Skatīts 2018. gada 17. septembrī]. Pieejams: <https://docplayer.net/20806029-Chapter-22-modeling-and-understanding-bleves.html>.

99 Altamirova, E., Perminov, V. A., Akchina, S. S. (2018). Analysis and estimation of fireball parameters using existing methods. *Technosphere safety*. Vol. 3, No. 1 XXI Century, pp. 84–91.



2.10. att. Ugunsloides aprēķināšanas metožu salīdzinājums (avots: autoru veidots).

Kā ugunsloides siltumstarojuma ietekmes novērtēšanas piemērs 2.12. tabulā apkopotas formulas un piemēros veikts aprēķins, izmantojot 10. pielikumā piedāvātās formulu konstantes.

Ugunsloides siltumstarojuma aprēķina formulas (avots: autoru veidots)

Apzīmējumi	V. Kuļikovs, I. Gavriljins ¹⁰⁰	I. Selamijs, B. Meneska, K. Četehouns, C. Izarra, R. Zidani ¹⁰¹
D_s, D_{FB} – efektīvais ugunsloides diametrs, m; a_1 – ugunsloides diametra koeficients (sk. 10. pielikumu); M^{b1} – degvielas masa, kg (b1 – empīriskā konstante)	$D_s = 5,33 \times m^{0,327}$ (2.48. formula)	$D_{FB} = a_1 M^{b1}$ (2.49. formula)
t_s, t_{FB} – ugunsloides pastāvēšanas laiks, s; a_2 – ugunsloides pastāvēšanas ilguma koeficients (sk. 10. pielikumu); M^{b2} – degvielas masa, kg (b2 – empīriskā konstante)	$t_s = 0,92 \times m^{0,303}$ (2.50. formula)	$t_{FB} = a_2 M^{b2}$ (2.51. formula)
F_q, F_v – apstarojuma virziena koeficients; H – siltuma plūsmas blīvums, kW/m ² H_{FB} – ugunsloides centra augstums; L – liesmas augstums, m; r – attālums no ugunsloides līdz zemei, m	$F_q = \frac{\frac{H}{D_s} + 0,5}{4 \times \left[\left(\frac{H}{D_s} + 0,5 \right)^2 + \left(\frac{r}{D_s} \right)^2 \right]^{1,5}}$ (2.52. formula)	$F_v = \frac{D_{FB}^2}{4(H_{FB}^2 + L^2)}$ (2.53. formula) $H_{FB} = 0,75 D_{FB}$ (2.54. formula)
E_p, F_p – virsmas siltumstarojuma jauda, kW/m ² ; χ_r – starojuma siltuma frakcija, kW; M – VUŠ, SOG tvaika masa, kg $P_0^{0,32}$ – relatīvais spiediens tilpnē tieši pirms eksplozijas	$E_f = 350 \text{ kW/m}^2$ (2.55. formula)	$E_p = \frac{\chi_r M \Delta H_C}{\pi D_{FB}^2 t_{FB}}$ (2.56. formula) $\chi_r = 0,27 P_0^{0,32}$ (2.57. formula)
τ – atmosfēras caurlaidības koeficients (no 0 līdz 1); P_w – daļējais ūdens spiediens; R_h – relatīvais mitrums, %; T – gaisa temperatūra, K; H_{FB} – siltuma plūsmas blīvums, kW/m ²	$T = \exp \left[-7,0 \times 10^{-4} \left(\sqrt{r^2 + H^2} - D_s \right) \right]$ (2.58. formula)	$\tau = 2,02 \left[P_w H_{FB}^2 (+L^2)^{1/2} \right]^{-0,09}$ (2.59. formula) $P_w = 1013,25 R_h \exp \left(14,4114 - \frac{5328}{T} \right)$ (2.60. formula)

Liesmas siltumstarojuma vidējais virsmas blīvums atkarībā no degšanas izcelšanās vietas diametra un īpatnējās masas ātrums dažām šķidrām ogļūdeņražu degvielām apkopots 2.13. tabulā. Ja diametrs ir mazāks par 10 m vai lielāks par 50 m, izmanto tos pašus rādītājus kā 10 m un 50 m.

100 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 71. lpp.

101 Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., Izarra, C., Nait-Saida, R., Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 54, pp. 69–84.

Liesmas siltumstarojuma vidējais virsmas blīvums¹⁰²

Degviela	$E_r, \text{ kW/m}^2$					$m, \text{ kg/(m}^2\text{s)}$
	10	20	30	40	50	
SPG (metāns)	220	180	150	130	120	0,08
SOG (propāns un butāns)	80	63	50	43	40	0,1
Benzīns	60	47	35	28	25	0,06
Dīzeļdegviela	40	32	25	21	18	0,04

2.5. Pelķes siltumstarojums

Pelķes siltumstarojums ir atkarīgs no noplūdes vietas platības un laika apstākļiem noplūdes vietā. Izliešanās laukumu var aprēķināt, izmantojot iepriekš minētās formulas vai pieņemt apvaļņojuma perimetru.

Efektīva ugunsgrēka laukuma diametru uz brīvas virsmas aprēķina pēc 2.61. formulas.

$$d = \sqrt{\frac{4 \times F_{\text{tv}}}{\pi}} \quad (2.61.)$$

Liesmas garumu L , m, nosaka pēc 2.62.–2.64. formulas.

Pie $u_* \geq 1$

$$L = 55 \times d \left(\frac{m'}{\rho_a \times \sqrt{g d}} \right)^{0,67} u_*^{0,21}. \quad (2.62.)$$

Pie $u_* < 1$

$$L = 42 \times d \left(\frac{m'}{\rho_a \times \sqrt{g d}} \right)^{0,61} \quad (2.63.)$$

Parametrs u_* ir

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \times g \times d}{\rho_{\text{tv}}}}} \quad (2.64.)$$

kur m' – nosacītais VUŠ masas izdegšanas ātrums, $\text{kg/(m}^2\text{s)}$;

ρ_a – apkārtējā gaisa blīvums, kg/m^3 ;

ρ_{tv} – VUŠ tvaiku blīvums pie vārīšanās temperatūras, kg/m^3 ;

w_0 – vēja ātrums, m/s ;

g – brīvās krišanas paātrinājums ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Liesmas novirzes leņķis pa vertikāli, kad vēja ietekme ir θ , rad, tiek aprēķināts pēc 2.65. formulas.

102 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 71. lpp.

$$\cos \theta = \{1, \text{pie } u_* < 1; u_*^{-0,5}, \text{pie } u_* \geq 1\} \quad (2.65.)$$

Atmosfēras caurlaidības koeficients ir

$$\tau = \exp\left(-7 \times 10^{-4} \times (X - 0,5 \times d)\right). \quad (2.66.)$$

Siltumstarojuma intensitāte pelķes ugunsgrēkam q , kWh/m², VUŠ un SOG tiek aprēķināta tāpat kā ugunslodei –

$$Q = E_f \times F_q \times \tau, \quad (2.67.)$$

kur E_f – liesmas siltumstarojuma vidējo virsmas blīvumu (kW/m²) nosaka, izmantojot eksperimentālos datus (2.13. tab.);

F_q – apstarojuma virziena koeficients;

τ – atmosfēras caurlaidības koeficients.

Apstarojuma virziena koeficients F_q tiek aprēķināts, izmantojot 2.68. formulu.

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (2.68.)$$

kur F_V, F_H – apstarojuma faktori atbilstoši vertikālam un horizontālam laukumam.

Tos nosaka ar 2.69.–2.75. izteiksmes palīdzību.

Apstarojuma faktori pa vertikāli (2.69.)

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left\{ -E \arctan D + E \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a \sin \theta)}{AB} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan \left(\frac{AD}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \arctan \left[\left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \arctan \left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right] \right\}$$

Apstarojuma faktori pa horizontāli (2.70.)

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left\{ \arctan \frac{1}{D} + \frac{\sin \theta}{C} \left[\arctan \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \arctan \left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+ab \sin \theta)}{AB} \right] \arctan \frac{AD}{B} \right\}$$

Aprēķina lielumi.

$$a = \frac{2L}{d} \quad (2.71.)$$

$$b = \frac{2X}{d} \quad (2.72.)$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1) \sin \theta} \quad (2.61.)$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1) \sin \theta} \quad (2.62.)$$

$$C = \sqrt{1 + (b^2 - 1) \cos^2 \theta} \quad (2.63.)$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} \quad (2.73.)$$

$$E = \frac{a \cos \theta}{b - a \sin \theta} \quad (2.74.)$$

$$F = \sqrt{b^2 - 1} \quad (2.75.)$$

Vidēja liesmas siltumstarojuma laukuma apstarošanas intensitāti, ja nav datu vienkomponta šķidrumiem, var noteikt pēc 2.76. formulas.

$$E_f = \frac{0,4m'H_{SG}}{\left(1 + 4\frac{L}{d}\right)} \text{ kWh/m}^2 \quad (2.76.)$$

2.6. Pārspiediens

Iespējamā pārspiediena ietekme tiek saistīta ar avārijas rezultātā radušās noplūdušās vielas sastāvu, ķīmiskās vielas peļķes lielumu, iztvaikošanas intensitāti, kā arī laika apstākļiem notikuma vietā, vēja ietekmē sprādzienbīstamas zonas praktiski neveidojas.

Viegli uzliesmojoša šķidruma iztvaikošanas intensitāti atmosfērā noteiktā gaisa temperatūrā aprēķina pēc 2.77. formulas.¹⁰³

$$W = 10^{-6} \eta \sqrt{M} P_t, \quad (2.77.)$$

kur W – VUŠ iztvaikošanas intensitāte, kg/(m²s);

η – koeficients, kas atkarīgs no gaisa temperatūras un gaisa plūsmas ātruma (ārpus telpas $\eta = 1$);

M – naftas produkta molmasa, kg/mol;

P_t – degvielas tvaiku spiediens, kPa.

NĶM tvaiku blīvumu noteiktā temperatūrā var aprēķināt pēc 2.78. formulas.¹⁰⁴

$$P_{tv} = \frac{M}{V_0 (1 + 0,00367 t_p)}, \text{ kg/m}^3, \quad (2.78.)$$

kur M – naftas produkta molmasa, kg/mol;

V_0 – 22,413 mol, grammolekulas tilpums;

t_p – aprēķina gaisa temperatūra, °C.

Tvaika masas noteikšanai tiek izmantota 2.79. formula.

$$M_{tv} = S \times W \times t, \quad (2.79.)$$

kur M_{tv} – tvaiku masa, kas iekļuvusi atmosfērā, kg;

$t = 3600$ s – iztvaikošanas ilgums;

W – iztvaikošanas intensitāte;

103 A. Jemeljanovs, J. Ieviņš, J. Puškina. Objekta riska novērtēšana. RTU. 2007. 128. lpp.

104 A. Jemeljanovs, J. Ieviņš, J. Puškina. Objekta riska novērtēšana. RTU. 2007. 107. lpp.

S – iztvaikošanas laukums.

Zonas horizontālo izmēru, m , kas ierobežo koncentrācijas apgabalu, kas pārsniedz zemāko liesmu izplatības koncentrācijas robežu C_{ZIKR} , modelis redzams 2.11. attēlā.

Sprādzienbīstamo zonu aprēķinu VUŠ iztvaikošanai veic, izmantojot 2.80. un 2.81. formulu. Par zonas sākumu tiek pieņemts iztvaikošanas centrs.

$$X_{zkr} = Y_{zkr} = 3,2\sqrt{K} \left(\frac{P_n}{C_{zkr}} \right)^{0,8} \left(\frac{M_{tv}}{P_{tv} \times P_n} \right)^{0,33}, \quad (2.80.)$$

$$Z_{zkr} = 0,12\sqrt{K} \left(\frac{P_n}{C_{zkr}} \right)^{0,8} \left(\frac{M_{tv}}{P_{tv} \times P_n} \right)^{0,33}, \quad (2.81.)$$

kur M_{tv} – VUŠ tvaiku masa;

P_{tv} – VUŠ tvaiku blīvums noteiktā temperatūrā, kg/m^3 ;

P_n – piesātināto VUŠ tvaiku spiediens aprēķina temperatūrā,

K – koeficients, kas atkarīgs no iztvaikošanas laika;

C_{ZIKR} – VUŠ tvaiku liesmas zemākā koncentrācijas izplatības robeža, m ;

Z_{ZIKR} – zemākā koncentrācijas izplatības robeža, m .

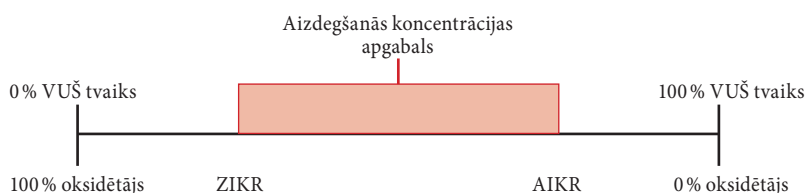
Degošām gāzēm sprādzienbīstamās koncentrācijas izplatības robežu aprēķina pēc 2.82. un 2.83. formulas.

$$R_{zkr} = 7,8 \left(\frac{M_{tv}}{P_{tv} \times C_{zkr}} \right)^{0,33}, \quad m, \quad (2.82.)$$

$$Z_{zkr} = 0,26 \left(\frac{M_{tv}}{P_{tv} \times C_{zkr}} \right)^{0,33}, \quad m. \quad (2.83.)$$

Ietekmes rādiuss, sadegot tvaikiem, tiek aprēķināts pēc 2.84. formulas.

$$R = 1,2R_{zkr}, \quad m. \quad (2.84.)$$



2.11. att. Sprādzienbīstamas zonas modelis.

Pārspiediena iedarbība uz cilvēka organismu ir atkarīga no cilvēka atrašanās vietas un no tā, vai pārspiediens notiek brīvā laukumā vai apbūvētā teritorijā, piemēram, uz ielas starp ēkām. Sekas cilvēkiem un ēkām, pārspiediena iedarbībā veidojoties gaisa vilnim, apkopotas 2.14. tabulā. Tajā redzams, ka atkarībā no pārspiediena apmēra iespējamās sekas gan cilvēkiem, gan celtnēm, kas atradās notikuma vietā, atšķiras. Tātad – jo lielāka pārspiediena ietekme uz cilvēkiem un ēkām, jo lielāki iespējamie ekonomiskie zaudējumi.

2.14. tabula

Pārspiediena gaisa viļņa iedarbības sekas¹⁰⁵

Pārspiediens, kPa	Ēku sagrūvuma raksturojums	Cilvēki, kas guva traumas, %			Zaudējumi ēkai, % no kopējām izmaksām
		Īpaši smagas	Smagas	Vidēji smagas	
1–3	Zems	–	0,1–0,3	3–7	5–10
3–6	Vidējs	0,1–0,3	0,5–1,5	5–15	10–20
6–9	Spēcīgs	0,5–1,5	3–7	15–25	40–60
30–60	Pilnīgs	5–10	15–20	40–60	100–150

Pārspiediena lielumu, kas attīstās, sadegot gāzes, tvaika un gaisa maisījumiem, nosaka pēc 2.85. formulas.

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{m_{np}^{0,33}}{r} + 3 \frac{m_{np}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{m_{np}}{r^3} \right), \quad (2.85.)$$

kur P_0 – atmosfēras spiediens, kPa (pieļaujams pieņemt vienādu ar 101 kPa);

r – attālums no gāzes, tvaika, gaisa mākoņa ģeometriskā centra, m;

m_{np} – gāzes vai tvaika reducētā masa, kg, ko aprēķina pēc 2.86. formulas.

$$m_{np} = \frac{Q_{sg}}{Q_0} M_{tv} K_z, \quad (2.86.)$$

kur Q_{sg} – gāzes vai tvaika sadegšanas īpanējais siltums, kJ/kg;

K_z – degošo gāzu un tvaiku līdzdalības degšanā koeficients, ko pieļaujams pieņemt vienādu ar 0,1;

Q_0 – konstante, kas vienāda ar $4,52 \times 10^3$ kJ/kg;

M_{tv} – degošo gāzu un/vai tvaiku masa, kas avārijas rezultātā ir nokļuvuši apkārtējā vidē, kg.

Tādējādi var noteikt iztvaikošanas intensitāti noplūdes gadījumā sliktākajam scenārijam; iztvaikošanas intensitātes koeficientu η , ja noplūde notikusi telpā, nepieciešams izvēlēties no 2.15. tabulas.

2.15. tabula

Gaisa ātrums, m/s	Koeficients η gaisa temperatūrā t , °C (telpā)				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

105 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 72. lpp.

Piesātināto degvielas tvaiku spiedienu var aprēķināt pēc Antuāna vienādojuma (2.87. vienādojums).¹⁰⁶

$$P_t = 10^{A - \frac{B}{t_p + C_A}}, \quad (2.87.)$$

kur t_p – aprēķina gaisa temperatūra, °C;

A, B, C_A – Antuāna konstantes.

Dažādu ķīmisko vielu Antuāna konstantes publicētas 7. pielikumā.

Spiediena viļņa I^+ impulsa lielumu (Pa · s) aprēķina pēc 2.88. formulas.

$$I^+ = 123 \frac{m_{np}^{0,66}}{r} \quad (2.88.)$$

Kā aprakstīts iepriekš, viens no veidiem, kā noteikt ietekmi uz cilvēkiem, materiālajiem resursiem un dabu, ir *probit* modeļa izmantošana, jo tā var vienlaikus noteikt un prognozēt ne tikai tehnogēnās vides zaudējumus, bet arī varbūtības. Izmantojot šo modeli, ir iespējams novērtēt ne tikai visdažādāko ietekmes veidu bīstamību, bet arī jebkuras ietekmes pakāpes bīstamību. Gadījumā, ja visas apskatītās ietekmes var uzskatīt par neatkarīgām un zaudējumu uzkrāšanās tās netiek ņemtas vērā, tad kopējo negatīvo faktoru ietekmes risku, piemēram, attiecībā uz pārspiedieņu, siltumstarojumu, toksisku vielu iedarbību un citu ietekmi, var noteikt, izmantojot 2.89. formulu.¹⁰⁷

$$R_{\text{iet}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{\text{iet}}^i), \quad (2.89.)$$

kur R_{iet}^i – ietekmes varbūtība no i -faktora iedarbības;

n – vērā ņemamo faktoru skaits.

4. piemērs

100 m³ etanola uzglabāšanas rezervuārs tika bojāts, rezultātā rezervuārā sienā radās caurums 25 mm diametrā un ķīmiskā viela izplūda apvaļņojuma laukumā.

Nepieciešams aprēķināt noplūdes ātrumu un apjomu, kā arī iespējamās kaitīgās sekas pelēks ugunsgrēkam.

Risinājums

Apjoma izplūdes ātrums (m³/s).

$$Q_l = \frac{\mu \times \pi d^2}{4 \times \sqrt{2gH_l}} = \frac{0,7 \times \pi \times 25^2 \times 10^{-6}}{4 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 17}} = 0,0063$$

106 Annex 1 Constants in the Antoine equation. (2008). *Industrial Safety Series*. Volume 8, p. 333–334.

107 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 72. lpp.

Masas izplūdes ātrums (kg/s).

$$G_l = Q_l \times \rho_l = 0,0063 \times 785 = 4,926$$

Maksimālais iztvaikošanas laiks līdz aizdegšanās avotam – 3600 s.

Izplūdušā šķidruma apjoms (m³).

$$G_l = Q_l \times \rho_l = 0,0063 \times 785 = 4,926$$

Maksimālais noplūdes laukums (m²).

$$F_p = f_p \times V_l = 20 \times 22,591 = 451,8$$

Noplūde tiek norobežota ar apvaļņojuma laukumu 185,22 m².

Izplūdušās vielas masa (kg).

$$m_l = V_l \times \rho_l = 22,591 \times 785 = 17734,3$$

Piesātināto tvaiku spiediens 36 °C temperatūrā (kPa).

$$P_t = 10^{\frac{A - \frac{B}{t_p + C_A}}{7,81158 - \frac{1918,508}{36 + 252,125}}} = 10^{\frac{7,81158 - \frac{1918,508}{36 + 252,125}}{7,81158 - \frac{1918,508}{36 + 252,125}}} = 14,223$$

Iztvaikošanas intensitāte no noplūdes laukuma (kg/s·m²).

$$W = 10^{-6} \times \eta \times \sqrt{M} \times P_{HN} = 10^{-6} \times 1 \times \sqrt{46,1} \times 14,223 = 9,657 \times 10^{-5}$$

Tvaiku masa (kg).

$$m_t = W \times F_t \times 3600 = 9,657 \times 10^{-5} \times 84,9 \times 3600 = 64,39$$

Peļķes ugunsgrēks

Siltumstarojuma aprēķins bezvējā

Tālāk tekstā sniegts siltumstarojuma aprēķins punktam, kas atrodas 7,4 m attālumā no noplūdes robežas.

Izliešanās laukums $F_L = 185,2$ m².

Efektīvais ugunsgrēka laukuma diametrs (m).

$$d = \sqrt{\frac{4 \times F_L}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 185,2}{\pi}} = 15,4$$

Parametrs u_* .

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \times g \times d}{\rho_L}}} = \frac{0}{\sqrt[3]{\frac{0,037 \times 9,81 \times 15,4}{1,597}}} = 0$$

Pie $u_* < 1$ tiek pieņemts, ka $\cos \theta = 1$; $\sin \theta = 0$.

Liesmas garums (m).

$$L = 42 \times d \times \left(\frac{m'}{\rho_a \times \sqrt{g \times d}} \right)^{0,61} = 42 \times 15,4 \times \left(\frac{0,037}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 15,4}} \right)^{0,61} = 17,2$$

Attālums no ģeometriskā ugunsgrēka centra līdz apstarojamajam objektam (m).

$$X = r + 0,5 \times d = 7,4 + 0,5 \times 15,4 = 15,1$$

Aprēķina lielumi.

$$a = \frac{2L}{d} = \frac{2 \times 17,2}{15,4} = 2,25; \quad b = \frac{2X}{d} = \frac{2 \times 15,1}{15,4} = 1,97$$

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1) \times \sin \theta} = \\ &= \sqrt{2,25^2 + (1,97+1)^2 - 2 \times 2,25 \times (1,97+1) \times 0} = 3,72 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1) \times \sin \theta} = \\ &= \sqrt{2,25^2 + (1,97-1)^2 - 2 \times 2,25 \times (1,97-1) \times 0} = 2,44 \end{aligned}$$

$$C = \sqrt{1 + (b^2 - 1) \times \cos^2 \theta} = \sqrt{1 + (1,97^2 - 1) \times 1^2} = 1,97$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} = \sqrt{\frac{1,97-1}{1,97+1}} = 0,57$$

$$E = \frac{a \times \cos \theta}{b - a \times \sin \theta} = \frac{2,25 \times 1}{1,97 - 2,25 \times 0} = 1,14$$

$$F = \sqrt{b^2 - 1} = \sqrt{1,97^2 - 1} = 1,69$$

Apstarojuma faktori pa vertikāli.

$$\begin{aligned} F_V &= \frac{1}{\pi} \left\{ \left(-E \arctan D \right) + E \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a \sin \theta)}{AB} \right] \arctan \frac{AD}{B} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cos \theta}{C} \left[\arctan \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \arctan \left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{\pi} \left\{ \left(-1,14 \arctan 0,57 \right) + 1,14 \left[\frac{2,25^2 + (1,97+1)^2 - 2 \times 1,97 \times (1+2,25 \times 0)}{3,72 \times 2,44} \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times \arctan \left(\frac{3,72 \times 0,57}{2,44} \right) + \frac{1}{1,97} \left[\arctan \left(\frac{2,25 \times 1,97 - 1,69^2 \times 0}{1,69 \times 1,97} \right) + \arctan \left(\frac{1,69^2 \times 0}{1,69 \times 1,97} \right) \right] \right\} = \\ &= 0,244 \end{aligned}$$

Apstarojuma faktori pa horizontāli.

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left\{ \arctan \frac{1}{D} + \frac{\sin \theta}{C} \left[\arctan \left(\frac{a \times b - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \arctan \left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right] - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+ab \sin \theta)}{AB} \right] \arctan \frac{AD}{B} \right\} =$$

$$= \frac{1}{\pi} \left\{ \arctan \frac{1}{0,57} + \frac{0}{1,97} \left[\arctan \left(\frac{2,25 \times 1,97 - 1,69^2 \times 0}{1,69 \times 1,97} \right) + \arctan \left(\frac{1,69^2 \times 0}{1,69 \times 1,97} \right) \right] - \left[\frac{2,25^2 + (1,97+1)^2 - 2(1,97+1+2,25 \times 1,97 \times 0)}{3,72 \times 2,44} \right] \times \arctan \left(\frac{3,72 \times 0,57}{2,44} \right) \right\} =$$

$$= 0,137$$

Apstarojuma koeficients.

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} = \sqrt{0,244^2 + 0,137^2} = 0,28$$

Atmosfēras caurlaidības koeficients.

$$\tau = \exp\left(-7 \times 10^{-4} \times (X - 0,5 \times d)\right) = \exp\left(-7 \times 10^{-4} \times (15,1 - 0,5 \times 15,4)\right) = 0,995$$

Vidējā liesmas siltumstarojuma laukuma apstarošanas intensitāte (kWh/m²).

$$E_f = \frac{0,4m'H_s}{\left(1 + 4\frac{L}{d}\right)} = \frac{0,4 \times 0,037 \times 30,56 \times 1000}{\left(1 + 4\frac{17,2}{15,4}\right)} = 82,4$$

Siltumstarojuma intensitāte (kWh/m²).

$$q = E_f F_q \tau = 82,4 \times 0,28 \times 0,995 = 22,93$$

Siltumstarojuma iedarbības izplatība sagaidāma gan peļķes, gan strūklas, gan tvaiku mākoņa ugunsgrēka gadījumā. Veicot siltumstarojuma iedarbības uz cilvēku izplatības novērtēšanu, izmantota *probit* funkcija, pēc kuras iedarbība uz cilvēku tiek noteikta, ņemot vērā ugunsgrēka radītā siltumstarojuma intensitāti un iedarbības ilgumu.

Cilvēka nosacītais bojāejas aprēķins bezvēja apstākļos

Tālāk tekstā sniegts aprēķins punktam, kas atrodas $r' = 151,5$ m attālumā no noplūdes malas.

Siltumstarojuma intensitāte ir 58,42 kWh/m².

Cilvēkiem drošs attālums (m) (drošam attālumam atbilst siltumstarojuma intensitāte 4 kWh/m²).

$$x = r_4 - r' = 810,6 - 151,5 = 659,1$$

Efektīvas ekspozīcijas laiks (s).

$$t = t_0 + \frac{x}{u} = 5 + \frac{659,1}{5} = 136,8$$

Probit funkcijas lielums.

$$Pr = -12,8 + 2,56 \times \ln(t \times q^{4/3}) = -12,8 + 2,56 \times \ln(136,8 \times 58,42^{4/3}) = 13,676$$

Nosacīta cilvēka bojāejas varbūtība 151,5 m attālumā.

$$Q_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{13,676-5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU = 1$$

Secinājums. Cilvēks, kas atradīsies minētajā punktā, ar 100 % varbūtību ies bojā peļķes siltumstarojuma iedarbības dēļ.

5. piemērs

9,1 m³ propāna uzglabāšanas rezervuārs tika bojāts, kā rezultātā rezervuāra sienā radās caurums 5 mm diametrā, pa kuru ķīmiskā viela izplūda apvaļņojuma laukumā.

Nepieciešams aprēķināt noplūdes ātrumu un apjomu, kā arī iespējamās kaitīgās peļķes ugunsgrēka sekas.

Risinājums

Propāna izlišana no uzglabāšanas tvertnes, kas saistīta ar vielas tūlītēju aizdegšanos un peļķes ugunsgrēku, var izraisīt vienā apvaļņojumā esošu tvertņu sasilšanu ar tai sekojošu BLEVE avāriju.

Masas izplūdes ātrums (kg/s).

$$\begin{aligned} G_1 &= \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{P_C M}{RT_C}} P_C \left(0,167 P_R^5 + 0,534 P_R^{1,95}\right) \times \frac{\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_V} P_R}}{1,22 T_R^{3/2}} = \\ &= 0,8 \times 1,963 \times 10^{-5} \times \sqrt{\frac{4,27 \times 10^6 \times 44,1 \times 10^{-3}}{8,31 \times 370}} \times 4,27 \times 10^6 \times \\ &\times \sqrt{0,167 \times 0,5^5 + 0,534 \times 0,5^{1,95}} \times \frac{\sqrt{\frac{499}{17,74}} \times 0,5}{1,22 \times 0,8^{3/2}} = 0,386 \end{aligned}$$

Apjoma izplūdes ātrums (m³/s).

$$Q_1 = \frac{G_1}{\rho_1} = \frac{0,386}{499} = 0,0008$$

Šķidruma apjoms rezervuārā (m³).

$$V_{la} = V_a \times 0,85 = 9 \times 0,85 = 7,7$$

Šķidruma masa rezervuārā (kg).

$$m_{la} = V_{la} \rho_l = 7,7 \times 499 = 3817,4$$

Gāzes noplūdes gadījumā daļa no produkta ātri iztvaiko, izveidojot aerosola mākonī. Šķidruma daļa, kas iztvaiko, ir

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_p(T_a - T_b)}{L_g}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{2851(36 - (-42))}{484490}\right) = 0,4.$$

Pārējais šķidrums veido noplūdi.

Maksimālais šķidruma izplūdes laiks (s).

$$t_i = \frac{7,7}{0,0008} = 9899$$

Iztvaikošanas laiks $t_i = 3600$ s.

Šķidruma apjoms pelņē (m^3).

$$V_l = (1 - \delta) Q_l t_i = (1 - 0,4) \times 0,0008 \times 3600 = 1,758$$

Maksimālais noplūdes laukums (m^2).

$$F_T = f_p \times V_l = 20 \times 1,758 = 35,2$$

Avārijas rezultātā radusies apjoma šķidruma masa (kg).

$$m_l = V_l \times \rho_l = 1,758 \times 499 = 877,3$$

Tvaika masa (kg), ja iztvaikošanas laiks 3600 s.

$$\begin{aligned} m_{tl} &= F_T \int_0^{3600} \frac{(\lambda_s C_s \rho_s)^{0,5} \times (T_0 - T_b)}{L_g (\pi t_i)^{0,5}} dt_i = \\ &= 35,2 \int_0^{3600} \frac{(1,5 \times 2000 \times 2000)^{0,5} \times (20 - (-42))}{484490 \times (\pi t_i)^{0,5}} dt_i = 706,9 \end{aligned}$$

Kopējā tvaika masa (kg).

$$m_t = \delta G_l t_i + m_{tl} = 0,4 \times 0,386 \times 3600 + 706,9 = 1217,9$$

Siltumstarojuma aprēķins bezvējā

Tālāk tekstā sniegts siltumstarojuma aprēķins punktam, kas atrodas 5,1 m attālumā no noplūdes robežas.

Ugunsgrēka laukums $F_U = 35,2$ m^2 .

Efektīvais ugunsgrēka laukuma diametrs (m).

$$d = \sqrt{\frac{4F_U}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 35,2}{\pi}} = 6,7$$

Parametrs u_* .

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m'gd}{\rho_t}}} = \frac{0}{\sqrt[3]{\frac{0,1 \times 9,81 \times 6,7}{17,74}}} = 0$$

Pie $u_* < 1$ tiek pieņemts, ka $\cos \theta = 1$; $\sin \theta = 0$.

Liesmas garums (m).

$$L = 42d \left(\frac{m'}{\rho_a \sqrt{gd}} \right)^{0,61} = 42 \times 6,7 \times \left(\frac{0,1}{1,14 \times \sqrt{9,81 \times 6,7}} \right)^{0,61} = 17,7$$

Attālums no ģeometriskā ugunsgrēka centra līdz apstarojamajam objektam (m).

$$X = r + 0,5d = 5,1 + 0,5 \times 6,7 = 8,5$$

Aprēķina lielumi.

$$a = \frac{2L}{d} = \frac{2 \times 17,7}{6,7} = 5,3$$

$$b = \frac{2X}{d} = \frac{2 \times 8,5}{6,7} = 2,53$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2a(b+1)\sin\theta} = \sqrt{5,3^2 + (2,53+1)^2 - 2 \times 5,3 \times (2,53+1) \times 0} = 6,37$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2a(b-1)\sin\theta} = \sqrt{5,3^2 + (2,53-1)^2 - 2 \times 5,3 \times (2,53-1) \times 0} = 5,52$$

$$C = \sqrt{1 + (b^2 - 1)\cos^2\theta} = \sqrt{1 + (2,53^2 - 1) \times 1^2} = 2,53$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} = \sqrt{\frac{2,53-1}{2,53+1}} = 0,66$$

$$E = \frac{a \cos \theta}{b - a \sin \theta} = \frac{5,3 \times 1}{2,53 - 5,3 \times 0} = 2,1$$

$$F = \sqrt{b^2 - 1} = \sqrt{2,53^2 - 1} = 2,32$$

Apstarojuma faktori pa vertikāli.

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left\{ -E \arctan D + E \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a\sin\theta)}{AB} \right] \times \arctan \left(\frac{AD}{B} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\cos\theta}{C} \left[\arctan \left(\frac{ab - F^2 \sin\theta}{FC} \right) + \arctan \left(\frac{F^2 \sin\theta}{FC} \right) \right] \right\} = \\ = \frac{1}{\pi} \left\{ -2,1 \arctan 0,66 + 2,1 \left[\frac{5,3^2 + (2,53+1)^2 - 2 \times 2,53 \times (1+5,3 \times 0)}{6,37 \times 5,52} \right] \times \right. \\ \left. \times \arctan \left(\frac{6,37 \times 0,66}{5,52} \right) + \frac{1}{2,53} \left[\arctan \left(\frac{5,3 \times 2,53 - 2,32^2 \times 0}{2,32 \times 2,53} \right) + \arctan \left(\frac{2,32^2 \times 0}{2,32 \times 2,53} \right) \right] \right\} = \\ = 0,195$$

Apstarojuma faktori pa horizontāli

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left\{ \arctan \frac{1}{D} + \frac{\sin \theta}{C} \left[\arctan \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC} \right) + \arctan \left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right] - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1+ab \sin \theta)}{AB} \right] \times \arctan \frac{AD}{B} \right\} =$$

$$= \frac{1}{\pi} \left\{ \arctan \frac{1}{0,66} + \frac{0}{2,53} \left[\arctan \left(\frac{5,3 \times 2,53 - 2,32^2 \times 0}{2,32 \times 2,53} \right) + \arctan \left(\frac{2,32^2 \times 0}{2,32 \times 2,53} \right) \right] - \left[\frac{5,3^2 + (2,53+1)^2 - 2 \times (2,53+1+5,3 \times 2,53 \times 0)}{6,37 \times 5,52} \right] \times \arctan \left(\frac{6,37 \times 0,66}{5,52} \right) \right\} = 0,118$$

Apstarojuma koeficients.

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} = \sqrt{0,195^2 + 0,118^2} = 0,228$$

Atmosfēras caurlaidības koeficients.

$$\tau = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (X - 0,5d)) = \exp(-7 \times 10^{-4} \times (8,5 - 0,5 \times 6,7)) = 0,996$$

Siltumstarojuma intensitāte (kWh/m²).

$$q = E_f F_q \tau = 80 \times 0,228 \times 0,996 = 18,19$$

Cilvēka nosacītais bojāejas aprēķins bezvēja apstākļos

Tālāk tekstā sniegts aprēķins punktam, kas atrodas $r' = 5,1$ m attālumā no noplūdes malas.

Siltumstarojuma intensitāte – 18,19 kWh/m².

Drošs attālums (m) cilvēkiem (drošam attālumam atbilst siltumstarojuma intensitāte 4 kWh/m²).

$$x = r_4 - r' = 23,1 - 5,1 = 18$$

Efektīvas ekspozīcijas laiks (s).

$$t = t_0 + \frac{x}{u} = 5 + \frac{18}{5} = 8,6$$

Probit funkcijas lielums.

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(tq^{4/3}) = -12,8 + 2,56 \ln(8,6 \times 18,19^{4/3}) = 2,609$$

Nosacīta cilvēka bojāejas varbūtība noteiktajā attālumā.

$$Q_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{2,609-5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU = 0,008359$$

Secinājums. Cilvēks, kas atradies minētajā punktā, ar 0 % varbūtību ies bojā siltumstarojuma dēļ.

6. piemērs.

Ugunsgrēka rezultātā $9,1 \text{ m}^3$ tvertne ar propānu zaudē hermētiskumu, un notiek visas tvertnes sabrukums ar pārsildītu propānu. Nepieciešams aprēķināt ugunsloides ugunsgrēka sekas un tā iedarbību uz cilvēku.

Risinājums.

Produkta masa, kas nonākusi atmosfērā (kg).

$$m = V \rho_L = 9 \times 0,85 \times 499 = 3817,4$$

Ugunsloides efektīvais diametrs (m).

$$D_s = 6,48 m^{0,325} = 6,48 \times 3817,4^{0,325} = 94,5$$

Ugunsloides eksistēšanas laiks (s).

$$t_s = 0,852 m^{0,26} = 0,852 \times 3817,4^{0,26} = 7,3$$

Tālāk tekstā sniegts siltumstarojuma aprēķins punktam, kas atrodas $72,1 \text{ m}$ attālumā no noplūdes robežas.

Siltumstarojuma intensitāte – 350 kWh/m^2 .

Apstarojuma virziena koeficients.

$$F_q = \frac{D_s^2}{4(H^2 + r^2)} = \frac{94,5^2}{4(94,5^2 + 154,6^2)} = 0,068$$

Atmosfēras caurlaidības koeficients.

$$\begin{aligned} \tau &= \exp \left[-7 \times 10^{-4} \times \left(\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right] = \\ &= \exp \left[-7 \times 10^{-4} \times \left(\sqrt{154,6^2 + 94,5^2} - \frac{94,5}{2} \right) \right] = 0,91 \end{aligned}$$

Siltumstarojuma intensitāte (kWh/m^2).

$$q = E_f F_q \tau = 350 \times 0,068 \times 0,91 = 21,68$$

Cilvēka nosacītais bojāejas aprēķins bezvēja apstākļos

Tālāk tekstā sniegts aprēķins punktam, kas atrodas $r' = 154,6 \text{ m}$ attālumā no noplūdes centra.

Siltumstarojuma intensitāte – $21,68 \text{ kWh/m}^2$.

Ugunsloides eksistēšanas laiks (s).

$$t = 0,92 \times m^{0,303} = 0,92 \times 3817,4^{0,303} = 11,2$$

Probit funkcijas lielums.

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(t^{4/3}) = -12,8 + 2,56 \times \ln(11,2 \times 21,68^{4/3}) = 3,885$$

Nosacīta cilvēka bojāejas varbūtība.

$$Q_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{3,885-5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU = 0,132022$$

Secinājums. Cilvēks, kas atradies minētajā punktā, ar 0 % varbūtību ies bojā siltumstarojuma dēļ.

3. Tehnogēnā riska novērtēšanas metodes

Pēdējo simt gadu laikā ir panākts ievērojams progress drošības zinātnes jomā. Saistībā ar sociotehnisko sistēmu teorijas attīstību un cilvēka kļūdas identificēšanas faktoriem ir izstrādātas metodes, kas palīdz paredzēt iespējamās bīstamās faktorus. Papildus minētajai teorijai un metodei ir izveidotas arī citas apdraudējumu novērtēšanas metodes. Zinātnieki M. Džardina (*M. Giardina*) un M. Morale (*M. Morale*) uzskata, ka bīstamības apzināšanai rūpniecības nozarē ir izveidotas daudzas metodes, tomēr nav iespējams identificēt pilnīgi visus iespējamās drošības sistēmas apdraudējumus.¹⁰⁸ Pastāvīgi attīstoties tehnoloģijām, darba pienākumiem un sabiedrības vērtībām, ir jāmainās arī drošības teorijām un metodikai, ņemot vērā esošās zināšanas un atbildīgi novērtējot mainīgos procesus. Ja neeksistē strukturēta apdraudējumu identifikācijas sistēma, bīstamību var neņemt vērā, jo tādā gadījumā riska un iespējamo zaudējumu novērtējums būs nepilnīgs. SEVESO III direktīvas 3. pielikumā uzsvērts, cik svarīgi ir pieņemt un ieviest procedūras, lai sistemātiski identificētu galvenos iespējamās apdraudējumus standarta un ārkārtējas darbības rezultātā un lai novērtētu to iespējamību un smaguma pakāpi.¹⁰⁹ Ir svarīgi identificēt un apskatīt pasaulē visbiežāk izmantotās bīstamības novērtējuma metodes, to atšķirības un priekšrocības, jo bīstama situācija var iestāties dažādu notikumu rezultātā, kuru identificēšanai tiek izmantotas vairākas efektīvas metodes.

3.1. vienādojums atspoguļo tehnogēnās sistēmas, kas ietver secīgi savienotus elementus R_i , drošību R_s un veido šo elementu drošības summu.¹¹⁰

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.1.)$$

Jebkuras sistēmas bīstamības novērtēšanai jāizskata vairāki iespējamie notikumu scenāriji, kas var būt saistīti ar daudziem elementiem un sastāvdaļām, iespējamajiem darbības atteices iemesliem, lai sekmētu iesaistīto personu izpratni par sistēmas apdraudējumiem, pastāvošiem riskiem un iespējamām sekām. Rezultātā ir iespējams laikus identificēt sistēmas vājās vietas, pieņemt atbilstošus lēmumus, noteikt veicamos pasākumus un novērst trūkumus. Šeit par pamatu var izmantot spēļu teoriju un operāciju pētīšanu. Lai apdraudējuma identificēšanas laikā varētu pieņemt adekvātu lēmumu, ir jāņem vērā zinātniskie, sociālie, ekonomiskie un kultūras aspekti, pama-

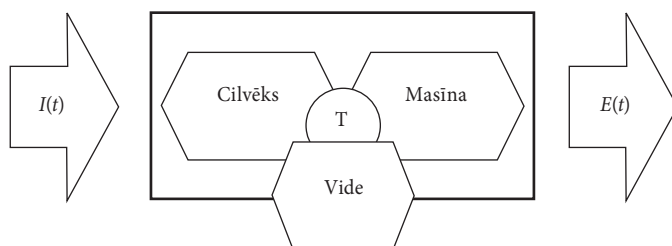
108 Giardina, M., Morale, M. (2015). Safety study of an LNG regasification plant using an FMECA and HAZOP integrated methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 35, pp. 35–45.

109 Directive 2003/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2003 Amending Council Directive (2003). 96/82/EC on the Control of Major-accident Hazards involving Hazardous Materials. *Official Journal of the European Union*, L 345/97. Brussels, 31.12.2003. p. 1.

110 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 73. lpp.

tojoties uz riska varbūtību. Apdraudējumu novērtēšanas metodes pastāvīgi mainās – tiek pieņemtas jaunas riska novērtēšanas metodes un precizētas un papildinātas esošās.

Vispiemērotākais modelis tehnogēno risku novērtēšanai redzams 3.1. attēlā. Tas attiecas uz tehnoloģisko aprikojumu “Mašīna”, to ekspluatējošo personālu “Cilvēks” un “Vide”. Visi komponenti savstarpēji saistīti vienas tehnoloģijas ietvaros – t . Šajā modelī ietverti vektora apzīmējumi: I – ieejas dati (resursi, darba apstākļi), kas ietekmē sistēmu S – sistēmas stāvokli (drošs, avārijas u. c.), un E – izejas dati (pozitīva vai negatīva ietekme uz vidi).



3.1. att. Tehnogēnā riska novērtēšanas modelis.¹¹¹

Riska novērtēšanas mērķis ir rekomendāciju izstrādes, lai paaugstinātu drošību (risku vadība), kas balstīta riska novērtējuma rezultātos. Gandrīz visu Eiropas valstu normatīvajos aktos ir noteikts RRO veikt riska analīzi, taču tajos nav prasīts stingri izmantot kādu konkrētu metodiku, tāpēc uzņēmēji var izmantot savas valsts normatīvajos aktos noteiktās prasības. Zinātnieki T. Eivens (*T. Aven*) un E. Zjo (*E. Zio*) uzskata, ka riska novērtēšanas un vadības jomā trūkst precīzi definētu un vispārēji saprotamu terminu. Piemēram, ja vairākus riska analītiķus lūgtu izskaidrot, kas ir risks, tiktu saņemtas daudzas un dažādas atbildes, un dažas no tām būtu uztveres kļūdas, kas var nopietni maldināt lēmumu pieņēmējus.¹¹² Pēc zinātnieka L. E. Koksa (*L. A. Cox*) domām nav apstiprinātu un uzticamu riska modeļu, kas nodrošina nākotnes notikumu un to seku iestāšanās iespējamību; iepriekšējo datu nozīme nākotnes rezultātu prognozēšanā ir šaubīga, un bieži vien, izvērtējot riskus, eksperti cits citam nepiekrīt vai nespēj vienoties, kas apliecina neskaidrību un informācijas trūkumu. Tā rezultātā politikas veidotāji nespēj pateikt, kādas darbības jāveic, lai mazinātu riskus un palielinātu ieguvumus.¹¹³ Secināms, ka arī Latvijā ir nepieciešama vienota risku noteikšanas metodika, kurā būtu ietverti daudzi savstarpēji ietekmējoši elementi, kam raksturīgs nelineārs uzvedības algoritms un atgriezeniskās saites mezgli. Tāpēc ir svarīgi apskatīt mūsdienu populārākās riska novērtēšanas metodes,

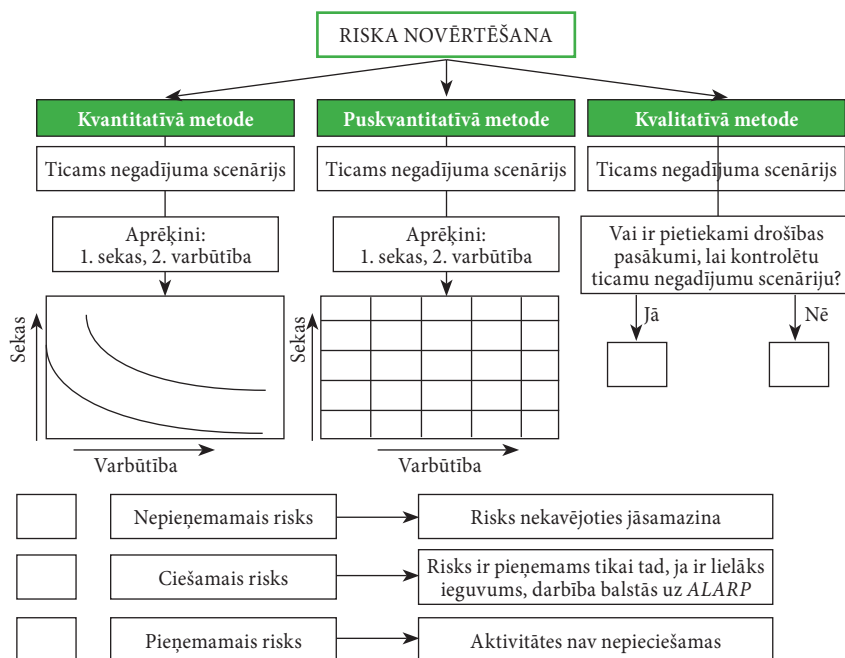
111 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 73. lpp.

112 Aven, T., Zio, E. (2014). Foundational issues in risk assessment and risk management. *Risky analysis*. Vol. 34 (7), pp. 1164–1172.

113 Cox, L. A. (2012). Confronting deep uncertainties in risk analysis. *Risk Analysis* Vol. 32 (10), pp. 1607–1629.

nosakot to darbības lauku, priekšrocības un trūkumus.

Riska analīze ir plaši pazīstama riska novērtēšanas metodika, kas saistīta ar jebkādu rūpniecisko darbību.¹¹⁴ Kā “Sistēmu drošības teorijā” norāda zinātnieki M. Rausands (*M. Rausand*) un E. Heilands (*A. Høyland*), riskus var novērtēt divos veidos: kvalitatīvi vai/un kvantitatīvi. Zinātnieki M. Džubinskis (*M. Dziubinski*), M. Fračka (*M. Fratzaka*) un A. S. Markovskis (*A. S. Markowski*) definē trīs galvenos riska novērtēšanas veidus, kur papildus diviem iepriekš minētajiem veidiem tiek noteikts arī puskvantitatīvais veids. Šo zinātnieku izstrādāto riska novērtēšanas modeļu veidi redzami 3.2. attēlā.



3.2. att. Kopējais riska novērtēšanas modeļu sadalījums.¹¹⁵

Puskvantitatīvās metodes tiek izmantotas, lai identificētu apdraudējumu un izvēlētos tā dēvētos ticamos atteices gadījumus vai negadījumus. Kvalitatīvās metodes tiek izmantotas, lai ar normatīvajos aktos un standartos noteiktajām metodēm pārbaudītu drošības līmeņa atbilstību. Šīs metodes parasti attiecas uz atsevišķām ierīcēm, un tās ir minimālās prasības, kas jāievēro, lai sasniegtu pieņemamu drošības

114 Bubbico, R. (2018). A statistical analysis of causes and consequences of the release of hazardous materials from pipelines. *The influence of layout. Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 56, pp. 458–462.

115 Dziubinski, M., Fratzaka, M., Markowski, A. S. (2006). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 19, pp. 399–408.

līmeni.¹¹⁶

Austrālijas zinātnieki K. Delata (C. Dallat), P. M. Salmons (P. M. Salmon) un N. Gūda (N. Goode) 2016. gadā apkopoja literatūras avotos sniegto informāciju par populārākajām riska novērtējuma metodēm pasaulē, to trūkumiem un priekšrocībām un definēja septiņas riska novērtēšanas pamatmetodes.

1. Kvalitatīvās un ekspertu vērtēšanas metodes.
2. Bīstamības un darbības (angļu val. – *Hazard and Operability Studies; HAZOP*) metodes.
3. Atteices režīma un efekta analīzes metodes.
4. Koka analīzes metodes.
5. Cilvēka drošuma analīzes (angļu val. – *Human Reliability Analysis; HRA*) un cilvēka kļūdas identifikācijas (angļu val. – *Human Error Identification; HEI*) metodes.
6. Kvantitatīvās riska novērtēšanas metodes.
7. Sistēmu analīzes metodes.¹¹⁷

Pirmo sešu metožu pamatā ir drošības teorija, septītās metodes pamatā – sistēmu un vadības teorija. Šajā nodaļā monogrāfijas autori analizē šīs riska novērtēšanas pamatmetodes.

Kvalitatīvās metodes tiek izmantotas, lai novērtētu riskus, ja trūkst ticamu un precīzu datu.¹¹⁸ Kvantitatīvā riska novērtējuma metodes tiek izmantotas tad, ja ir pietiekami daudz datu vai datus var iegūt, simulējot procesu.¹¹⁹ Riska novērtējumā bieži tiek izmantotas daļēji kvantitatīvās metodes, kas piemērotas datiem ar kvantitatīvām un kvalitatīvām īpašībām.¹²⁰

Veicot drošības analīzi, galvenais ir noteikt, kādi organizētas sistēmas elementi vai sastāvdaļas kritiskajā momentā var izraisīt drošības sistēmas bojājumus un kā nepieļaut šīs sistēmas apdraudējumu. T. Eivens uzskata, ka mūsdienās analītiķu un riska pārvaldes speciālistu galvenā neskaidrība ir tā, kā novērst negaidītas potenciālās avārijas un to sekas sarežģītās sistēmās, piemēram, energosistēmās un finanšu

116 Dziubinski, M., Fratzcka, M., Markowski, A. S. (2006). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 19, pp. 399–408.

117 Dallat, C., Salmon, P. M., Goode, N. (2019). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. Vol. 119, pp. 266–279.

118 Fletcher, W. J. (2005). The application of qualitative risk assessment methodology to prioritize issues for fisheries management. *ICES Journal of Marine Science*. Vol. 62 (8), pp. 1576–1587.

119 Naderpour, M., Lu, J., Zhang, G. (2014). A situation risk awareness approach for process systems safety, *Safety Science* Vol. 64 (3), pp. 173–189.

120 Garvey, P. R., Lansdowne, Z. F. (1998). Risk matrix: an approach for identifying, assessing, and ranking program risks. *Air Force journal of logistics* Vol. 22 (1), pp. 18–21.

sistēmās.¹²¹ Lielākajā daļā drošības sistēmu analīzes paņēmieni pamatā ir neformāla argumentācijas metodika, kas ir lielā mērā atkarīga no drošības inženiera prasmēm un zināšanām.¹²² Galvenais risku pārvaldības uzdevums ir apzināt visus iespējamās agrīnos negadījuma iemeslus, ņemt tos vērā un nepārspīlēt to nozīmību. Labu iespējamo risku pārvaldības sistēmu raksturo tādas preventīvas sistēmas sastāvdaļas kā rezultātu un signālu novērošana, prognozējamo risku novērtējums, varbūtība un smaguma pakāpe.

3.1. Kvalitatīvās un ekspertu vērtēšanas metodes

Kvalitatīvās riska novērtēšanas metodes ir: intervijas; novērošanas pētījumi; kontroles raksti; aptaujas; varbūtības analīze; *Delphi* metode; scenāriju analīze.¹²³ Kvalitatīvās riska vērtēšanas metodes ietver sistemātisku sarunās vai novērojumos iegūta tekstuālā materiāla vākšanu, apkopošanu un interpretēšanu. Zinātniece K. Laumane (*K. Laumann*) norāda, ka ir grūti aprakstīt visas kvalitatīvās riska pētījumu metodes, jo ir daudz dažādu metožu un tām ir ļoti dažādi mērķi. Parasti visus pētījumus, kas nav kvantitatīvi, dēvē par kvalitatīviem pētījumiem.¹²⁴ Kvalitatīvās izpētes raksturīgākās pazīmes ir šādas:

- 1) teksta datu analīze (piemēram, intervijas, novērojumu piezīmes un dokumenti),¹²⁵
- 2) dati parasti tiek vākti ikdienas režīmā nevis eksperimenta veidā,¹²⁶
- 3) saistība ar pētniecības procesa dalībnieka izpratni, fiksējot viņa redzējumu;¹²⁷
- 4) datu apraksts un datu interpretācija;¹²⁸

121 Bjerga, T., Aven, T., Zio, E. (2016). Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety* Vol. 156, pp. 203–209.

122 Ortmeier, F., Reif W., Schellhorn, G. (2005). Deductive cause-consequence analysis (dcca). *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 38, Issue 1, pp. 62–67.

123 Dallat, C., Salmon, P. M., Goode, N. (2019). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. Vol. 119, pp. 266–279.

124 Laumann, K. (2020). Criteria for Qualitative Methods in Human Reliability Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 194, p. 5.

125 Anastas, J. W. (2004). Quality in qualitative evaluation: Issues and possible answers. *Research on Social Work Practice*. Vol. 14, pp. 57–65.

126 Jeanfreau, S. G., Leonard, Jr. J. (2010). Appraising qualitative research in health education: Guidelines for public health educators. *Health Promotion Practice*. Vol. 11, pp. 612–617.

127 Elliott, R., Fischer C. T., Rennie, D. L. (1999). Evolving guidelines for publication of qualitative research studies in psychology and related fields. *British Journal of Clinical Psychology*. Vol. 38, pp. 215–229.

128 Brantlinger, E., Jimenez, R., Klingner, J., Pugach, M., Richardson, V. (2005). *Qualitative studies in special education*. *Exceptional Children*. Vol. 71, pp. 195–207.

5) svarīgs konteksts, kādā dati tiek iegūti.¹²⁹

Atbilstoši kontrollsarakstam veiktā analizē tiek izmantoti iepriekš noteikti kritēriji, lai novērtētu ar organizāciju, sistēmu, darbību, uzturēšanu vai citu drošības vadības jomu saistītus riskus.¹³⁰ Šīs metodes priekšrocība ir tā, ka, aizpildot vairākus sarakstus, var pārbaudīt un atbildēt uz saistītajiem jautājumiem un pārliecināties, ka ir identificēti visi iespējamie ar rūpnieciskiem procesiem saistītie riski. Anketēšanu riska novērtēšanai bieži vien lieto kopā ar citām kvalitatīvām riska novērtēšanas metodēm, piemēram, intervijām un novērojumu.¹³¹ “Kas notiktu, ja...” analīze ir viena no senākajām bīstamības identifikācijas metodēm, un tās ietvaros komanda uzdod vēl citus jautājumus, kas sākas ar frāzi “Ko darīt, ja...” (piemēram, “Ko darīt, ja plīst caurule?”, “Kas notiktu, ja vārsts nenostādātu?”), lai identificētu iespējamās apdraudējumus un neradītu zaudējumus tehnoloģiskā uzdevuma izpildē iesaistītajiem.

Delphi aptaujas metode ietver strukturētu, anonīmu, daudzkārtēju izjautāšanu rakstveidā, meklējot ekspertu viedokli par konkrēto tēmu.¹³² Parasti *Delphi* aptauja turpinās līdz domstarpību atrisināšanai vai līdz brīdim, kad visi pētījumā iesaistītie eksperti vienojas par visiem identificētajiem riskiem. Zinātnieki E. Atālahi (*E. Atallah*) un S. R. Šadizadē (*S. R. Shadizadeh*) izmantoja šo metodi savā pētījumā, lai novērtētu iespējamā kaitējuma seku apmēru un riskus saistībā ar naftas urbšanas iekārtām nekontrolētas dabas gāzes noplūdes gadījumā. Kvalitatīvās ekspertu metodes tiek lietotas bieži, un tās ir piemērojamas vairākās jomās, piemēram, veselības aprūpes, arodveselības, drošības jomā ieguves rūpniecībā.¹³³

Šīs metodes priekšrocības ir sistemātiskā pieeja, pieejamība un lietošanas vienkāršība. Kvalitatīvās metodes trūkums ir tas, ka respondenti var apzināti neatklāt tos faktorus, ko vēlas noslēpt – konkrētais konteksts, uzdevums vai darbinieks. Rezultātā šī metode ne vienmēr ļauj apjaust mijiedarbību starp slēptiem faktoriem, kas ir galvenais princips ārpus sistēmas domāšanas saistībā ar negadījumu cēloņsakarību.¹³⁴ Analizējamās informācijas rezultātus mēdz izteikt kā augstu, vidēju vai zemu risku;

129 Meyrick, J. (2006). What is good qualitative research? A first step towards a comprehensive approach to judging rigour/quality. *Journal of Health Psychology*. Vol. 11, pp. 799–808.

130 Marhaviļas, P. K., Koulouriotis, D., Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: on a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 24 (5), pp. 477–523.

131 Graves, R. J., Way, K. R., Riley, D., Lawton, C., Morris, L. (2004). Development of risk filter and risk assessment worksheets for HSE guidance – ‘Upper Limb Disorders in the Workplace’ 2002. *Appl. Ergonomics*. Vol. 35 (5), pp. 475–484.

132 Markmann, C., Darkow, I. L., Gracht, H. (2013). A Delphi-based risk analysis – identifying and assessing future challenges for supply chain security in a multi-stakeholder environment. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 80 (9), pp. 1815–1833.

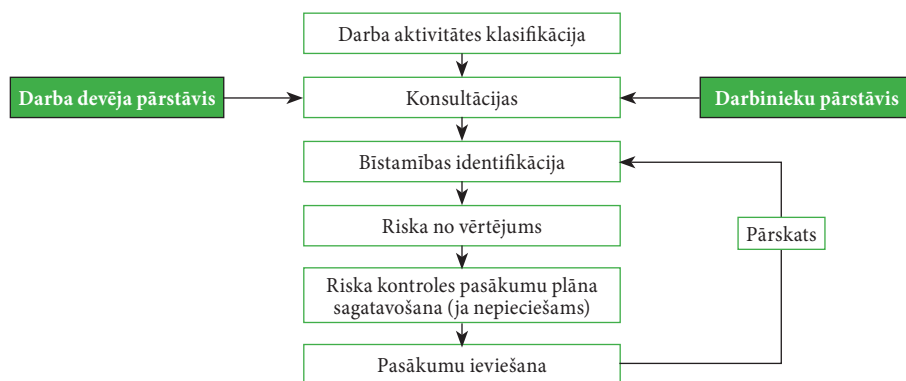
133 Dallat, C., Salmon, P. M., Goode, N. (2019). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. Vol. 119, pp. 266–279.

134 Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*. Vol. 27 (2–3), pp. 183–213.

šo informāciju ir grūti interpretēt, tāpēc to ir grūti atspoguļot kā viennozīmīgu. Rezultātā drošības sistēmas stāvoklis tiek novērtēts atkarībā no respondentu izpratnes par uzdevumu un pētnieka prasmes interpretēt rezultātus, neizmantojot varbūtības.

Šīs metodes trūkums ir arī tas, ka nevar atrast kompromisu starp risku un pozitīvo tehnoloģijas izmantošanas nosacījumu un veikt analīzi, lai pieņemtu optimālu lēmumu. Klasiskās riska novērtēšanas problēma ir saistīta ar to, ka riska rādītāju novērtējumam ir nepieciešami vairāki eksperti, bet ekspertu viedokļi var stipri atšķirties atkarībā no eksperta subjektīvās attieksmes pret novērtējamo objektu, tādējādi novērtējums kopumā ietver subjektīvu vairāku cilvēku vidējo vienoto viedokli. Zinātnieki B. Jeng (B. Jeong), B. S. Lī (B. S. Lee), P. Zo (P. Zhou) un S. Ha (S. Ha) konstatējuši, ka, izmantojot kvalitatīvo riska novērtējumu, var tikt pārvērtēta negatīvo notikumu skaitliskā varbūtība un nepilnīgi novērtētas notikuma sekas. Savukārt, izmantojot kvantitatīvo novērtējumu, kura pamatā ir kvalitatīvs novērtējums, nepilnīgi tiek noteikta izcelšanās skaitliskā varbūtība un iespējamās sekas.¹³⁵

Malaizijas zinātnieki A. M. Sedi (A. M. Saedi), Dž. Dž. Tambiradža (J. J. Thambirajah), A. Pariatambijs (A. Pariatamby) 2014. gadā savā kvalitatīvajā pētījumā izmantoja intervijas metodi, lai noteiktu pastāvošos bīstamības avotus, novērtētu riskus, noteiktu kontroles pasākumu lietderību, un, ņemot vērā apkopotos datus, izveidotu komplekso elektroenerģijas ražošanas modeli HIRARC Kameronas Hailendas elektrostacijā Malaizijā. Sistēmas funkcionēšanas un novērtējuma posmi redzami 3.3. attēlā.



3.3. att. HIRARC sistēmas funkcionēšanas un novērtējuma procesa posmi.¹³⁶

Kvalitatīvā pētījuma laikā tika konstatēts, ka nopietnas avārijas hidroelektrostacijās notiek ļoti reti. Tas skaidrojams ar savlaicīgi veiktiem preventīvajiem pasāku-

¹³⁵ Jeong, B., Lee, B. S., Zhou, P., Ha, S. (2018). Quantitative risk assessment of medium-sized floating regasification units using system hierarchical modelling. *Ocean Engineering*. Vol. 151, pp. 390–408.

¹³⁶ *Guidelines for hazard identification, risk assessment and risk control (HIRARC)*. (2008). Ministry of Human Resources Malaysia. Department of Occupational Safety and Health Ministry of Human Resources Malaysia, pp. 7–18.

miem, taču, notiekot avārijai, sekas parasti ir katastrofālas un saistītas ar lieliem ekonomiskiem, sociāliem un vides zaudējumiem. Lai uzturētu atbilstošu drošības līmeni hidroelektrostacijā vai citā paaugstinātas bīstamības objektā, obligāti nepieciešama drošības pārvaldības sistēma, kas saistīta ar vadības politiku, kuras pamatā ir riska elementu drošības novērtējums, lai identificētu riskus,¹³⁷ kas potenciāli var nopietni apdraudēt iekārtu ekspluatāciju un apkopi. Iepriekš tekstā minētie zinātnieki identificēja šādus bīstamības avotus hidroelektrostacijā, un tie ir: neparedzēta bīstama enerģijas jaudas atbrīvošana; viegli uzliesmojoša un sprādzienbīstama darba vide; ar eļļu pildīti transformatori; nepietiekams skābekļa līmenis; gaisa piesārņojums (toksiskas ķīmiskas vielas, materiāli, toksiskas gāzes); ķīmiskā reakcija, kas izraisa skābekļa trūkumu; kā arī elektrības kabeļi, sadales iekārtas, slēdži, dzesēšanas sistēma un uzliesmojošas hidrauliskās eļļas. Bīstamība ir saistīta arī ar citiem aspektiem, piemēram, siltuma radītas traumas iespējamība (apdegums), slikta redzamība, pārāk augsts trokšņa līmenis, fiziskās barjeras vai pārvietošanās ierobežojumi (ergonomika), elektriskā trieciena risks, noplūdes un ar aprīkojumu saistīti mehāniski apdraudējumi. Šī pētījuma gaitā konstatēts 41 būtisks apdraudējums un identificētas darbības, kas novērtētas, izmantojot kontrolsarakstu analīzes tehniku. Ņemot vērā identificētos parametrus, izmantojot riska novērtējuma metodiku, rezultāti tika iedalīti trīs līmeņos ar trim riska pakāpēm.

3.2. Bīstamības un darbības metode

Bīstamības un darbības (angļu val. – *Hazard and Operability Studies*; HAZOP) metode radās 20. gadsimta 60. gados un kļuva ļoti populāra pēc *Flixborough* ķīmijas rūpnīcas katastrofas 1974. gadā.¹³⁸ Kopš tā laika RRO vadība, zinātnieki un organizācijas visā pasaulē plaši izmanto šo metodi ķīmijas un kodolenerģētikas nozarē, un laika gaitā ir radušies daudzi atvasinātie rīki.¹³⁹ HAZOP metode tiek izmantota jau vairāk nekā 40 gadu, un tā ir plaši atzīta pasaulē, iekļauta dažādos standartos un aptver arī citas nozares (farmāciju, mašīnbūvi, elektrisko inženieriju). Parasti HAZOP analīze tiek izmantota, lai identificētu iespējamo negatīvo notikumu cēloņus un sekas jeb novirzes. Izmantojot HAZOP analīzes rezultātus, bīstamības scenārija modeļiem ir iespējams atspoguļot negatīvo notikumu scenārijus.

Šāda veida analīzi parasti veic daudzdisciplināra komanda – eksperti ideju apmaiņas procesā.

Galvenie HAZOP mērķi:

- noteikt un novērtēt apdraudējumus plānotā procesā vai darbībā;
- identificēt nozīmīgas problēmas ar darbību vai kvalitāti;

137 Saeedi, A. M., Thambirajah, J. J., Pariatamby, A. (2014). A HIRARC model for safety and risk evaluation at a hydroelectric power generation plant. *Safety Science*. Vol. 70, pp. 308–315.

138 Groso, A., Ouedraogo, A., Meyer, T. (2012). Risk analysis in research environment. *J. Risk Researches*. Vol. 15 (2), pp. 187–208.

139 Swann, C. D., Preston, M. L. (1995). Twenty-five years of HAZOPs. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 8 (6), pp. 349–353.

- identificēt praktiskas ar ekspluatāciju saistītas problēmas.¹⁴⁰

HAZOP un tās atvasinājumus, piemēram, *HE-HAZOP*,¹⁴¹ *SCHAZOP*¹⁴² lieto analītiķi, izmantojot vadlīnijas katram uzdevumam vai procesa posma potenciālo risku novērtēšanai. Izmantojot atlases vārdus, piemēram, vairāk, mazāk u. c., tiek identificētas iespējamās kļūdas.

HAZOP metodei ir vairāki analīzes tehnikas veidi. *OptAzop*¹⁴³ tehnika paplašina sākotnējo HAZOP metodi, un tā tika izveidota, lai mazinātu HAZOP metodes nepilnības (piemēram, to, ka HAZOP metode ir laikietilpīga).¹⁴⁴ Vēl viens HAZOP tehnikas veids ir drošības kultūras ekspluatācijas izmantojamības (*SCHAZOP*) metode.¹⁴⁵ To izmanto, lai identificētu konkrētus apdraudējumus un izveidotu sistemātisku risinājumu šiem apdraudējumiem. HAZOP metodes izmanto arī kā jaukto metožu daļu,¹⁴⁶ novērtējot arī cilvēka kļūdas risku ārkārtas situācijās. Šīs metodes priekšrocības ir sistemātiskums un struktūra.¹⁴⁷

HAZOP process ietver četrus pamatposmus – definēšanas, sagatavošanas, pārbaudes un dokumentācijas pēcpārbaudes.¹⁴⁸ Ir jāizmanto noteiktie parametri un atslēgvārdi, piemēram, nē, vairāk, mazāk, kopā ar tehnoloģiskā procesa parametru novērtējumu, lai atklātu iespējamās ekspluatācijas novirzes no plānotā darba režīma. Izvērtējot novirzes, ekspertu grupa izskata iespējamās cēloņus un to iespējamās sekas. Daudznozaru ekspertiem būtu jāizvērtē, vai uzņēmumā veiktie drošības pasākumi ir pietiekami, un, ja tie nav pietiekami, nepieciešamības gadījumā jāierosina papildu drošības pasākumi. HAZOP izpētes metodes shēma redzama 3.4. attēlā, un tā ietver piecus galvenos posmus, kas aprakstīti turpmākajā tekstā.

140 Macdonald, D. (2004). *Practical Hazops, Trips and Alarms*. 1st Edition Published Date: 16th July 2004. p. 98.

141 Kirwan, B. (1992). Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches. *Applied Ergonomics* Vol. 23 (5), pp. 299–318.

142 Kirwan, B. (1998). Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems – Part 1: Review and evaluation of techniques. *Applied Ergonomics*. Vol. 29 (3), pp. 157–177.

143 Khan, F. I., Abbasi, S. A. (1998). *Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 11 (4), pp. 261–277.

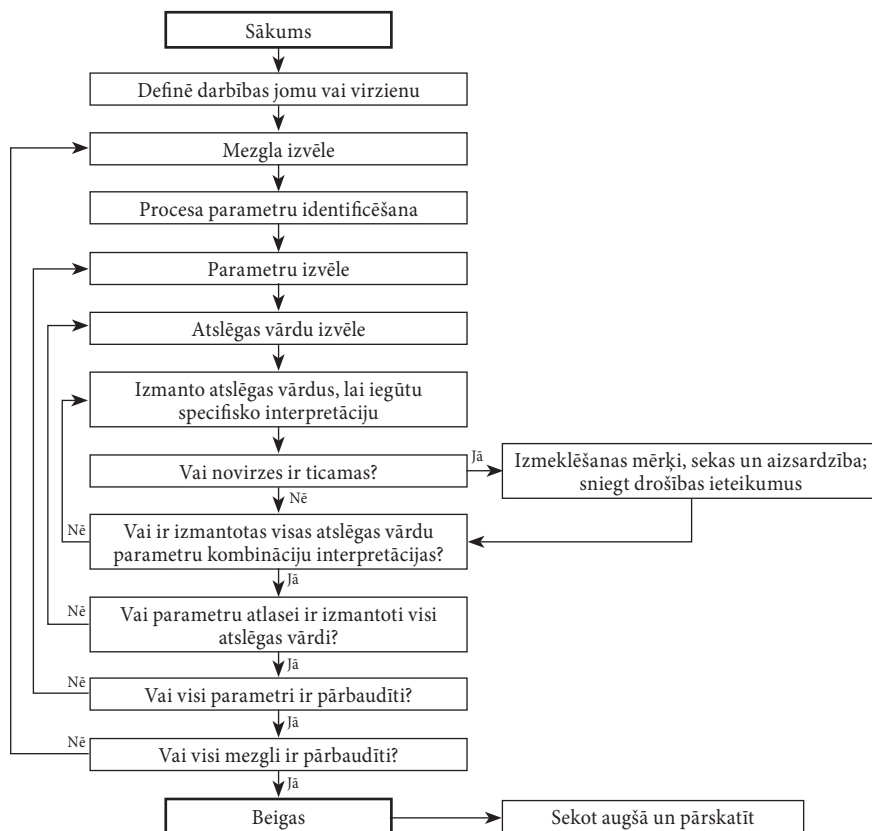
144 Groso, A., Ouedraogo, A., Meyer, T. (2012). Risk analysis in research environment. *Journal of Risk Research*. Vol. 15 (2), pp. 187–208.

145 Kennedy, R., Kirwan, B., (1998). Development of a hazard and operability-based method for identifying safety management vulnerabilities in high risk systems. *Safety Science*. Vol. 30 (3), pp. 249–274.

146 Deacon, T., Amyotte, P. R., Khan, F. I. (2010). Human error risk analysis in offshore emergencies. *Safety Science*. Vol. 48 (6), pp. 803–818.

147 Yun, G., Rogers, W. J., Mannan, M. S. (2009). Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian-LOPA methodology. *Journal Loss Prevention Process Industries*. Vol. 22 (1), pp. 91–96.

148 International Electrotechnical Commission, (2016). *IEC 61882:2016 Hazard and operability studies (HAZOP studies) – application guide*. IEC, Geneva, Switzerland. p. 16.



3.4. att. HAZOP pētījuma procedūra.¹⁴⁹

1. Noteikt pētījuma objektu un izvēlēties analizējamo sistēmas daļu. Sistemātiskas izpētes nolūkā iekārtas un procedūras jāsadala atsevišķās vienībās, priekšmeti – to darbības posmos atkarībā no uzdevuma. Katram posmam pētījuma veikšanas laikā jāpiešķir unikāls identifikācijas numurs.
2. Noteikt parametrus, definēt atslēgvārdus un vienoties par noteikto parametru izmantošanu. Parametrus var iedalīt kategorijās. Specifiskie parametri var mainīties, tie raksturo fizikālo un ķīmisko procesu sastāvdaļas, ko var izmērīt vai atklāt. Novirze no plānotā darbības algoritma, kas var izraisīt bīstamu scenāriju, ja nav izpildīti drošības pasākumi, piemēram, plūsmas un temperatūras kontrole. Galvenie parametri ir attiecīgu bīstamības situāciju kopums, kuru kopējais negatīvais stāvoklis var izraisīt bīstamu ražošanas procesa stāvokli un ārkārtas situāciju. Tādā gadījumā steidzīgi jāveic papildu pasākumi iekārtu nomaiņai, izolācijai un citām darbībām.
3. Kombinēt atslēgvārdus, piemēram, nē, vairāk, mazāk, ar parametriem, pie-

¹⁴⁹ International Electrotechnical Commission, (2016). IEC 61882:2016 *Hazard and operability studies (HAZOP studies) – application guide*. IEC, Geneva, Switzerland. p. 17.

mēram, temperatūra, plūsma, spiediens, lai atklātu iespējamās procesa novirzes. Atslēgvārdi ir konkrēti vārdi vai teikumi, kas tiek izmantoti, lai aprakstītu novirzes no ierīces plānotās standarta darbības parametriem.

4. Analizēt noviržu cēloņus un iespējamās sekas. Atslēgvārdi un parametri var veidot situāciju likumsakarības, kas atšķiras no sistēmas ielānotā drošas ekspluatācijas stāvokļa, būtiska novirze nozīmē, ka ir iespējama situācija, kas var radīt apdraudējumu drošībai, veselībai vai videi. Par katru atklāto novirzi jārod atbilde uz jautājumu, vai šī novirze ir iespējama, jāmēģina atrast iespējamās cēloņus un identificēt iespējamās sekas, uzdodot citus jautājumus, piemēram, kāpēc sistēmā esošās vielas temperatūra ir augsta vai kas var notikt, ja vielas temperatūra turpinās paaugstināties. Tādā veidā tiek apkopoti visi sistēmas novirzes dati. Ekspertu grupa tos identificē, reģistrē un pēc tam sniedz priekšlikumus novirzes novēršanai.
5. Identificēt esošos un nepieciešamos aizsardzības un samazināšanas pasākumus katram elementam, kur konstatētas novirzes, un sagatavot ieteikumus turpmākai riska samazināšanai, ja tas ir nepieciešams. Pieņem lēmumus par katra riska pieņemšanu un prioritāro risku noteikšanu. Nosakot bīstamības riska pakāpi, ieteicams izmantot tipisko puskvantitatīvo riska matricu, lai novērtētu un noteiktu prioritātes (parasti – nelabvēlīgas sekas) risku un pieņemtu lēmumus par riska nepieļaušanu, pamatojoties uz vēsturiskiem statistikas datiem.

HAZOP analīze līdz šim uzskatīta par efektīvu bīstamības novērtējuma metodi, tomēr tai ir trīs būtiski trūkumi risku vadības jomā. Pirmkārt, tā nevar sniegt kvantitatīvus novērtējuma datus, jo novērtējumam izmantota kvalitatīvā metode. Otrkārt, *HAZOP* analīzes rezultāti, kas tiek attēloti tabulas veidā, skaidri neparāda kļūdu izplatīšanās procesu tehnoloģiskajās iekārtās. Treškārt, *HAZOP* analīze neuzskaita konkrētus iekārtu elementu atteices iemeslus, tāpēc nevar agrīni reaģēt un noteikt nepieciešamo drošības līmeni. Turklāt *HAZOP* komponenti tiek uzskaitīti pa vienam, neatspoguļojot atsevišķu sistēmu elementu mijiedarbību, savstarpējo atkarību vai iespējamo notikumu kombinācijas, kam ir izšķiroša nozīme identificēšanas un analīzes procesā.¹⁵⁰ Ņemot vērā šos argumentus, var secināt, ka standarta *HAZOP* analīze neatbilst paaugstinātas drošības un vides pārvaldības prasībām kompleksa procesa nozarē.¹⁵¹ Kopumā *HAZOP* metode ir ļoti līdzīga *FMEA* metodei, jo, to izmantojot, var identificēt procesu, sistēmas vai darbības atteices iemeslus, veidus un sekas. Galvenā atšķirība ir tajā, kā speciālistu grupa izskata negadījumu rezultātus un novirzes no paredzamajiem rezultātiem un kā tiek veikta izpēte atpakaļejošā secībā līdz iespējamajiem darbības atteices iemesliem, savukārt *FMEA* metode tiek izmantota pretējā virzienā no atteices iemesla veida identificēšanas.

150 Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*. Vol. 27 (2–3), pp. 183–213.

151 Guo, L., Kang, J. (2015) An extended HAZOP analysis approach with dynamic fault tree. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 38, pp. 224–232.

3.3. Atteices režīma un efekta analīzes metodes

Atteices režīma un efekta analīzes metodes (angļu val. – *Failure mode and effect analysis; FMEA*) ir spēcīgs drošības procesu, sistēmu un pakalpojumu analīzes instruments. Detalizētākā *FMEA* metodē ietilpst kritiskās analīzes posms, ko dēvē arī par atteices režīmu, efektu un kritiskuma analīzi (angļu val. – *Failure mode, effect, and criticality analysis; FMECA*). *FMEA* ir sistematizēta (no apakšas uz augšu) inženierijas metode, tās galvenais mērķis ir atrast, novērtēt un novērst zināmus vai potenciālus atteices iemeslus, ņemot vērā sistēmas trūkumus, un novērst iespējamus negadījumus.¹⁵²

FMEA metode tika ieviesta 1949. gadā ASV armijā, lai pētītu iespējamās militārās sistēmas darbības trūkumus.¹⁵³ Pilnveidotu sistēmu 20. gadsimta 60. gados sāka izmantot ASV organizācijas NASA vajadzībām, lai novērtētu drošības sistēmas nepilnības. Pēc tam *FMEA* kļuva arvien populārāka, un pašlaik tā tiek izmantota dažādās nozarēs – militārā, ražošanas, elektronikas un veselības aprūpes nozarē.¹⁵⁴

FMEA ir detalizēta un stingra metodika, kas saistīta ar vadīšanu. Viena no šīs metodes priekšrocībām ir iespēja uzdot atvērtos jautājumus, kas ļauj labāk identificēt analizējamās sistēmas bīstamību un riskus. Tradicionālā *FMEA* metode nosaka riska prioritātes numuru (RPN), lai identificētu iespējamās atteices gadījumus. RPN kontekstā jāidentificē riska faktori, piemēram, atteices režīma rašanās nozīmīgums (*Occurrence* – iestāšanās; *O*), negadījuma smagums (*Severity* – nozīmīgums; *S*) un negadījuma vai atteices atklāšana (*Detection* – atklāšana; *D*). Pēc faktoru identificēšanas tiek noteikts RPN, reizinot riska faktoru vērtību. Parasti *FMEA* faktoru vērtēšana tiek veikta, nosakot diskrētās vērtības katram elementam iepriekš noteiktā skalā, piemēram, no 1 līdz 3, no 1 līdz 5 vai no 1 līdz 10. Jo augstāks rādītājs, jo lielāks risks, ko aprēķina pēc RPN prioritātēm (3.2. formula).

$$RPN = (O) \times (D) \times (S) \quad (3.2.)$$

Šis RPN vērtības ļauj salīdzināt riskus. Atteices režīmi ar augstākajiem RPN rādītājiem ir visaktuālākie, tos ir jāņem vērā, lai palielinātu drošību un samazinātu riska pakāpi. Novērtēšanas riska faktoru skala redzama 3.1. tabulā.

152 Sharma, R. K., Kumar, D., Kumar, P. (2005). Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling, *International journal of quality & reliability management*. Vol. 22, Issue 9. pp. 986–1004.

153 Spreafico, C., Russo, D., Rizzi, C. (2017). A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review*. Vol. 25. pp. 19–28.

154 Certa, A., Hopps, F., Inghilleri, R., La Fata C. M. (2017). A Dempster-Shafer Theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 159, pp. 69–79.

Novērtēšanas riska faktoru skala¹⁵⁵

Atteices režīma rašanās nozīmīgums	(0)	Negadījuma vai atteices atklāšanas nozīmīgums	(D)	Negadījuma smagums	Atteikuma režīma sekas ar ietekmi un to nozīmīgums	(5)
Nenožīmīgs	1	Noteikti	1	Bīstami augsts	Cilvēki var gūt smagus ievainojumus	10
Ļoti zems	2	Ļoti iespējams	2	Ārkārtīgi augsts	Atteikums vairs neatbilst tiesību normām	9
Zems	3	Iespējams	3	Ļoti augsts	Klients saņem produktu ar atteikumu/brāķi	8
Ik pa laikam	4	Vairāk nekā vidēji	4	Augsts	Izgatavoto produktu noraidīšana	7
Šad tad	5	Vidēji	5	Apmierinošs	Ilgs procesa kavējums, jo jāveic remonts	6
Regulāri	6	Zems	6	Zems	Mērens procesa kavējums	5
Ļoti regulāri	7	Ļoti zems	7	Ļoti zems	Īss procesa kavējums	4
Bieži	8	Maz ticams	8	Ārkārtīgi zems	Nepieciešamas papildu piepūles, lai ražotu bez kavēšanās	3
Ļoti bieži	9	Ļoti maz ticams	9	Gandrīz neviens	Atteikums netiek pamanīts, maza ietekme	2
Ārkārtīgi bieži	10	Izslēgts	10	Neviens	Nepamanīts, nav atbilstoša efekta	1

Lai gan *FMEA* metode ir ļoti populāra, pamata novērtēšanas metodei ir vairākas būtiskas nepilnības. Pirmkārt, dati tiek izmantoti, lai aprakstītu atteices riskus, taču bieži vien ir grūti iegūt precīzus novērtēšanas rezultātus, jo cilvēku viedoklis var atšķirties. Otrkārt, atteices prioritātes tiek šķīrotas atbilstoši riska prioritātes numuram, kas ir apšaubāms un ļoti jutīgs pret riska faktoru reitingu izmaiņām.¹⁵⁶ Turklāt šī metode bieži tiek uzskatīta par neinteresantu un laikietilpīgu. *FMEA* novērtēšanas rezultātu dokumentēšanai tiek izveidota tabula, kurā tiek ierakstīts kārtējais riska novērtējums, aprēķinot RPN līmeni, kā arī tiek norīkota atbildīgā persona par riska mazināšanu. Pēc riska mazināšanas pasākumu veikšanas risks tiek pārvērtēts atkārtoti, pārreķinot RPN. Šādā veidā ir viegli salīdzināt, vai pēc nepieciešamo pasākumu

155 Barends, D. M., Oldenhof, M. T., Vredenburg, M. J., Nauta, M. J. (2012). Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. Vol. 64–65, pp. 82–86.

156 Huang, J., Li, Z., Liu, H. (2017). New approach for failure mode and effect analysis using linguistic distribution assessments and TODIM method. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 167, pp. 302–309.

ieviešanas riska līmenis ir palielinājies vai samazinājies un cik liels ir riska samazinājums.

3.2. tabula

FMEA novērtēšanas rezultātu dokumentēšana

Elements, neveiksmes (kļūdas) Nr.	Iespējamais defekts	Iespējamās defekta sekas	S	Iespējamie defekta iemesli	O	Kontroles metodes	D	RPN	Rīcība	Izpildītājs	Darba rezultāti			
											S	O	D	RPN

Lai *FMEA* metodi izmantotu ar varbūtības modifikāciju, nepieciešams (O) un (D) rādītājiem noteikt varbūtības, kas apkopotas 3.3. tabulā. Atteikumu iemeslu neatklāšanas ($1 - P_{(D)}$) rādītāji sniegti atsevišķā kolonnā.

3.3. tabula¹⁵⁷
FMEA varbūtības pieejas rādītāji

Atteices režīma rašanās nozīmīgums	(O)	$P_{(O)}$	Negadījuma vai atteices atklāšanas nozīmīgums	(D)	$P_{(D)}$	$(1 - P_{(D)})$
Nenoīmīgs	1	5×10^{-10}	Noteikti	1	1	0
Ļoti zems	2	2×10^{-9}	Ļoti iespējams	2	0,99	0,01
Zems	3	6×10^{-7}	Iespējams	3	0,96	0,04
Ik pa laikam	4	6×10^{-6}	Vairāk nekā vidēji	4	0,93	0,07
Šad tad	5	1×10^{-4}	Vidēji	5	0,90	0,1
Regulāri	6	3×10^{-3}	Zems	6	0,75	0,25
Ļoti regulāri	7	1×10^{-2}	Ļoti zems	7	0,50	0,5
Bieži	8	5×10^{-2}	Maz ticams	8	0,30	0,7
Ļoti bieži	9	3×10^{-1}	Ļoti maz ticams	9	0,10	0,9
Ārkārtīgi bieži	10	6×10^{-1}	Izslēgts	10	0	1

Vissvarīgākais ir neatklāta atteices režīma rašanās varbūtība $P_{(UF)}$, ko veido $P_{(O)}$ reizinājums ar atteikumu iemeslu neatklāšanas varbūtību ($1 - P_{(D)}$). Tieši $P_{(UF)}$ vērtība veido kvantitatīvo *FMEA* novērtējuma riska līmeni. *FMEA* varbūtības noteikšanas procedūras modifikācijas rezultāti (paraugs) pirms un pēc sešu atteices režīmu uzlabojumiem apkopoti 3.4. tabulā.

157 Barends, D. M., Oldenhof, M. T., Vredendregt, M. J., Nauta, M. J. (2012). Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. Vol. 64–65, pp. 82–86.

FMEA varbūtības novērtējuma paraugs

Elements, neveiksmes (kļūdas) Nr.	FMEA sākuma varbūtības novērtējums				FMEA varbūtības novērtējums pēc uzlabojumiem			
	$P_{(D)}$	$(1 - P_{(D)})$	$P_{(WF)}$	S	$P_{(D)}$	$(1 - P_{(D)})$	$P_{(WF)}$	S
1.1.	6×10^{-6}	0,5	3×10^{-6}	8	6×10^{-6}	0,04	$2,4 \times 10^{-7}$	8
1.2.	6×10^{-7}	1	6×10^{-7}	8	6×10^{-7}	0,01	6×10^{-9}	8

Šādā veidā izmantojot noteiktas varbūtības un *FMEA* metodi, var iegūt kvantitatīvos rezultātus. 3.4. tabulā redzams sākotnējais riska novērtējums un riska novērtējums pēc nepieciešamo riska mazināšanas pasākumu veikšanas.

3.4. Koka analīzes metodes

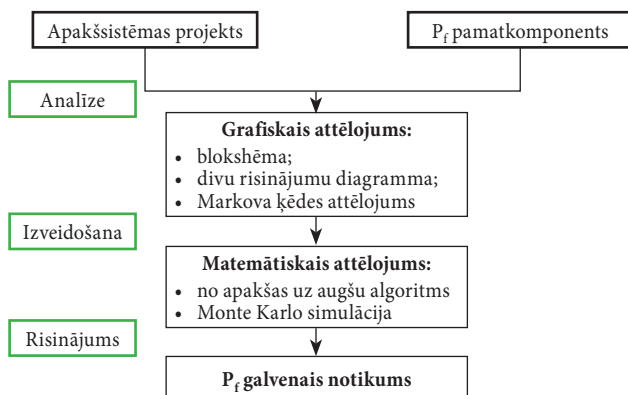
Koka analīzes metode ietver kokveida diagrammas izstrādi. Šajā diagrammā tiek atspoguļoti uzdevuma atrisināšanas posmi, pēc tam veicot identificētā atteices punkta analīzi. Svarīgs koka analīzes elements ir kvantitatīvā riska analīze, ko izmanto, lai noteiktu katra identificētā riska faktora varbūtību. Ir definētas vairākas koka analīzes metodes – kļūdu koka analīze, notikumu koka analīze, cēloņu un seku analīze.¹⁵⁸

Kļūdu koka analīze (angļu val. – *Fault Tree Analysis*; *FTA*) ir viens no spēcīgākajiem analīzes paņēmieniem, lai parādītu sarežģītas inženiertehniskās sistēmas negatīvā notikuma varbūtību, pamatojoties uz pamatkomponenšu atteici, izmantojot visas apakšsistēmas. *FTA* tika radīta 1961. gadā uzņēmuma “Bells Labs” vadības sistēmas projektā “Minuteman”.¹⁵⁹ Mūsdienās šī metode tiek plaši izmantota dažādās inženiertehniskajās jomās, lai identificētu un paredzētu nelabvēlīgas sekas.

Kļūdu koka analīze tiek izmantota atteices varbūtības aprēķinam. Zinātnieki F. Sihombings (*F. Sihombing*) un M. Torbols (*M. Torbol*) definē trīs galvenos kļūdu koka analīzes posmus (3.5. att.). 1. posmā tiek izveidota kļūdu koka loģiskā secība. Ņemot vērā sistēmas elementus, tiek noteikta galveno komponentu atteices varbūtība un analizēta katra posma loģiskā secība. 2. posms ir kļūdu koka modeļa matemātiskā uzbūve. 3. posmā tiek aprēķināta pēdējā negadījuma cēloņsakarību varbūtība. Kļūdu koka analīzi var veikt kvalitatīvi vai kvantitatīvi, vai izmantot abus izpētes veidus atkarībā no pētījuma mērķiem.

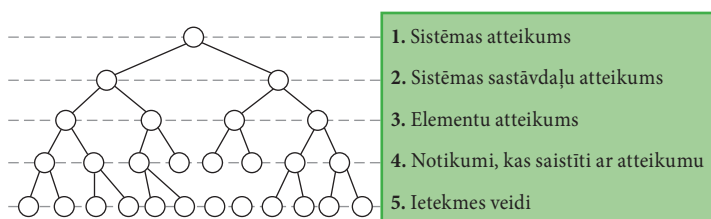
158 Dallat, C., Salmon, P. M., Goode, N. (2019). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. Vol. 119, pp. 266–279.

159 Sihombing, F., Torbol, M. (2018). Parallel fault tree analysis for accurate reliability of complex systems. *Structural Safety*. Vol. 72, pp. 41–53.


3.5. att. Kļūdas koka analīzes soļi un algoritmi.¹⁶⁰

Zinātnieks B. Veselijs (B. Vesely) kļūdu koka analīzi (FTA) definē kā dedukcijas analīzes metodi nevēlamu notikumu un cēloņu atrisināšanai.¹⁶¹ FTA ir analīze, kas vērsta pret konkrēta notikuma cēloņiem un sašķirota posmos loģiskā secībā, tiek izmantota analīzes procesā, diagrammā vizuāli attēlojot procesu likumsakarības. FTA mērķis ir izskatīt iespējamās negadījuma cēloņus, identificēt sistēmas nepilnības, novērtēt izmantojamo konstrukciju drošību, noteikt iespējamās cilvēka kļūdas sekas, definēt efektīvus priekšlikumus sistēmas uzlabojumiem, kā arī kvantitatīvi noteikt iespējamā negadījuma varbūtību un optimizēt sistēmas darbību.

Kļūdu koks kā strukturētās analīzes metode tiek izmantota ASV (kā standarts MIL-HDBK-217 “Reliability prediction of electronic equipment”), tās pamatā ir loģiskas varbūtības modelis, kas saistīts ar atteikumu-seku tīklu sistēmas savstarpējo atkarību no elementiem vai citiem iemesliem. 3.6. attēlā redzama kļūdu koka sistēmas uzbūve, kurā katrs punkts nozīmē konkrēto elementu, kas ir savstarpēji saistīti.



3.6. att. Kļūdu koks.

Šajā paņēmienā tiek realizēta deduktīvā metode (iesesli-sekas), kas šo metodi padara par ļoti labu, lai atrastu sākotnējos negadījuma iemeslus statistiskām sistēmām, kas dod iespēju vizuāli apskatīt to elementu shēmu, kas ietekmē drošību.

¹⁶⁰ Sihombing, F., Torbol, M. (2018). Parallel fault tree analysis for accurate reliability of complex systems. *Structural Safety*. Vol. 72, pp. 41–53.

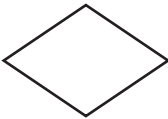
¹⁶¹ Vesely, B., Stamatelatos, M., Dugan, J., Fragola, J., Minarick, J., Railsbach, J. (2002). Fault Tree Analysis Concepts and Applications, *NASA Publication*, Version 1.1, pp. 4–10.

FTA koka izveide:

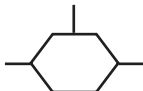
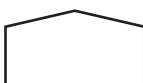
- 1) galanotikumu (avāriju) izvieto koka augšā;
 - 2) koks ietver notikumu virkni, kas izraisa galanotikumu;
 - 3) notikuma virkni veido ar loģisku simbolu UN, VAI u. c. palīdzību;
 - 4) notikumu virs loģiskās zīmes izvieto taisnstūrī (veic aprakstu);
 - 5) primāros notikumus (sākotnējos cēloņus) izvieto koka apakšā.
- Lai izveidotu kļūdu koku, tiek izmantoti speciālie simboli (3.7. tab.).

3.7. tabula¹⁶²

Simboli kļūdu koka izveidei

Simbols	Apraksts
	Ar loģiska simbola palīdzību apzīmējamais notikums
	Primārais, galvenais sākuma notikums
	Nepietiekami detalizēti izstrādāts notikums (nedalāms sākotnējais notikums)
	Loģiskā zīme "UN"
	Loģiskā zīme "Prioritārais UN"
	Loģiskā zīme "VAI"
	Loģiskā zīme "m no n"

162 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība. 95. lpp

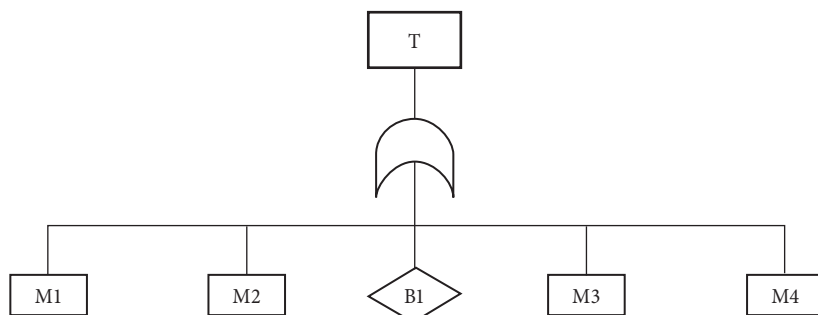
Simbols	Apraksts
	Loģiskā zīme "Izņēmuma VAI"
	Loģiskā zīme "Aizliegums"
	Pārejas simbols
	Notikums var notikt vai arī nenotikt

FTA koku izveido šādi.

- Nosaka avārijas (visbīstamāko) galanotikumu, kas veido koka virsotni. Šādu notikumu skaidri formulē, sniedz precīzas tā pazīmes. Ķīmisko tehnoloģiju objektos pie šādām pazīmēm pieskaita aparāta plīsumu, ugunsgrēku, reakcijas izešanu ārpus kontroles u. c. Ja galanotikumu neizdodas noteikt uzreiz, tad veic tiešu objekta darbības analīzi, ievērojot darbības stāvokļa izmaiņas, operatoru pārkāpumus u. tml. Uzskaita iespējamās atteices, aplūko to kombinācijas, nosaka šādu notikumu sekas.
- Izmantojot notikumu standarta simbolus un loģiskos simbolus, veido koku saskaņā ar šādiem noteikumiem:
 - galanotikumu (avārijas) izvieto augšā;
 - koks ietver notikumu virkni, kas izraisa galanotikumu;
 - notikumu virkni veido ar loģisko simbolu UN, VAI u. c. palīdzību;
 - notikumu virs loģiskās zīmes izvieto taisnstūrī, pašu notikumu apraksta tajā pašā taisnstūrī;
 - primāros notikumus (sākotnējos cēloņus) izvieto apakšā.¹⁶³

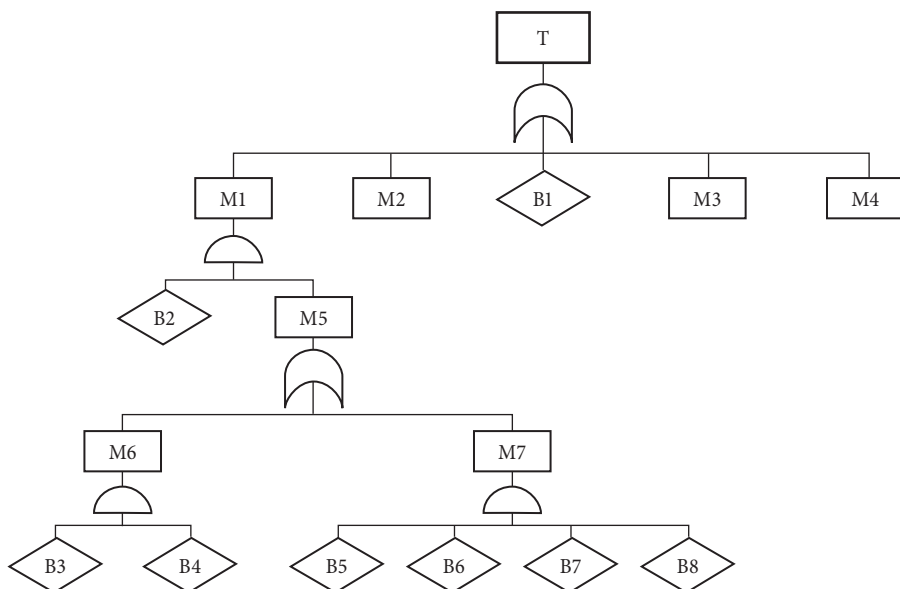
3.7. attēlā redzams kļūdu koks, kur: T – galvenais (bāzes, pamata) notikums; B – primārais notikums vai nepietiekami detalizēti izstrādāts notikums; M – starpgadījums (incidents). Notikumiem M1, M2, M3, M4 ir nepieciešama turpmāka analīze. B1 – ir pieejama vēsturiskā informācija, kas ļauj to uzskatīt par pamata notikumu.

163 Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU Izdevniecība. 93. lpp



3.7. att. Kļūdu koks.

Izmantojot kļūdu koku, ir iespējams veikt arī kvantitatīvo analīzi, šajā gadījumā analīze tiek veikta no koka apakšas uz augšu (3.8. att.).



3.8. att. Kļūdu koks ar scenārijiem.

Katram notikumam nepieciešama pamata statistiskā informācija, ko nepieciešams ievietot kļūdu kokā. Piemēram, notikums (M7) ietver četrus vienlaikus notiekošus notikumus, ko var pierakstīt šādi:

$$P(M7) = P(B5) \times P(B6) \times P(B7) \times P(B8) = 1 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-2} \times 1 \times 10^{-1} \times 1 \times 10^{-1} = 1 \times 10^{-7}, \text{ gads}^{-1}.$$

Notikums (M6) ietver divus vienlaikus notiekošus procesus:

$$P(M6) = P(B3) \times P(B6) = 1 \times 10^{-2} \times 1 \times 10^{-2} = 1 \times 10^{-4}, \text{ gads}^{-1}.$$

Scenārija (M5) nevēlamo notikumu izsauc bloks “VAI”, tāpēc varbūtības tiek summētas:

$$P(M5) = P(M6) + P(M7) = 1 \times 10^{-4} + 1 \times 10^{-7} = 1 \times 10^{-4}, \text{ gads}^{-1}.$$

Kopumā kvantitatīvi novērtējot visu (M1) notikumu ķēdi, var aprēķināt kopējā notikuma varbūtību:

$$F(m1) = F(B2) \times P(M5) = 300 \text{ gads}^{-1} \times 1 \times 10^{-4} = 3 \times 10^{-2}, \text{ gads}^{-1}.$$

Šādi var novērtēt visu loģisko ķēdi un atrast kopējo atteikuma varbūtību, izanalizējot visus kļūdu koka zarus.

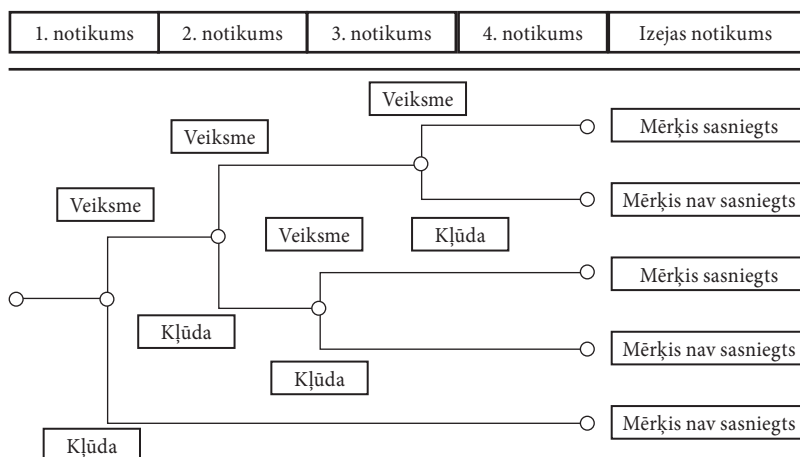
Notikumu koka analīze (angļu val. – *Event Tree Analysis; ETA*) ir konstruktīvas modelēšanas veids, kā atklāt un analizēt dažādu negadījumu varbūtību.¹⁶⁴ Seku novērtējumā notikumu koka analīze parasti tiek izmantota, lai identificētu iespējamās nejausos scenārijus, kas tiek apskatīti kā notikuma izraisīšanas alternatīvie gadījumi.¹⁶⁵ Notikumu koka analīze parāda iespējamo hronoloģisko ķēdi vai procesa attīstību (3.9. att.), kas saistīta ar dažādiem iespējamajiem notikumiem. Metode iekļauj atteikumu deduktīvo analīzi, ko var vienkāršoti aprakstīt analītiski. Kopumā šo varbūtības analīzes metodi riska novērtēšanas procesā rekomendē izmantot Starptautiskā atomenerģētikas aģentūra.¹⁶⁶ Notikumu koku parasti veido no kreisās puses uz labo, tā sākumpunkts ir iespējamais negadījums. Ja notikumu koks ir pārāk liels, vajadzības gadījumā atsevišķus zarus var zīmēt uz citas lapas, sasaistot lapas un izmantojot speciālus norādes simbolus. Notikumu kokā attēlo dažādas notikuma iespējamības un varbūtības, drošību ietekmējošos faktorus sauc par mezgliem. Vispirms veic notikuma sākotnējo prognozi, pēc tam identificē papildu apdraudējuma faktorus, kas var izraisīt domino efektu, pēc kā nosaka notikuma varbūtību.

Sākotnējais notikums parasti tiek parādīts kreisajā pusē kā horizontāla līnija, kas vertikāli atdala citus saistītus variantus, kas var būt kontrolējami vai nevēlami gadījumi. Notikumu koku veido, izmantojot sākotnējo un saistīto atsevišķo notikumu sakarības, kas parādītas, izmantojot koka struktūru. Ja galvenais notikums (veiksme) notiek, bet pārējie saistītie notikumi nenotiek (neveiksme), tad var pieņemt, ka nevēlamās situācijas briesmas pasliktinās citu iekārtu un sistēmu darbību. Veiksmes gadījumā nelaimes gadījumu secība beidzas, savukārt neveiksmes gadījumā ķēde turpinās, līdz visi varianti ir izsmelti. Pēc notikumu koka analīzes un konstruēšanas tiek vērtēts katra atsevišķā bīstamības ceļa risks. Sliktāko koka attīstības scenāriju attēlo koka augšpusē, labāku scenāriju – zemāk, vislabāko – viszemāk.

164 Raiyan, A., Das, S., Islam, M. (2017). Event Tree Analysis of Marine Accidents in Bangladesh. *Procedia Engineering*. Vol. 194, pp. 276–283.

165 Cozzani, V., Gubinelli G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S. (2005). The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. A127, pp. 14–30.

166 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 83. lpp.


3.9. att. Notikumu koks.¹⁶⁷

Katra notikumu koka zara notikuma varbūtība tiek aprēķināta, izmantojot 3.8. tabulas datus vai avotus, kur atkarībā no noplūdušās vielas sastāva ir aprēķināta katras vielas tūlītējas vai aizkavētas aizdegšanās varbūtība. Tātad, izmantojot 3.8. tabulas datus, avārijai, kas saistīta, piemēram, ar benzīna cauruļvada sabrukumu (atbilstoši metodikai VUŠ uzliesmošanas temperatūra ir mazāka par +28 °C, ir jāizmanto nosacīta varbūtība divfāzu maisījumiem, jo tie var atrasties gan šķidrā, gan tvaika veidā), nosacīta dažādu scenāriju realizācijas varbūtība būs šāda: tūlītējas aizdegšanās varbūtība $P = 0,2$ jeb 20 %; aizkavētas aizdegšanās varbūtība, ja nav tūlītējas aizdegšanās, $P = (1 - 0,2) \times 0,24 = 0,192$; sadegšana, veidojot pārspiedienu, ja sākotnējā notikumā izveidojas degošas vielas gāzveida mākonis, un tā novēlota aizdegšanās, ja nav tūlītējas aizdegšanās, $P = (1 - 0,2) \times 0,24 \times 0,2 \times 0,6 = 0,023$. Apskatot šos iespējamos scenārijus, var noteikt scenāriju ar vislielāko negatīvo varbūtību un secināt, ka tūlītējas aizdegšanās gadījumam ir vislielākā negatīvā notikuma varbūtība, savukārt notikuma bez negatīvas ietekmes varbūtība ir $P = 0,8$ jeb 80 %. Atbilstoši šīs tabulas izmantošanas rekomendācijām, ja šķidrums uzsilis līdz pašuzliesmošanās temperatūrai vai nonāk apkārtējā vidē, kur eksistē aizdegšanos izraisoši avoti, nosacīta aizdegšanās varbūtība $P = 1$.

167 Firza, R., Rosyid, D., Dirta, M. C. (2017). Project Delay Analysis on Jacket Structure Construction. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 862, pp. 315–320.

3.8. tabula

Nosacīta tūlītējas un aizkavētas aizdegšanās varbūtība¹⁶⁸

Masas noplūde, kg/s		Nosacīta tūlītējas aizdegšanās varbūtība			Nosacīta aizkavētas aizdegšanās varbūtība, ja nav tūlītējas aizdegšanās			Nosacīta sadegšanas varbūtība ar pārspiediena izveidošanos, kad izveidojas sprādzienbīstams gaisa maisījums, kas aizdegas		
Diapazons	Nominālā vidējā vērtība	Gāze	Divfāžu maisījums	Šķidrums	Gāze	Divfāžu maisījums	Šķidrums	Gāze	Divfāžu maisījums	Šķidrums
Mazs (< 1)	0,5	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,080	0,080	0,050
Vidējs (1–50)	10	0,035	0,035	0,015	0,036	0,036	0,015	0,240	0,240	0,050
Liels (> 50)	100	0,150	0,150	0,040	0,176	0,176	0,042	0,600	0,600	0,050
Pilnīgs sabrukums	Nav noteikts	0,200	0,200	0,050	0,240	0,240	0,061	0,600	0,600	0,100

Izmantojot 3.8. tabulas datus, var veidot notikumu koku, ar ko var modelēt visus iespējamās attīstības scenārijus. Piemērs redzams 3.9. attēlā. Avāriju scenāriju varbūtības aprēķināšanai tiek izveidota tabula, nosakot katra zara kopējo varbūtību, kas tiek reizināta ar avārijas pamata varbūtību, veidojot scenārijus un piešķirot numurus. Piemērs scenārijam ar numuriem, izmantojot notikumu koku, redzams 3.9. tabulā.

3.9. tabula

Notikumu koka realizācijas varbūtība "Cisternas pilnīgs sabrukums"¹⁶⁹

Scenārijs Nr.	Cisternas pilnīgs sabrukums	Cisterna ar pārspiedienu		
		P – varbūtība, gads ⁻¹	Z – zara varbūtība (kopā)	Kopējā realizācijas varbūtība, (P × Z) gads ⁻¹
C1	Bīstamas vielas noplūde nenorobežotā teritorijā	5×10^{-7}	0,608	$3,0 \times 10^{-7}$

Parasti RRO statistikas dati par tehnoloģisko iekārtu ekspluatācijas laikā notikušajiem negadījumiem un avārijām netiek saglabāti pietiekamā apjomā, lai to varētu izmantot riska novērtējumam, tāpēc tam var izmantot pasaules zinātniskajā literatūrā

168 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 85. lpp.

169 Urbans, M., Malahova, J., Jemeljanovs, V. Identifying Potential Risks Created by State Joint-Stock Company Latvijas Dzelzceļš Jelgava Station and Evaluating Their Impact on Environment, Inhabitants and Infrastructure. (2019). No: 18th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": Proceedings. Vol. 18, Latvija, Jelgava, 22.–24. maijs, 2019.

rā sniegto informāciju par negadījumu varbūtību standarta tehnoloģiskajās iekārtās (P – varbūtība; 3.10. tab.).

3.10. tabula

Tehnoloģiskā aprikojuma bojājuma biežums (stacionārā stāvoklī)¹⁷⁰

Aprikojuma nosaukums	Notikums, kas izraisa avāriju	Izplūšanas cauruma diametrs, mm	Biežums, gads ⁻¹
Rezervuāri, aprikojums zem spiediena	Bojājums, kura rezultātā izdalās gāze vai šķidrums, vai divfāžu vide	5	$4,0 \times 10^{-5}$
		12,5	$1,0 \times 10^{-6}$
		25	$6,2 \times 10^{-6}$
		50	$3,8 \times 10^{-6}$
		100	$1,7 \times 10^{-6}$
		Pilnīgs sabrukums	$3,0 \times 10^{-7}$

Pamatvarbūtība var mainīties atkarībā no tehnoloģisko iekārtu skaita un ekspluatācijas laika gadā. Lai noteiktu avārijas izcelšanās biežumu dažādu veidu aprikojumam, tiek ņemts vērā aprikojuma skaits, izvietojuma vieta, sākotnējā negadījuma izcelšanās biežums ar iespējamajām sekām. Avārijas situāciju riska biežumu objektā ar viena veida aprikojuma ekspluatāciju viena gada periodā aprēķina, izmantojot 3.3. formulu.

$$Q(A_i) = \left[nQ_i - 0,5n(n-1)Q_i^2 \right] \sum \frac{t_i}{St_i}, \quad (3.3.)$$

kur n – viena veida aprikojuma skaits objektā;

Q_i – scenārija realizācijas varbūtība;

St_i – aprikojuma ekspluatācijas ilgums gadā, stundas.

Veicot cēloņu un seku analīzi (angļu val. – *Cause Consequence analysis*; CCA), ar diagrammas palīdzību var modelēt visus negatīvos un pozitīvos sistēmas izmaiņu iemeslus, notikumu ķēdi (ceļu) un rezultātus vienā loģiskajā shēmā. Ir pierādīts, ka diagramma ir ļoti piemērota sistēmas atteices procesa attēlošanai un turpmākam kvantitatīvam novērtējumam, ko varētu piemērot pakāpeniskajā procesu analīzē.¹⁷¹ Koka analīzes riska metožu novērtējuma galvenā priekšrocība ir iespēja iegūt gan kvalitatīvos, gan kvalitatīvi kvantitatīvos rezultātus, kas ir būtiski lietotājiem jeb ekspertiem, kas izvērtē abu veidu rezultātus. Turklāt šo metodi var izmantot visos sistēmas procesu posmos, ieskaitot plānošanu, projektēšanu, piegādi un pārskatīšanu.¹⁷²

Cēloņu un seku diagrammas mērķis ir novērtēt visu potenciālo ar negadījumu saistīto seku iespējamību vai biežumu. Cēloņu un seku diagrammas metodes pa-

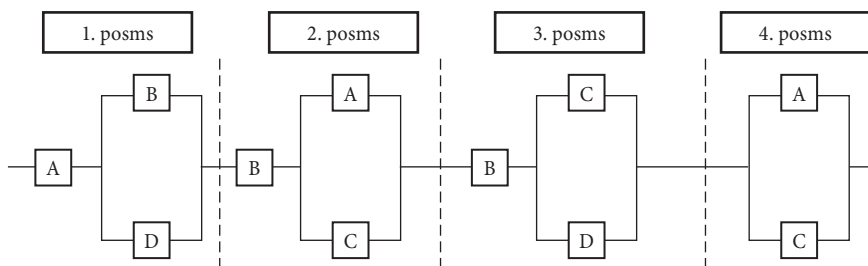
170 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 86. lpp.

171 Vyzaite, G., Dunnett, S., Andrews, J. (2006). Cause-consequence analysis of non-repairable phased missions. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 91, pp. 398–406.

172 Altabbakh, H., AlKazimi, M. A., Murray, S., Grantham, K. (2014). STAMP – holistic system safety approach or just another risk model? *J. Loss Prev. Process Ind.* Vol. 32, pp. 109–119.

matā ir kritiska negatīva notikuma iespējamība, piemēram, gadījums, kas saistīts ar komponentu vai apakšsistēmu darbības atteici, kas var radīt bīstamas sekas. Kad ir identificēts kritiskais notikums, visi tā būtiskie iemesli un iespējamās sekas tiek izstrādātas, izmantojot kļūdu koka analīzi un notikumu koku analīzi.¹⁷³ Grafiskais apraksts riska un negadījumu scenārijiem ir ļoti noderīgs, it īpaši, paziņojot analīzes rezultātus. Koka analīzes metodes galvenais trūkums ir augsts nepieciešamo zināšanu līmenis.

3.10. attēlā ilustrēta pakāpenisku cēloņu un seku analīzes gaita, parādot vienkāršu seku diagrammas metodi, izmantojot neatjaunojamās sistēmas piemēru. Šajā piemērā, lai rastos sekas, sistēmai ir jāstrādā visos četros posmos. 1. posma A komponentam jāstrādā kopā ar B vai D komponentu. A, B vai C komponenta defekts vai darbības kļūda izraisīs visa posma darbības atteici un neļaus pāriet nākamajā posmā. Ja 1. posms ir veiksmīgi pabeigts, sistēma ieiet 2. posmā. Lai pabeigtu posmu, sistēmas prasībām jābūt izpildītām katrā posmā.



3.10. att. Vienkāršo seku diagramma.¹⁷⁴

3.5. Cilvēka drošuma analīzes un cilvēka kļūdas identifikācijas metodes

Cilvēku drošuma analīzes (HRA) un cilvēka kļūdas identifikācijas (HEI) metodes sāka bieži izmantot 20. gadsimta 80. gados pēc notikušām vērienīgām katastrofām. Sākumā cilvēka kļūdas gadījumu izpēte gāja roku rokā ar kognitīvās psiholoģijas attīstību 20. gadsimta 70. gados.¹⁷⁵ Cilvēka drošuma analīzi HRA var izmantot, lai kvantitatīvi vai kvalitatīvi novērtētu cilvēka darbības iespējamo negatīvo ietekmi uz funkcionējošās sistēmas drošību. Cilvēku un vides drošība ir atkarīga no dažādiem cilvēku (operatoru) raksturojošiem faktoriem, piemēram, kompetences, uzmanības, motivācijas un emocionālās noslodzes darbā. Cilvēka drošums ir saistīts ar darba drošību, ko izsaka ar varbūtību, ka cilvēks pareizi izpilda savus pienākumus, ja tas

¹⁷³ Vyzaite, G., Dunnett, S., Andrews, J. (2006). Cause–consequence analysis of non-repairable phased missions. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 91, pp. 398–406.

¹⁷⁴ Vyzaite, G., Dunnett, S., Andrews, J. (2006). Cause–consequence analysis of non-repairable phased missions. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 91, pp. 398–406.

¹⁷⁵ Huang, F., Liu, B. (2017). Software defect prevention based on human error theories *Chinese Journal of Aeronautics*. Vol. 30, Issue 3, pp. 1054–1070.

ar savu darbību vai bezdarbību nevar sabojāt kontrolējamo sistēmu.¹⁷⁶ Cilvēka kļūda vai nedrošums ir varbūtība, ka kontrolējamās sistēmas bojājums notiek cilvēka nepareizas darbības rezultātā.

Analizējot cilvēka drošumu, tiek noteikta cilvēciskā faktora ietekme nākotnē atbildot uz jautājumu, kāda ir varbūtība un kādā situācijā operators var kļūdīties. Cilvēka drošuma analīzes mērķis ir sistemātiski identificēt un analizēt cilvēka kā sistēmas elementa iedarbības cēloņus un saistītās sekas attiecībā uz tehniskām sistēmām, piemēram, uz atomelektrostacijas darbību, kosmosa sistēmas darbību, vadības operāciju efektivitāti un citām darbībām. Cilvēka kļūda ir viens no galvenajiem daudzu sarežģītu sistēmu incidentu un negadījumu cēloņiem.¹⁷⁷ Statistikas dati liecina, ka mūsdienās cilvēka kļūdas dēļ kodolrūpniecībā notiek vairāk nekā 90 % negadījumu, ķīmiskajā un naftas rūpniecībā – vairāk nekā 80 % darbības atteices gadījumu, jūrniecībā – vairāk nekā 75 % negadījumu, aviācijā – vairāk nekā 70 % negadījumu, dzeramā ūdens sadales un higiēnas jomā – vairāk nekā 75 % darbības traucējumu.¹⁷⁸

HRA dati parasti tiek izmantoti kā riska varbūtības novērtējuma ievaddati identificējot trīs galvenos rezultātus – cilvēka kļūdas (cilvēka kļūdas identifikācijas metodes), ar to saistītās iespējamības novērtējums (cilvēka kļūdas skaitīšana), ja nepieciešams, kontroles pasākumu īstenošanas iespējas, lai mazinātu to varbūtību (cilvēka kļūdas samazināšana). Galvenā atšķirība starp HRA un HEI metodēm ir tā, ka HRA metodes parasti tiek izmantotas papildus cilvēka kļūdas kvantitatīvajai analīzei. Viena no HEI izplatītākajām un populārākajām cilvēka kļūdas identifikācijas metodēm ir sistemātiskas cilvēka kļūdas iespējas mazināšanas un prognozēšanas metode (SHERPA), kas izstrādāta Embrey (1986. gadā).¹⁷⁹ Atbilstoši SHERPA metodei tiek definētas piecas cilvēka kļūdu kategorijas: darbības kļūdas; kļūdu pārbaude; informācijas ieguves kļūdas; komunikācijas kļūdas; izvēles kļūdas. SHERPA novērtē cilvēku drošumu un izmanto šo informāciju, lai novērtētu rezultātus, kas iegūti dažādu veidu darba režimos un atpūtas laika sadalījumā, tādējādi ļaujot noteikt pārtraukumu optimālo režīmu atkarībā no darba ilguma, slodzes un sadalījuma maiņās.

Papildus SHERPA metodei ir arī tādas analīzes metodes kā kognitīvās kļūdas (TRACER), kognitīvā drošuma un kļūdu analīzes (CREAM) un cilvēka darbības analīzes metode (ATHEANA). Populārās HRA metodes ietver cilvēka kļūdas novērtēšanas un mazināšanas tehniku (HEART), cilvēka kļūdas prognozēšanas metodi (THERP) un veiksmes iespējamības indeksa metodi (SLIM). HRA un HEI metodes

176 Vaoderhaegen, F., Polet, P. (2000), Human risk assessment method to control dynamic situations. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 33, Issue 11, pp. 753–758.

177 Hsieh, M., Wang, E., Lee, W., etc. (2018). Application of HFACS, fuzzy TOPSIS, and AHP for identifying important human error factors in emergency departments in Taiwan. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Vol. 67, pp. 171–179.

178 French, S., Bedford, T., etc. (2011) Human reliability analysis: A critique and review for managers. *Safety Science*. Vol. 49, pp. 753–763.

179 Mandal, S., Singh, K., Behera, R. K., Sahu, S. K., etc. (2015). Human error identification and risk prioritization in overhead crane operations using HTA, SHERPA and fuzzy VIKOR method. *Expert Systems with Applications*. Vol. 42, pp. 7195–7206.

piedāvā pieeju, ar ko tiek modelēta cilvēka kļūdas ietekme uz sistēmas drošību.¹⁸⁰

HRA un *HEI* galvenās priekšrocības ir viegla lietojamība un iespēja veikt korekcijas, lai novērstu cilvēka kļūdas. Tomēr abas metodes zināmā mērā ierobežo tas, ka parasti to pamatā ir pētnieku zināšanas un viņu subjektīvs vērtējums. *HRA* metodes galvenais trūkums ir laika starpība no tās izstrādes brīža līdz faktiskajam lietojumam, un tas, ka vienmēr nepieciešams sākotnējais uzdevuma apraksts (piemēram, uzdevuma analīze). Neraugoties uz *HRA* ekspertu centieniem izstrādāt progresīvu cilvēka kļūdas iespējas novērtēšanas metodi un iespējamo seku analīzi, joprojām grūti prognozēt cilvēka uzvedību.

3.6. Kvantitatīvās riska novērtēšanas (*QRA*) metodes

Veicot riska novērtējumu ar šo metodi, ieskaitot statistisko metodi vai varbūtību, riska sekas (piemēram, bojāgājušo vai ievainoto cilvēku skaitu), kā arī šī rezultāta iespējamība un iespējamās varbūtības tiek izteiktas skaitliski. Ir veikti vairāki pētījumi par kvantitatīvā riska novērtēšanu, turklāt ķīmiskajā rūpniecībā šo metodi izmanto kopš 20. gadsimta 70. gadu vidus.¹⁸¹

Mūsdienās kvantitatīvās riska novērtēšanas metodes ir vienas no pasaulē populārākajām objekta bīstamības novērtēšanas metodēm. Interese par kvantitatīvu riska novērtējumu liecina par nepārtrauktu zināšanu līmeņa pieaugumu un tā lietojamību, lai racionāli vadītu bīstamības avotus, veidojot sistemātisku izpratni.¹⁸² Kvantitatīvas riska novērtēšanas procedūras pamatā ir bīstamības elementa apdraudējuma līmeņa noteikšana, veicot iespējamo risku modelēšanu, nosakot iespējamās avārijas cēloņus, piemēram, degvielas noplūdi no cauruļvada, kas var izraisīt ugunsgrēku, analizējot to iemeslus un iespējamās nelabvēlīgās sekas. Riska pakāpi skaitliski var noteikt, izmantojot mikrodaļiņu teorijas principus.

Informāciju par apdraudējuma risku parasti sniedz kvalitatīvu datu veidā, piemēram, augsts, vidējs vai zems risks. Bieži šādu informāciju ir grūti izmantot objektu specifikas dēļ, kā arī tāpēc, ka paaugstinātas bīstamības objekti atšķiras. Ir grūti paredzēt zaudējumu apmēru un iespējamās kompromisus, tāpēc ir nepieciešams cits rīks, ar kuru var skaitliski izteikt bīstamības pakāpi. *QRA* metode ir vienīgā pilnīgi skaitliskā metode. *RRO* vadībai informācija par kvantitatīvo risku bieži vien ir nepieciešama, lai novērtētu riska mazināšanā ieguldīto līdzekļu atdevi. Tas ir svarīgs nosacījums, izvēloties optimālo metodi un izstrādājot objekta darbības koncepciju, lai pēc iespējas samazinātu darbības cikla izmaksas.

180 Dallat, C., Salmon, P. M., Goode, N. (2019). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. Vol. 119, pp. 266–279.

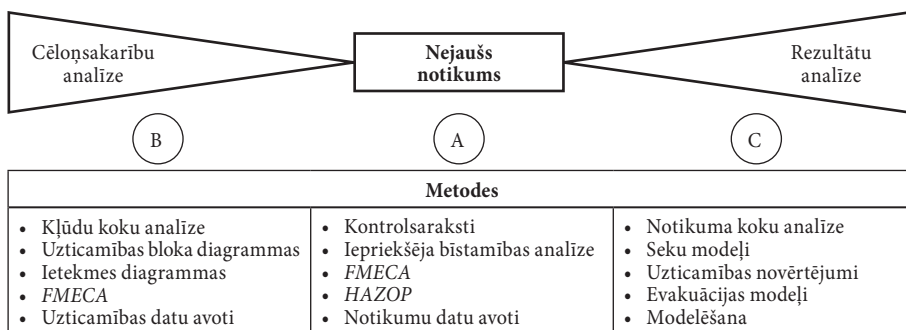
181 Khan, F. I., Abbasi, S. A. (1998). Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *J. Loss Prev. Process Ind.* Vol. 11 (4), pp. 261–277.

182 Zio, E., Aven, T. (2013). Industrial disasters: Extreme events, extremely rare. Some reflections on the treatment of uncertainties in the assessment of the associated risks. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 91, pp. 31–45.

QRA parasti ir trīs sastāvdaļas:¹⁸³

- 1) bīstamības analīze – nelabvēlīgas ietekmes varbūtības noteikšana; notikums, kas notiek noteiktā laika periodā;
- 2) neaizsargātības analīze – kaitējuma apjoma un nopietnības novērtējums esošai aizsargājama sistēmai;
- 3) seku analīze – negadījuma iespējamo seku novērtēšana.

QRA metodi parasti izmanto kopā ar kvalitatīvām riska novērtēšanas metodēm, to lietojums redzams 3.11. attēlā.



3.11. att. QRA metode.¹⁸⁴

QRA metodi veiksmīgi izmanto Nīderlandē, un tā ir aprakstīta “Violetajā grāmatā” (*Purple Book*).¹⁸⁵ Procedūras posmi:

- 1) sākotnējo notikumu identifikācija;
- 2) sākotnējo notikumu potenciālā biežuma noteikšana;
- 3) negadījumu scenāriju varbūtības noteikšana;
- 4) negadījumu scenāriju ietekmes apgabala noteikšana;
- 5) individuālā riska noteikšana;
- 6) sociālā riska noteikšana;
- 7) rezultātu analīze;
- 8) nepieciešamo riska mazināšanas pasākumu apraksts.

Individuālais risks (ekspozīcija gada laikā) raksturo cilvēka bojāejas vai nopietnas traumas iespējamību, atrodoties apdraudējuma tiešā tuvumā, ja persona tajā vietā atrodas 365 dienas gadā un 24 stundas diennaktī.¹⁸⁶ Individuālo risku aprēķina viena gada ilgai ekspozīcijai. Individuālo risku novērtē, izmantojot 3.4. formulu.

¹⁸³ Uddi, N., Ang, H. S. A. (2011). *Quantitative Risk Assessment for Natural Hazards*. Council on Disaster Risk Management (CDRM) Monograph No. 5. American Society of Civil Engineers, p. 7.

¹⁸⁴ Rausand, M., Hoyland, A. (2004). *System reliability theory. Models, Statistical methods, and applications*. 2nd edition. A John Wiley & Sons, inc., publication, p. 9.

¹⁸⁵ Uijt de Haag, P. A. M., Ale, B. J. M. (2005). *Guideline for Quantitative Risk Assessment, “Purple Book” CPR18E*, National Institute of Public Health and Environment (RIVM), den Hague. Part 1: Establishments.

¹⁸⁶ Benintendy, R. (2018). *Process Safety Calculations*. Elsevier, p. 607.

$$R_i = Q_p \times Q(A_i) \times f_k, \quad (3.4.)$$

kur Q_p – nosacīta traumu gūšanas varbūtība, notiekot avārijai;
 $Q(A_i)$ – nosacīta scenārija realizācijas varbūtība, īstenojoties loģiskās shēmas zaram (notikumu koks);
 f_k – varbūtība atrasties cilvēkam darba vietā (8 h dienā = 0,22; mazāk par 2 h dienā = 0,08).

Individuālā riska novērtējumam Lielbritānijā RRO rūpniecības nozarē izmanto Ešbi kritērijus, kas atspoguļo letāla iznākuma varbūtību gada griezumā. Šo kritēriju vērtības redzamas 3.9. tabulā.

3.9. tabula

Riska pakāpes¹⁸⁷

Riska pakāpe	Letāla gadījumu varbūtība, gadā	Pieņemamības pakāpe
1.	$> 10^{-3}$	Risks nav pieņemams
2.	10^{-4}	Risks pieņemams tikai īpašos gadījumos
3.	10^{-5}	Nepieciešams detalizēts pieņēmuma pamatojums
4.	$10^{-6} >$	Risks ir pieņemams

Sociālais risks attiecas uz varbūtību, ka avārijas rezultātā dzīvību var zaudēt noteikts cilvēku skaits. Izvērtējot sociālo risku, tiek noteikts, cik cilvēku var tikt pakļauti noteikta līmeņa nelabvēlīgai iedarbībai, un aprēķināts potenciāli iespējamo upuru skaits.¹⁸⁸

Sociāli ekonomiskais risks $R_{s.e.}$ raksturo kopējo cilvēku bojāejas gadījumu skaitu gada laikā uz 1000 cilvēkiem. Tas ir saistīts ar nepietiekamu ekonomiskās attīstības līmeni un dzīves līmeni. Sociāli ekonomiskais risks galvenokārt ir saistīts ar cilvēka dzīves līmeni. To var aprēķināt, izmantojot 3.5. vienādojumu.¹⁸⁹

$$R_{s.e.} = \frac{A}{\sqrt[3]{L}}, \quad (3.5.)$$

kur $A = 280$;

L – cilvēka ienākumi gada laikā ASV, dolāros.

Kolektīvais risks ir sagaidāmais ievainoto skaits, notiekot avārijai konkrētajā periodā.

Kvantitatīvā riska analīze ir ļoti laba riska noteikšanas metode, tomēr tai ir šādi trūkumi: izveidojamo modeļu sarežģītība; datu trūkums; rezultātu nenoteiktība; augsts nepieciešamo zināšanu līmenis, lai interpretētu un piemērotu rezultātus, kā

187 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 90. lpp.

188 Vadlīnijas rūpniecisko avāriju riska objektu izvietošanas minimālo drošības attālumu un teritorijas izmantošanas un apbūves ierobežojumu noteikšanai teritorijas plānošanas dokumentos. (2017). Rīga. 3. lpp.

189 Kozlitin, A. N. (2006). Razvitie teorii i metodov ocenki riskov dlja obespechenija promyshlennoj bezopasnosti obektov neftegazovogo kompleksa. Dissertacija. Ufa. p. 13.

arī pūles un izmaksas, turklāt šī metode ir laiktietlīga. QRA programmatūras izmaksas ir samērā augstas, aprēķini nav viegli pārskatāmi, un tā nav pietiekami elastīga, lai izpētītu dažādus scenārijus, turklāt preventīvās un aizsardzības iespējas ir ierobežotas.¹⁹⁰ Galvenie kvantitatīvo metožu trūkumi ir sarežģītība, daudzu pieņēmumu izmantošana (bieži atvieglo tehnoloģisko procesu) un sākotnējās informācijas nenoteiktība, kas bieži vien liek apšaubīt sasniegto rezultātu precizitāti,¹⁹¹ it īpaši, izmantojot pieņemama riska kritērijus.

Dž. E. Apostolakis (G. E. Apostolakis) (2004), kurš piedalījās kodolenerģijas rūpnīcu riska novērtējumos, publicēja rakstu “*How useful is quantitative risk assessment?*” (Cik noderīgs ir kvantitatīvais riska novērtējums?), kurā aprakstītas QRA priekšrocības, kā arī ierobežojumi un trūkumi. Raksta autors izceļ šādas priekšrocības: 1) vairāki tūkstoši scenāriju sniedz priekšstatu par iespējamām iekārtu darbības atteices režīmiem; 2) varbūtība palielina izpratni par iespējamām sarežģītām mijiedarbībām, piemēram, notikums–operators–iekārta; 3) ieinteresēto personu komunikācija; 4) integrēta metode inženierzinātņu, sociālo un humanitāro zinātņu jomā; 5) nenoteiktību izsaka kvantitatīvi, un nezināmais tiek determinēts; 6) tiek veicināta riska pārvaldība. Galvenie ierobežojumi: 1) pastāv cilvēka kļūdas iespējamība; 2) sākotnēji nekonstatējamās programmatūras neveiksmes.¹⁹² Raksta autors šo sarakstu veidojis no kodolreaktora drošības viedokļa, tomēr tas ir aktuāls jebkurā RRO, kur lieto bīstamas ķīmiskas vielas vai kur glabā vielas ar lielu enerģijas krājumu.

Zinātnieki T. Eivens un E. Zjo norāda, ka jaunākās QRA metodes, kas izstrādātas pēdējos gados, ir piemērotas sarežģītākām sistēmām un tehnoloģijām. Šīs jaunās metodes ietver Beijesa pārliecības tīklus, Petri tīklus un Montekarlo simulācijas rīkus.¹⁹³

3.7. Sistēmu analīzes riska novērtēšanas metodes

Termins “sistēma” ir viens no populārākiem terminiem dažādās disciplīnās. Patlaban pasaulē nav vienota sistēmas jēdziena skaidrojuma, katra teorija izmanto citu definīciju. Šajā darbā autori izmanto šādu termina “sistēma” definīciju: “Sistēma – savstarpēji saistītu, atkarīgu elementu kopums; veselums, kura daļas ir savstarpēji saistītas (pēc noteiktiem likumiem, principiem) un kam ir noteiktas funkcijas”.¹⁹⁴ No sistēmas jēdziena skaidrojuma izriet, ka galvenā sistēmas īpašība ir vienotība un veselums, ko tiek sasniegta ar noteiktām likumsakarībām, kas atkarīgas no sistēmas

190 Pasman, H., Rogers, W. (2013). Bayesian networks make LOPA more effective, QRA more transparent and flexible, and thus safety more definable! *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 26, pp. 434–442.

191 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 91. lpp.

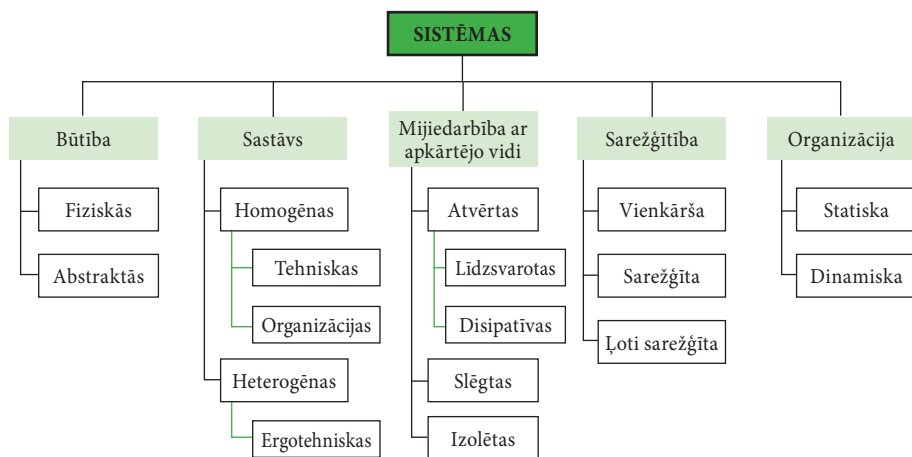
192 Apostolakis, G. E. (2004). How useful is quantitative risk assessment? *Risk Anal.* Vol. 24 (3), pp. 515–520.

193 Aven, T., Zio, E. (2014). Foundational issues in risk assessment and risk management. *Risky analysis*. Vol. 34 (7), pp. 1164–1172.

194 *Sistēma* [tiešsaiste]. Latvian Oxford Living Dictionaries [skatīts 2019. gada 2. jūnijā]. Pieejams: <https://lv.oxforddictionaries.com/skaidrojums/sistema>.

elementu savstarpējās sadarbības, kā rezultātā parādās jauna, tikai sistēmas ietvaros pastāvoša īpašība. Izjaucot elementu savstarpējo sadarbību, var notikt sistēmas sabrukums. Sistēmas robežas ir abstraktas, tās tās radušās cilvēka loģiskās domāšanas rezultātā. Sistēmai ir optimāla uzbūve, tas nozīmē, ka sistēmas tiek būvētas un tās funkcionē atbilstoši iepriekš noteiktiem optimāliem plāniem. Tātad sistēmas tiek veidotas, lai sasniegtu konkrētus mērķus un izpildītu noteiktus uzdevumus.

Jebkuru fizisku vai abstraktu elementu kopu var aprakstīt ar sistēmu teorijas terminiem. Lai identificētu sistēmu veidus, autori izmanto P. Belova (*П. Белов*) sistēmu sadales principus, kas aprakstīti grāmatā “Sistēmu analīze un bīstamo procesu modelēšana”. Sistēmas klasificē atbilstoši to principiem, un patlaban nav konkrētas sistēmu klasifikācijas pēc veida un grupas, taču parasti tiek izmantota šāda klasifikācija: būtība; sastāvs; sarežģītība; organizācija; mijiedarbība ar apkārtējo vidi. Atbilstoši kritērijam “Būtība” visas sistēmas ir iedalītas divās grupās – fiziskās (materiālās) un abstraktās (mākslīgās). Atbilstoši kritērijam “Sastāvs” pastāv homogēnas sistēmas, kas parasti ir vienveidīgas ar ļoti vāju struktūru, un heterogēnas sistēmas, kas veidojas, apvienojot atšķirīgus elementus. Homogēna sistēma var būt tehniska vai organizācijas sistēma, bet heterogēna – ergotehniska sistēma. Atbilstoši kritērijam “Mijiedarbība ar apkārtējo vidi” (apmaiņa ar enerģiju, vielām un informāciju) visas sistēmas var iedalīt atvērtās, slēgtās un izolētās. Atvērtās sistēmas apmainās ar visiem matērijas veidiem, slēgtās – tikai ar informāciju, savukārt izolētās – ne ar vienu jebkāda veida matēriju. Atvērtās sistēmas var būt līdzsvarotas vai disipatīvas. Sistēmai var būt trīs sarežģītības līmeņi – vienkārša, sarežģīta un ļoti sarežģīta. Pēdējais sistēmu klasifikācijas veids attiecas uz sistēmas organizāciju – statiska (pasīva) vai dinamiska (aktīva). Dažādās sistēmās tiek definēti ne tikai elementi, bet arī komponenti (apakšsistēmas), kas veido viendabīgu kopumu, kur apvienoti elementi ar vienādām funkcijām un resursiem. Tātad kvalificējoši sistēmas radītāji tiek noteikti, izmantojot sistēmu apvienojošo raksturojumu un integrālos komponentu rādītājus. Sistēmu klasifikācija atbilstoši P. Belova grāmatā apkopotajiem datiem redzama 3.12. attēlā.


3.12. att. Sistēmu klasifikācija.¹⁹⁵

Sarežģītas sistēmas darbojas organizēti, bez centrālas vadības.¹⁹⁶ Var būt grūti saprast šādas sistēmas loģiku un noteikt tās uzvedības modeli, kura pamatā ir komponentu mijiedarbība. Sarežģītā sistēmā ir objekts, kas pilda noteiktas funkcijas un ko var sadalīt elementos (komponentos), kas pilda noteiktas funkcijas un mijiedarbojas ar citiem elementiem.

Ir svarīgi noteikt sistēmas komponentu un elementu sastāvu. Sistēmas sastāva identificēšanai monogrāfijas autori izmanto V. Čerņišova sistēmas sastāvu, kas aprakstīts grāmatā “Sistēmu teorija un sistēmu analīze”. Pirmā sistēmas sastāvdaļa ir elements, kas ir sarežģīta veseluma jeb sistēmas sastāvdaļa. Sistēma ietver savstarpēji saistītus elementus. Elements ir nedalāma sistēmas daļa, kas spēj darboties patstāvīgi. Elementu veselumu var aprakstīt, izmantojot 3.6. formulu.

$$A = \{a_i\}, i = 1, \dots, n, \quad (3.6.)$$

kur a_i – i sistēmas elements;

n – elementu skaits sistēmā.

Katru elementu izsaka ar T konkrētām īpašībām, Z_{i1} , Z_{im} (svars, temperatūra utt.), kas definē to konkrētā sistēmā.

Nākamā sistēmas sastāvdaļa ir sakari, kas nosaka viena elementa atkarību no citu šīs sistēmas elementu īpašībām. Lai analizētu elementu mijiedarbību, ir jāatrod to savstarpējā saistība, ņemot vērā elementu īpašības.

Vēl viena sistēmas sastāvdaļa ir mijiedarbība – tas nozīmē, ka starp elementiem pastāv likumsakarības un tie savstarpēji mijiedarbojas. P. Štainbuhs (*P. Steinbuch*), analizējot sistēmu, iedala elementus, sakarus un sistēmas robežas un uzsver atšķi-

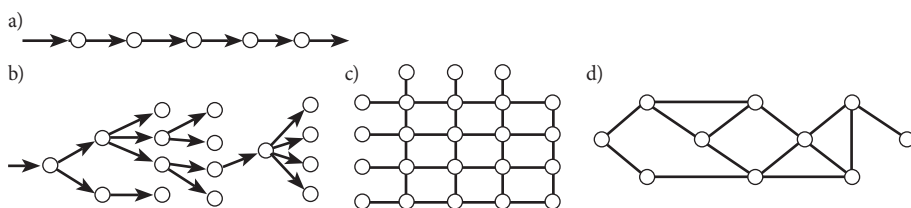
195 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 92. lpp.

196 Ottino, J. M. (2004). Engineering complex systems. *Nature*. Vol. 427 (6973), pp. 399–399.

rību starp sistēmu, apakšsistēmu un sistēmas līmeņiem.¹⁹⁷ Sistēmas struktūra ir elementu sakaru kopums.¹⁹⁸

Jebkurai sistēmai ir hierarhiska uzbūve, kas definē sistēmas attiecības ar apkārtējo vidi, virssistēmu un apakšsistēmām. Vienā līmenī sistēma ir elements, bet zemākajā līmenī tā var būt sistēma. Tātad sistēma var ietvert apakšsistēmas, bet sistēma, kurā apvienotas vairākas sistēmas, attiecībā uz zemākajām sistēmām ir virssistēma.

RRO kā sistēmu ļoti labi var attēlot grafiski. Struktūras grafiki redzami 3.13. attēlā, kur: a) lineārā struktūra; b) koka veida struktūra; c) matricas veida struktūra; d) tīkla veida struktūra. Atkarībā no ražošanā izmantotajām tehnoloģijām tiek izvēlēta tehnoloģisko iekārtu savstarpējās iedarbības struktūra. Struktūra raksturo RRO tehnoloģiskās sistēmas iespējamo organizāciju un elementu mijiedarbību. Izmantojot grafikus, ļoti labi var attēlot RRO elementa savstarpējo atkarību un vadīšanas procesu (3.13. att.).



3.13. att. Struktūras grafiku veidi.

Viens no sistēmas analīzes instrumentiem, ko 21. gadsimta sākumā izveidoja N. Levesone (*N. Leveson*), ir sistēmu teorētisko procesu analīze (STPA). Mūsdienās sociāli tehniskās sistēmas pamatā ir attīstības procesā esošas kompleksas tehnoloģiskās, cilvēciskās un organizācijas sistēmu komponentu metodes. STPA veic divos posmos, un tās mērķis ir identificēt bīstamības scenārijus, kas var radīt apdraudējumu, un to izmanto, lai noteiktu drošības sistēmas ierobežojumus.¹⁹⁹ STPA pamatā ir sistēmas teorētisko negadījumu modelis un procesiem (*STAMP*) izstrādātā analīzes metode. Galvenā atšķirība no *HAZOP* un *FMEA* ir tā, ka tās pamatā ir sistēmu un vadības teorijas un ka tā galvenokārt vērsta uz vertikālu vadības struktūru un atgriezenisko saiti, savukārt *HAZOP* un *FMEA* pamatā ir drošības teorija. Pamatojoties uz sistēmu teoriju, *STAMP* paplašina avārijas iespējamo iemeslu izpēti, tāpēc tajā var iekļaut sarežģītākus analizējamus faktorus nekā citās novērtēšanas metodēs (atteices analīze un iespējamo kļūžu analīze). Izmantojot STPA, var apzināt daudzus sarežģītus negadījumu iemeslus, ieskaitot noteikumu trūkumu organizācijās, projektēšanas kļūdas, cilvēka uzvedību, kā arī vairāku komponentu mijiedarbību un komponentu

197 Steinbuch, P. (2001). *Logistik*. Berlin: Herne Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, p. 18.

198 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 93. lpp.

199 Dakwat, A. L., Villan, E. (2018). System safety assessment based on STPA and model checking. *Safety Science*. Vol. 109, pp. 130–143.

darbības atteici.²⁰⁰

STPA analīzi tiek veikta vairākos posmos, kas veido vienotu sistēmu. Vispirms tiek izvērtēts abstrakcijas augstākais līmenis, analīzes rezultātā iegūstot detalizētākus datus un izskatot atsevišķus elementus. Modeļu procesos jāiekļauj informācija par esošo un nepieciešamo kontrolējamas sistēmas procesu stāvokli un nepieciešamajiem koriģēšanas mehānismiem. Šo metodi var izmantot kopā ar kvantitatīvā riska novērtēšanas metodi.²⁰¹

Saskaņā ar N. Levesones teoriju STAMP negadījumu analīzei ir deviņi posmi.

1. Ar zaudējumu saistītu sistēmas bīstamības risku identificēšana.
2. Drošības sistēmas prasību un ierobežojumu izveide saistībā ar apdraudējumu noteikšanu.
3. Vadības struktūras dokumentēšana, lai kontrolētu bīstamību un īstenotu noteiktos drošības sistēmas ierobežojumus.
4. Galveno zaudējumu izraisīto notikumu identificēšana.
5. Zaudējumu analīze fiziskās sistēmas līmenī.
6. Augstākā līmeņa kontroles struktūras analīze.
7. Vispārējo koordinācijas un komunikācijas zaudējumu izpēte.
8. Sistēmas dinamikas un sistēmas izmaiņu kontrole laika gaitā.
9. Priekšlikumu sagatavošana.²⁰²

Par STPA metodes trūkumiem var uzskatīt to, ka tā nav pietiekami formāla un rezultātus ietekmē cilvēka (pētnieka) pieredze.²⁰³ Analizējot zinātniskos literatūras avotus, var konstatēt, ka šai metodei ir daudz priekšrocību, tomēr valda uzskats, ka izmantojamās metodes un instrumenti nav piemēroti reālam lietojumam.²⁰⁴ Lai šo metodi atbilstoši novērtētu, tā jālieto reālā situācijā, veicot notikušu negadījumu izmeklēšanu un analizējot sniegtās informācijas precizitāti. Metodei ir arī citi trūkumi – tā neņem vērā iekārtu drošības pakāpi un iespējamo darbības atteices varbūtību.²⁰⁵ Vairākos pētījumos, piemēram, zinātnieka F. Belmontes (*F. Belmonte*) pē-

200 Thomas, J., Suo, D. (2015). STPA-based method to identify and control feature interactions in large complex systems. *Procedia Engineering*. Vol. 128, pp. 12–14.

201 Meng, X., Chen, G., Shi, J., Zhu, G., Zhu, Y. (2018). STAMP-based analysis of deepwater well control safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 55, pp. 41–52.

202 Levesons, N. (2012). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Cambridge, Mass: The MIT Press. p. 349.

203 Dakwat, A. L., Villan, E. (2018). System safety assessment based on STPA and model checking. *Safety Science*. Vol. 109, pp. 130–143.

204 Underwood, P., Waterson, P., Braithwaite, G. (2016). Accident investigation in the wild – A small-scale, field-based evaluation of the STAMP method for accident analysis. *Safety Science* Vol. 82, pp. 129–143.

205 Meng, X., Chen, G., Shi, J., Zhu, G., Zhu, Y. (2018). STAMP-based analysis of deepwater well control safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 55, pp. 41–52.

tījumā par darbības atteices koku,²⁰⁶ ir salīdzinātas sistēmas analīzes metodes ar tā dēvētās nesistēmas analīzes metodēm, secinot, ka, izmantojot nesistēmas metodi, var ļoti labi aprakstīt iepriekš notikušus negadījumus, savukārt sistēmas analīzes metode nodrošina padziļinātu sistēmas dinamisko un sarežģīto uzvedību.

Funkcionālās analīzes rezonanses metode (*FRAM*), kuras pamatā ir sistēmas analīzes metode, arī izmanto jauno priekšstatu par sistēmas rezultātiem un funkcionālās rezonanses analīzi, kas galvenokārt ir fizisko viļņu teorija.²⁰⁷

FRAM metode ir vērtīgs instruments ražošanas drošības sistēmas darbības novērtēšanai un darbības detalizētai izpētei.²⁰⁸

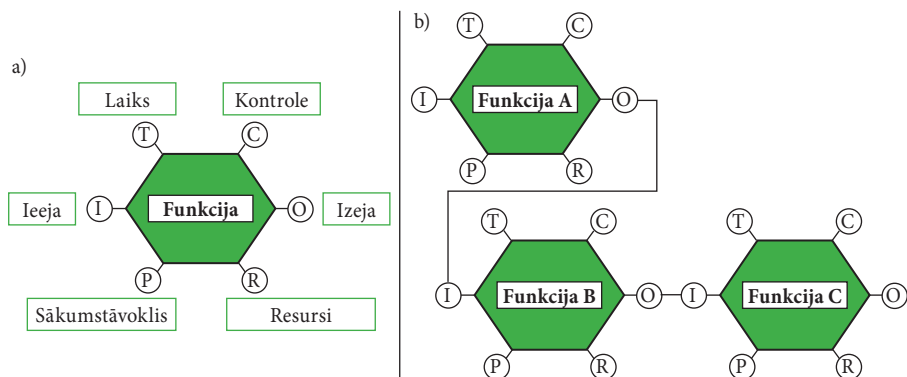
FRAM metodei ir četri posmi.

1. Galveno sistēmu funkciju identificēšana un novērtēšana. Izvērtējamo sistēmu jāiedala funkcionālajās sastāvdaļās, ieskaitot tehnisko, operatīvo un organizatorisko daļu, kas nodrošina sistēmas ikdienas darbību. Funkcijas raksturo seši faktori: I – ieeja; O – izeja; P – sākumstāvoklis; R – resursi; T – laiks; C – kontrole. Kopējā *FRAM* sistēmas analīzes uzbūve un funkcionālā sistēmas sadarbība starp moduļiem redzama 3.14. attēlā. Būtībā tā ir kvalitatīva tekstuālā sistēmas modeļa apskate, lai novērtētu sistēmas darbību ikdienas režīmā.

206 Belmonte, F., Schoen, W., Heurley, L., Capel, R. (2011). Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: an application to railway traffic supervision. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 96 (2), pp. 237–249.

207 Anvarifara, F., Voorendt, M. Z., Zevenbergena, C., Thissen, W. (2017). An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk analysis of multifunctional flood defences in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 158, pp. 130–141.

208 Smith, D., Veitch, B., Khan, F., Taylor, R. (2017). Understanding industrial safety: Comparing Fault tree, Bayesian network, and FRAM approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 45, pp. 88–101.



3.14. att. FRAM posmu grafiskais attēlojums, funkcionālā sistēmas sadarbība starp moduļiem.²⁰⁹

2. Katras funkcijas izmaiņu iespējamības novērtējums. Šajā posmā galvenie elementi ir funkcionalitātes izmaiņu iespējamība, iemesli un rezultāti. Tiek noteikti iespējamie izmaiņu iemesli un definēti atsevišķu sastāvdaļu izmaiņu veidi. Sastāvdaļu izmaiņas var būt saistītas ar pavērsieniem kādā no šiem posmiem.
3. Vairāku funkciju izmaiņu iespējamības novērtējums un izpēte. Tās ietvaros, izmantojot reālus scenārijus, tiek identificētas likumsakarības, kas sekmē izmaiņas, ko var izraisīt nelabvēlīgas sekas, atkarībā no katra procesa scenārija. Katra izskatītās sistēmas daļas organizācijas funkcionāla rezonanse uzskatāma par apdraudējuma brīdinājuma signālu.
4. Preventīvo pasākumu definēšana. Funkcionālais modelis, ko izmanto nepieciešamās stratēģijas identificēšanai, lai samazinātu un novērstu apdraudējumu un likvidētu iespējamās nekontrolējamās izmaiņas.

Šī metode ir samērā jauna, un tā ir jāpildinveido, it īpaši attiecībā uz vadības principiem, lai izstrādātu scenārijus un iekļautu nepieciešamās sastāvdaļas.²¹⁰ Šīs metodes galvenais trūkums ir tas, ka nevar noteikt negadījuma rašanās kvantitatīvo varbūtību. N. Levesone norāda, ka nav strikti pieņemtu zinātnisko metožu, kā noteikt precīzu vai subjektīvu informāciju, izmantojot vēsturiskos datus vai gadījumus, kad speciāli tiek pieļautas sistēmas darbības kļūdas. Zinātnieki novērtējumam parasti izmanto inženiertehniskos risinājumus, kuros datus iegūst nenosakāmā veidā, bieži

209 Anvarifara, F., Voorendt, M. Z., Zevenbergena, C., Thissen, W. (2017). An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk analysis of multifunctional flood defences in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 158, pp. 130–141.

210 Anvarifara F., Voorendt, M. Z., Zevenbergena C., Thissen, W. (2017). An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk analysis of multifunctional flood defences in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 158, pp. 130–141.

vien politisku vai netehnisku faktoru ietekmes rezultātā.²¹¹ Varbūtību iedala frekvenču varbūtībā (modulējot variācijas) un subjektīvā varbūtībā (zināšanās balstīta).²¹²

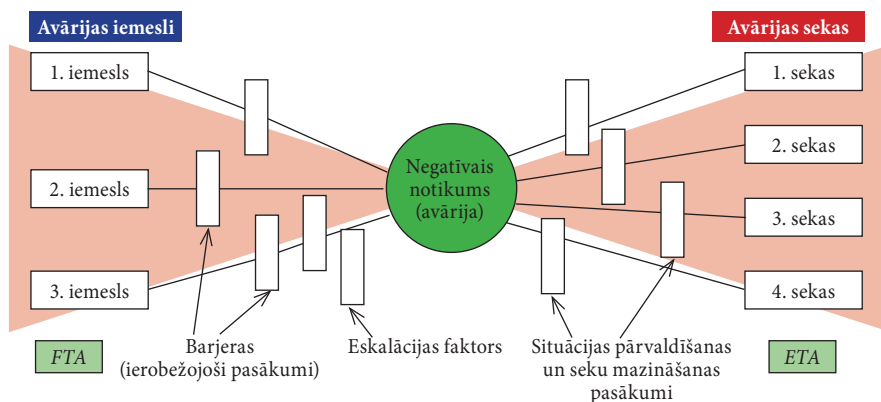
3.8. “Bow-Tie” riska analīze, jauktā metode

Riska analīzes shematiskais modelis no iemeslu identifikācijas līdz iespējamo seku analīzei tiek saukts par “kaklasaiti-auriņu” (angļu val. – *Bow-Tie*), galvenā šīs metodes īpašība ir barjeru identifikācija starp iemeslu daļu un seku daļu.

Metodi var izmantot, kad ir grūti veikt FTA analīzi vai nepieciešams izveidot barjeras, lai nepieļautu negadījumu vai izprastu iemeslus un sekas. To ļoti labi var parādīt, izmantojot vizualizāciju, ko piedāvā šī metode. Ir divi galvenie šīs metodes veidi: kvantitatīvie “auriņi” un kvalitatīvie “auriņi”. Lielākajā daļā kvantitatīvo “auriņu” tiek izmantots FTA koks kopā ar ETA notikumu koku un barjerām riska aprēķināšanai.

Kvantitatīvā “auriņa” struktūra atšķiras no FTA un ETA koka, lai arī tās saturs ir līdzīgs. Kvalitatīvais “auriņš” izmanto vienkāršākus cēloņu-secu scenārijus ar šķēršļiem, lai informētu par risku.²¹³

“Tauriņa” diagrammas analīze ir viegli saprotama un prasa minimālus resursus, tāpēc šī metode tiek izmantota plaša spektra uzdevumu risināšanai. Metodi izmanto, ja pastāv neatkarīgi un ārkārtīgi skaidri ceļi konkrētu avārijas risku izraisīto notikumu attīstībai. “Tauriņa” vizualizācijas piemērs redzams 3.15. attēlā.



3.15. att. “Kaklasaiti-auriņš” diagrammas izveides elementi.

Analīzi nepieciešams veikt secīgi.

1. Noteikt negadījumu, ko nepieciešams analizēt (negatīvais notikums – 3.15. at-

211 Leveson, N. (2012). *Engineering a safer world: systems thinking applied to safety*. Cambridge: The MIT Press. p. 320.

212 Aven, T. (2013). How to define and interpret a probability in a risk and safety setting. Discussion paper with G. Reniers. *Safety Science*. Vol. 51 (1), pp. 223–231.

213 Ruijter, A., Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review, *Safety Science*. Vol. 88, pp. 211–218.

tēla diagrammas vidū). Visas līnijas saplūst centrālajā notikumā, kas parasti tiek definēts tad, kad tiek zaudēta tehnoloģisko procesu kontrole, galvenais notikums, piemēram, reaktora avārija.²¹⁴ Diagrammas centrā atrodas punkts, kurā savienojas visi attiecīgie avārijas iemesli un sekas. Var konstatēt, ka ceļi no vairākiem neatkarīgiem notikuma iemesliem un to sekām veido vienu galveno punktu, kas ir “kopīgais mezgls”.

2. Noteikt negadījuma iemeslus (avotus, bīstamību – avārijas iemesli).
3. Identificēt bīstamības attīstības mehānismu.
4. Noteikt līniju, kas atdala iemeslu no notikuma un ļauj izveidot *Bow-Tie* kreiso daļu. Papildus var identificēt eskalācijas faktorus, kas var izraisīt notikumu.
5. Uzzīmēt vertikālas līnijas (barjeras), kas samazina negadījuma iestāšanās iespēju. Ja noteikti eskalācijas faktori, papildus var atzīmēt barjeras, kas nepieļauj notikuma eskalāciju. Būtisks diagrammas elements ir barjeru izmantošana. Abās tauriņa pusēs ir novietotas barjeras, kas domātas, lai novērstu procesa kontroles zaudēšanu kreisajā pusē un mēģinātu samazināt iespējamās negatīvās sekas labajā pusē.
6. Nepieciešams identificēt *Bow-Tie* kreisās puses iespējamās negadījuma sekas un tās savienot ar centrālo negadījumu.
7. Nepieciešams identificēt iespējamās barjeras seku virzienā.

Kvantitatīvo novērtējumu *Bow-Tie* ietvaros veic, izmantojot *FTA* un *ETA* metodes.

***Bow-Tie* metodes priekšrocības**

1. Grafisks problēmas attēlojums.
2. Metode norāda bīstamības pārvaldīšanas faktorus, kas novērš vai mazina bīstamību, kā arī sniedz iespēju efektīvi novērtēt katru apdraudējumu un iespējamo seku līmeni.
3. Metodes izmantošanai nav nepieciešami augsti kvalificēti speciālisti.

***Bow-Tie* metodes trūkumi**

1. Metode neatļauj attēlot iemeslu kopas, kas notiek vienlaikus.
2. Metode sarežģītu situāciju attēlo ļoti vienkāršoti.

Pēc tauriņa diagrammas sastādīšanas nepieciešams dokumentēt riska novērtējumu. To vislabāk izdarīt, izmantojot tabulu. Piemērs redzams 3.10. tabulā. Tabula sniedz iespēju riska novērtējumu pārskatīt katru gadu vai pēc nepieciešamības, kā arī detalizēti izprast analīzes saturu.

214 Ruijter, A., Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review, *Safety Science*. Vol. 88, pp. 211–218.

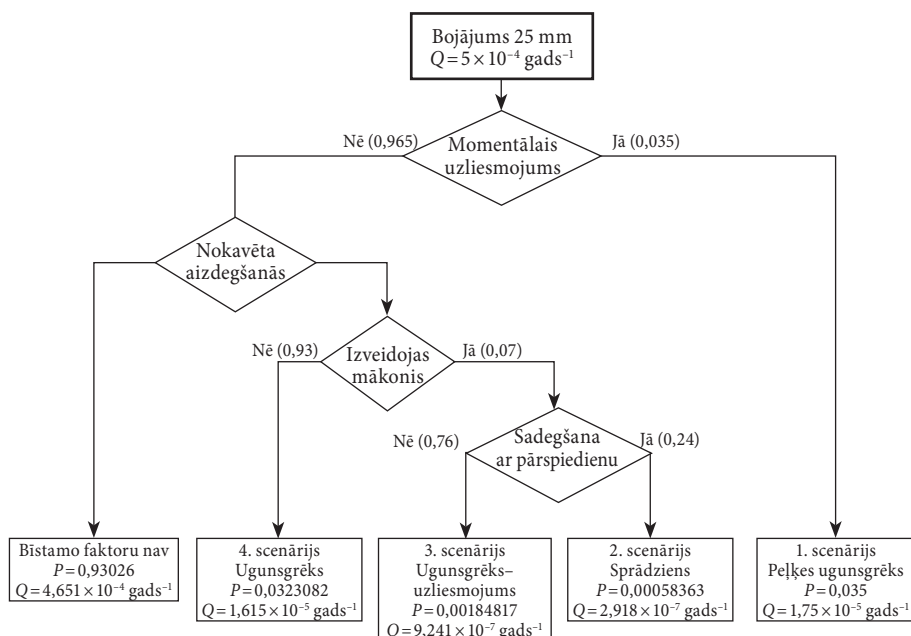
Riska analīzes dokumentēšana

1. shēma. Negadījuma apraksts						
Bīstamība un negadījuma iestāšanās varbūtības analīze						
Notikuma iemesli	Pasākumi bīstamības mazināšanai, barjeras	Barjera: jaunā vai esošā	Barjeras rezultāts: A – augsts; V – vidējs; Z – zems	Atbildīgais par barjeras drošību		
1. iemesls (apraksts)						
	1. pasākums					
	2. pasākums					
	3. pasākums					
2. iemesls (apraksts), utt.						
Negadījuma seku analīze, kā samazināt negatīvo ietekmi						
Sekas	Pasākumi, lai nepieļautu vai samazinātu kaitīgās sekas	Barjera: jaunā vai esošā	Barjeras rezultāts: A – augsts; V – vidējs; Z – zems	Atbildīgais par barjeras drošību	Esošais riska līmenis	Mazināšanas pasākumi

6. piemērs

Novērtēt risku, izveidojot notikuma koku rezervuāra ar etanolu avārijai ar nosacījumu, ka izveidojas 25 mm bojājums.

Risinājums. Avārijas varbūtība ir 5×10^{-4} gadā. Kopumā var paredzēt piecus notikuma scenārijus, no kuriem visiespējamākais scenārijs ir avārijas likvidācija, bīstamo faktoru nav, notiek ķīmiskās vielas iztvaikošana un avārijas likvidācija.



3.16. att. Notikuma koks. 25 mm 100 m³ rezervuāra bojājums.

Secinājums. Līdz vissliktākajam scenārijam ir visgarākā ķēde, tāpēc šo scenāriju realizācija ir ar zemāku varbūtību un sliktāko scenāriju var uzskatīt par ļoti retu.

7. piemērs

Nepieciešams novērtēt risku, kas saistīts ar noliktavās esošo transportlīdzekļu un tehnikas iespējamo avāriju. Nepieciešams izveidot tauriņa diagrammu.

Tiek izveidots tauriņš (riskā scenārijs 3.17. att.), kur kā galvenais notikums tiek identificēts “Tehnikas/transporta avārija”. Nepieciešamas noteikt avārijas iemeslus: 1. iemesls – tehnikas sadursme; 2. iemesls – tehniska kļūme. Pēc iemeslu identifikācijas nepieciešams noteikt barjeras, kas jāuzzīmē uz līnijām, kas savieno iemeslus ar galveno notikumu. Lai samazinātu avārijas 1. iemeslu noliktavā, ir izvietotas septiņas barjeras.

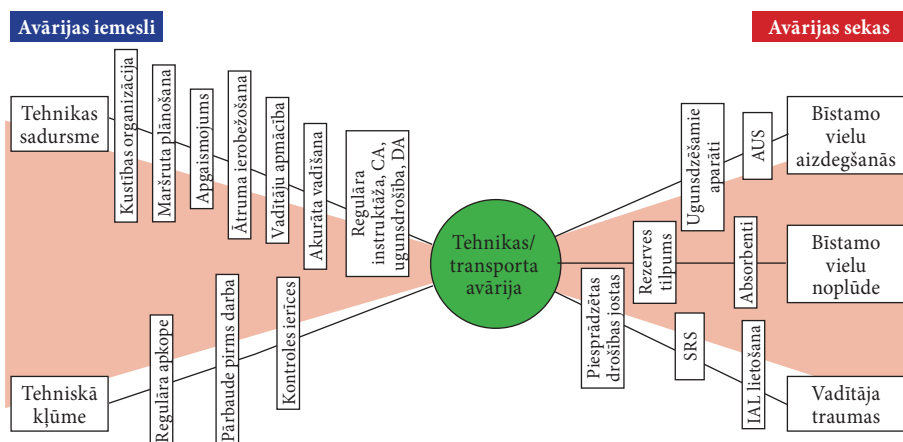
1. Izstrādāta kustības organizācijas shēma.
2. Plānots izkraušanas maršruts.
3. Noliktava ir izgaismota.
4. Noliktavas teritorijā ir noteikts ātruma limits.
5. Veikta vadītāju apmācība.
6. Vadītāji cenšas akurāti vadīt tehniku, sekot situācijai noliktavā.
7. Notiek regulāras apmācības darba aizsardzībā utt.

Pēc šāda paša algoritma jāizveido barjeras avārijas 2. iemeslam.

Nepieciešamas noteikt avārijas sekas: 1. sekas – bīstamo vielu aizdegšanās; 2. se-

kas – bīstamo vielu noplūde; 3. sekas – vadītāja traumas. Pēc avārijas seku identificēšanas tās jāsavieno ar galveno notikumu, izmantojot līnijas, un jāizvieto barjeras, ar kurām ir iespējams mazināt notikuma sekas.

Parasti, ja ir notikusi avārija, kuras rezultātā notikusi transportlīdzekļa aizdegšanās, darbinieku iespējas likvidēt degšanu ir diezgan liela, jo visi transportlīdzekļi RRO vienmēr ir aprīkoti ar ugunsdzēsības aparātiem, kā arī iekšējās ir uzstādīta automātiskā ugunsgrēka atklāšanas sistēma. Darbinieku efektivitāte un spēja ātri nodzēst ugunsgrēku saviem spēkiem atkarīga no degšanas platības lieluma. Transporta avārija, kas saistīta ar bīstamo vielu noplūdi, noliktavā parasti saistīta ar situāciju, kad tehniskais līdzeklis iebrauc stalažās vai apgāžas krava uz paletes, kā rezultātā var būt bojāti atsevišķi iepakojumi un notikt bīstamas vielas noplūde. Lai mazinātu vielas noplūdes sekas, var izmantot noliktavā izvietotu absorbentu, savākšanas inventāru un speciālās rezerves tvertnes. Avārijas rezultātā darbiniekam, kas apkalpo tehniku, var iestāties traumatisma risks, kas saistīts ar fizisku traumēšanos.



3.17. att. Transporta avārija.

Secinājums. Ir izveidota tauriņa diagramma, kas parāda avārijas notikuma attīstību un to, kādi pasākumi ir veikti, lai nepieļautu negatīvo notikumu, kā arī mazinātu negatīvās sekas, ja notikums tomēr noticis. Pēc diagrammas izveides tiek aizpildīta riska novērtējuma tabula.

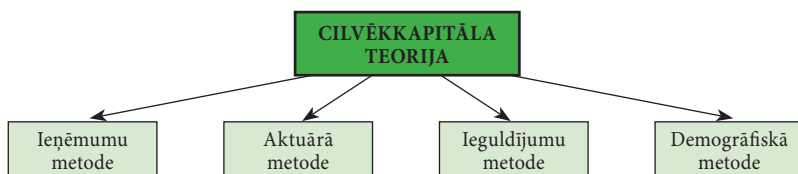
4. EKONOMISKO UN VIDES ZAUDĒJUMU NOVĒRTĒŠANAS METODES

4.1. Cilvēka veselībai nodarītā kaitējuma novērtēšanas metode

Cilvēka dzīvības vērtības noteikšana ir sarežģīta starpdisciplināra problēma, un tās risinājums ir nepieciešams, lai pieņemtu valsts normatīvos aktus kompensāciju jomā, kā arī ģimenēm, kas nelaimes gadījuma rezultātā zaudējušas ģimenes locekli. Tas ir nepieciešams arī tāpēc, lai izstrādātu pamatotus drošības pasākumus iedzīvotājiem un nodrošinātu efektīvu dzīvības apdrošināšanas un veselības aizsardzības sistēmas darbību. Nosakot cilvēka dzīvības vērtību, var noteikt, kādu naudas summu valsts ir gatava ieguldīt, lai paaugstinātu drošību, samazinātu bīstamības faktorus un mazinātu tehnogēnās vides apdraudējumus. Pašlaik Latvijā nav vienotas cilvēka dzīvības vērtības novērtēšanas metodikas.

Ekonomisko zaudējumu, kas saistīti ar cilvēka organismu ietekmējošiem tehnogēnās vides faktoriem, novērtēšanai var izmantot vairākas metodes. Viena no pasaulē visbiežāk lietotajām ir **cilvēkkapitāla teorija**, kurā ir definētas četras galvenās metodes (4.1. att.).

Ieņēmumu metode. Cilvēka dzīvības vērtība tiek noteikta atbilstoši viņa ieņēmumiem. Tās pamatā ir statistiski vidējā cilvēka dzīvības vērtība, kas tiek noteikta pēc ieguldījumiem, kas nepieciešami, lai nodrošinātu dzīvi visā cilvēka dzīves laikā. Šo vērtību veido cilvēka izdevumi savas dzīves vajadzību nodrošināšanai un valsts izdevumi dažādos cilvēka dzīves posmos.²¹⁵ Metodei tiek izmantots IKP rādītājs uz vienu iedzīvotāju, to veiksmīgi lieto Dānijā un Vācijā, bet kopā ar citām metodēm – ASV, Austrālijā, Austrijā un Beļģijā.²¹⁶



4.1. att. Cilvēka dzīvības vērtības novērtēšanas metodes (avots: autoru veidots).

Ar **aktuāro metodi** var noteikt cilvēka dzīvības vērtību, ņemot vērā vidējos ieņēmumus un IKP uz vienu iedzīvotāju, izmantojot matemātiskas formulas un dzīvības

215 Shultz, T. (1968). *Human Capital*. In: Sills, D. L. (ed.) *International Encyclopedia of the Social Sciences* New York: Macmillan Free Press., Vol. 2, pp. 278–286.

216 Urbans, M. (2021). *Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos*. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 98. lpp.

zaudējuma varbūtību.

Ar **ieguldījumu metodi** tiek noteikta cilvēka vidējā dzīvības vērtība kā ieguldījumu, kas nepieciešami, lai atražotu cilvēku izdevumus par izglītību, veselības aprūpi, darbaspēka sagatavošanu un citus izdevumus, summa.

Ar **demogrāfisko metodi** tiek noteikta cilvēka dzīvības vērtība, pamatojoties uz materiālo labumu bilanci, kas tiek saražoti un patērēti noteiktā cilvēka vecumā. Tiek novērtēta arī vecuma grupas rentabilitāte, spēja uzkrāt līdzekļus un sagatavot materiālo pamatu nākamajām paaudzēm.

Sociāli ekonomiskajos pētījumos bieži minēts tiek jēdziens “vidēji statistiskā cilvēka dzīvības izmaksas” jeb dzīvības vērtība (angļu val. – *Value of a Statistical Life; VSL*).²¹⁷ Statistisko dzīvības vērtību bieži izmanto, lai novērtētu nāves riska samazināšanas ieguvumus.²¹⁸

Pamatojoties uz iepriekš tekstā sniegto informāciju, lai novērtētu cilvēka priekšlaicīgas nāves rezultātā radītos materiālos zaudējumus sabiedrībai un mājsaimniecībām, tiek izmantoti objektīvi ekonomiskie rādītāji. Ar šīs metodes palīdzību dzīvības vērtība tiek novērtēta kā summārie zaudējumi IKP kontekstā saistībā ar ĀS RRO, kā rezultātā iestājusies vidēji statistiskā cilvēka nāve. Tam tiek izmantota 4.1. formula.²¹⁹

$$VSV = \sum_{i=k}^n PIKP_i, \quad (4.1.)$$

kur VSV – vidējā statistiskā cilvēka dzīvības vērtība;

$PIKP_i$ – prognozējamā vērtība IKP uz vienu iedzīvotāju i -gadā, ņemot vērā pastāvīgu cenu līmeni (neskaitot inflāciju);

k – pirmais gads pēc cilvēka priekšlaicīgas nāves;

n – paredzamais dabīgas nāves iestāšanās gads, pieņemot, ka cilvēks nodzīvotu vidēji sagaidāmo dzīves ilgumu (vidēji vai atkarībā no dzimuma), kur starpība starp n un k ir gadu skaits, kas zaudēts letāla iznākuma rezultātā.

Pamatojoties 4.1. formulu, zinot konkrēta cilvēka vecumu letāla iznākuma brīdī, ir iespējams noteikt zaudējumus sabiedrībai. Var novērtēt cilvēka dzīvības vidējo vērtību – vidējos zaudējumus sabiedrībai vidēji statistiskā cilvēka nāves gadījumā, kur k ir nākamais gads, savukārt lielumu n aprēķina, izmantojot 4.2. formulu.²²⁰

$$n = k + \alpha - \beta, \quad (4.2.)$$

kur α – vidēji sagaidāmais cilvēka mūža ilgums nākamajā gadā;

β – vidējais valsts iedzīvotāju vecums nākamajā gadā.

217 *Best Practice Regulation Guidance Note Value of statistical life*. (2014). [Tiešsaiste]. Australian government Department of the Prime Minister and Cabinet [skatīts 2018. gada 1. septembrī]. Pieejams: https://www.pmc.gov.au/sites/default/files/publications/Value_of_Statistical_Life_guidance_note.pdf.

218 Viscusi, W. (2003). The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world, *Journal of Risk and Uncertainty*. Vol. 27 (1), pp. 5–76.

219 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 99. lpp.

220 Urbans, M., Malahova, J., Jemeljanovs, V. (2020) Methodology for calculating adverse health effects in Latvia. Published by VGTU Press, pp. 195–201.

Dati, kas nepieciešami, lai noteiktu cilvēka dzīvības vidējo vērtību, izmantojot 4.2. formulu, sniegti 2. pielikumā. Lai noteiktu prognozējamo IKP vērtību Latvijā pēc 2018. gada, tika izmantots nosacījums, ka IKP pieaugums būs 2,5 % katru gadu, jo atbilstoši Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes (CSP) datiem, kas iegūti, izmantojot Eurostat datus laikposmā no 2014. gada līdz 2018. gadam, tas svārstījās no 1,8 % līdz 2,5 %, un kopumā IKP ir tendence pieaugt.²²¹ Saskaņā ar 2018. gada datiem kopējais iekšzemes kopprodukts uz vienu iedzīvotāju un uz vienu nodarbināto ir 14 704 EUR,²²² iedzīvotāju vidējais vecums ir 42,4 gadi, paredzamais mūža ilgums – 74,6 gadi.

Izmantojot 3.2. formulu, monogrāfijas autori noteica cilvēka dzīvības vidējo vērtību Latvijā 2020. gadā, izmantojot 2018. gada statistikas datus: $n = 2020 + 74,6 - 42,4 = 2052$. Tātad novērtējums jāveic līdz 2052. gadam (detalizēts novērtējums – 2. pielikumā). Var secināt, ka cilvēka dzīvības vidējā vērtība ir 774 854,3 EUR. Rezultātā konstatēts, ka apskatīto metodi var piemērot, novērtējot ekonomiskos zaudējumus, kas saistīti ar letālu iznākumu RRO avārijas gadījumā.

Monogrāfijā īsumā apskatīta metode, kas ļauj novērtēt zaudējumus atkarībā no rādītāja "Cilvēkdienas", kas nepieciešamas cietušā cilvēka rehabilitācijai, lai atgrieztos darbā. Starptautiskās Darba organizācijas konvencija Nr. 102 (Konvencija par sociālās nodrošināšanas minimālajām normām; 1952)²²³ paredz izmaksāt kompensācijas cilvēkiem darbaspējas, dzīvības un ienākumu zaudējuma gadījumā, ko izraisījis kāds no šiem cēloņiem: slimība; nelaimes gadījums; darba trauma; arodslimība; apgādnieka nāve; vecums un citi cēloņi. Atbilstoši Starptautiskās Darba organizācijas rekomendācijām ar viena vidēji statistiskā cilvēka nāvi saistītie zaudējumi sabiedrībai ir 6000–7500 zaudētas cilvēkdienas. Sabiedrībai nodarītos finansiālos zaudējumus fizisku traumu gadījumā var aprēķināt, izmantojot 3. un 4. pielikuma tabulā sniegtos datus. Lai noteiktu šo lielumu, jādala kopējie ienākumi valstī vienā diennaktī: valsts iedzīvotāju ienākumus (tai skaitā ienākumus no šīs valsts iedzīvotāju ekonomiskās darbības ārvalstīs)²²⁴ jāizdala ar attiecīgajā nozarē strādājošo cilvēku skaitu, neņemot vērā darbinieka izdevumus dzīves nodrošināšanai. Nacionālo kopienākumu izmanto, lai aprēķinātu ES dalībvalstu iemaksas ES pamatbudžetā. Saskaņā ar CSP darbaspēka aptaujas rezultātiem 2018. gadā Latvijā bija 909,4 tūk-

221 Reālais IKP pieauguma temps (2019). [tiešsaiste]. Centrālā statistiskās pārvalde [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/ekonomika/ikp/meklet-tema/399-realais-ikp-pieauguma-temps-procentos-salidzinot-ar>.

222 Iekšzemes kopprodukts pavisam, uz vienu iedzīvotāju un uz vienu nodarbināto (2019). [Tiešsaiste]. Centrālās statistiskās pārvaldes datubāze [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/ekfin/ekfin__ikp__IKP__ikgda/IKG10_010.px/table/tableViewLayout1/.

223 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 100. lpp.

224 Ar ko atšķiras iekšzemes kopprodukts no nacionālā kopienākuma / nacionālā kopprodukta? (2011). [Tiešsaiste]. Makroekonomika.lv [skatīts 2019. gada 3. augustā]. Pieejams: <https://www.makroekonomika.lv/ar-ko-atiskas-iekaszemes-kopprodukts-no-nacionala-kopienakuma-nacionala-kopprodukta>.

stoši nodarbināto jeb 64,5 % iedzīvotāju vecumā no 15 līdz 74 gadiem.²²⁵ Kopējais nacionālais kopienākums, ko aprēķina, izmantojot 3. pielikumā sniegtos datus, ir 32,044 EUR uz vienu strādājošo.

Atsevišķos gadījumos var izmantot apdrošināšanas izmaksas cilvēka nāves gadījumā. Zaudējumu aprēķins, izmantojot 4. pielikuma datus par kopienākumu 2018. gadā, redzams 4.1. tabulā. Var konstatēt, ka, izmantojot iepriekš tekstā apskatīto un šo metodi, zaudējumu apmērs letālā gadījumā atšķiras, jo šajā metodē kopienākums tiek rēķināts uz visiem iedzīvotājiem vecumā no 15 līdz 74 gadiem, savukārt iepriekšējā metode parāda vidējā iedzīvotāja dzīvības vērtību. Šī metode sniedz novērtējumu galvenokārt par mehāniskām traumām, kas gūtas pārspiediena rezultātā. Ar letālu iznākumu un pastāvīgu invaliditāti saistītu zaudējumu aprēķinu var izmantot arī ar citām traumām saistītu zaudējumu novērtēšanai, piemēram, siltumstarojuma traumas un saindēšanās ar toksiskām vielām.

4.1. tabula

Zaudējumi paliekošas cilvēka darbaspējas zaudējuma gadījumā²²⁶

Nr.	Darbaspējas zaudēšanas iemesls	Pakāpe, %	Zaudējumi, cilvēkdienas	Zaudējumu apmērs, EUR
1.	Letāls iznākums (nāve)	100	7500	240 330
2.	Pastāvīga invaliditāte	100	8750	280 385
Daļējs zaudējums				
3.	Visas rokas zaudējums	35	2600	83 314
4.	Apakšdelma zaudējums	30	2250	72 099
5.	Plaukstas zaudējums	25	1860	59 601,84
6.	Kājas zaudējums	20	1500	48 066
7.	Acs zaudējums	15	1125	36 049,50

Datus par ekonomiskiem zaudējumiem, kas saistīti ar darbaspējīga cilvēka došanos invaliditātes pensijā, var izmantot, aprēķinot ieguldījumus, kas nepieciešami, plānojot preventīvus pasākumus RRO ar mērķi samazināt zaudējumus. Šīs metodes galvenais trūkums ir tas, ka apriorā novērtējumā nav iespējams paredzēt, kādas traumas avārijas rezultātā gūs cilvēks.

Ekonomisko zaudējumu novērtēšanai galvenokārt tiek noteiktas tiešās izmaksas, kas saistītas ar traumēto personu ārstēšanos stacionārā. Netiešās izmaksas ir tās, kas saistītas ar darbaspējas samazinājumu, operācijām, emocionālām traumām un invali-

225 2018. gadā bija nodarbināti 64,5 % Latvijas iedzīvotāju (2019). [Tiešsaiste]. Centrālā statistiskās pārvalde [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/socialie-procesi/nodarbinatiba/meklet-tema/2582-nodarbinatiba-2018-gada>.

226 Urbans, M., Malahova, J., Jemeljanovs, V. (2020) Methodology for calculating adverse health effects in Latvia. Published by VGTU Press, pp. 195–201.

ditāti.²²⁷ Aprēķinos pārsvarā tiek ņemti vērā izplatītāko traumu veidi – vidēji smagas un vieglas traumas; atsevišķos gadījumos – arī smagi miesas bojājumi, piemēram, apdegumi. Likuma “Par Krimināllikuma spēkā stāšanās un piemērošanas kārtību” 3. pielikumā, runājot par miesas bojājumu novērtēšanu, definēti divi galvenie bojājumu kritēriji: smagi miesas bojājumi (arī dzīvībai bīstami miesas bojājumi); vidēji smagi un viegli miesas bojājumi.²²⁸ Vidējo un vieglo miesas bojājumu klasifikācija – 5. pielikumā.

Viens no traumu veidiem, kas rodas, siltumstarojumam iedarbojoties uz cilvēka organismu, ir apdegumi. Tos iedala ārējos, kas saistīti ar siltuma tiešu iedarbību uz cilvēka ķermeni, un iekšējos, kas rodas, ieelpojot karsto gaisu. Ir svarīgi novērtēt apdegumu rezultātā gūto traumu ekonomisko ietekmi, jo apdegumu ārstēšanas izmaksas ir aktuālas. Smagu apdegumu sekas parasti ir nāve, saslimšana, kā arī ekonomiskās un sociālās izmaksas, ko sedz cietašais, viņa ģimenes locekļi, veselības aizsardzības iestādes vai sabiedrība kopumā. Apdegumu aprūpe ir viens no dārgākajiem veselības aprūpes veidiem, jo ārstēšanās laikā ilgstoši jāuzturas slimnīcā – smagu apdegumu gadījumā parasti jāveic vairākas operācijas – un nepieciešams dārgs aprīkojums, kas ļoti palielina ārstēšanās izmaksas.²²⁹ Apdegumu ārstēšanas izmaksas ir augstākas nekā daudzu citu izplatītu veselības problēmu, piemēram, insulta un AIDS, ārstēšanas izmaksas.²³⁰ Zinātnieks V. Patils (V. Patil) aprēķinājis, ka apdegumu ārstēšanas vidējās izmaksas dienā par vienu pacientu Lielbritānijā ir 1512 USD, Francijā – 934 USD, Vācijā – 726 USD, Ungārijā – 280,12 USD.²³¹ Latvijā ārstēšanās stacionārā vienai personā maksā 103 EUR diennaktī, savukārt ārstēšanās intensīvās terapijas klīnikā, toksikoloģijas un sepses klīnikas intensīvās terapijas palātā un tā dēvētajā insulta vienībā vienai personai maksā 401 EUR diennaktī.²³² Atbilstoši likumam “Par Krimināllikuma spēkā stāšanās un piemērošanas kārtību” II a pakāpes apdegumi, kas aptver vairāk nekā 20 % ķermeņa virsmas, II b un III pakāpes apdegumi, kas aptver vismaz 10 % ķermeņa virsmas, elpceļu apdegumi ar izteiktu tūsku un

227 WHO and the International Society for Burn Injuries issue new fact sheet on burns [tiešsaite]. World Health organization [skatīts 2018. gada 18. septembrī]. Pieejams: http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/other_injury/en/burns_factsheet.pdf 1-5 pp.

228 Par Krimināllikuma spēkā stāšanās un piemērošanas kārtību (1998). LR Likums, pieņemts Rīgā 1998. gada 5. novembrī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018. gada 20. augustā]. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=50539>.

229 Sahin, I., Ozturk, S., Alhan, D., Açikel, C., and others (2011). Cost analysis of acute burn patients treated in a burn centre: the Gulhane experience. *Fire Disasters*. Vol. 24 (1). pp. 9–13.

230 Lopez Bastida, J., Serrano Aguilar, P., Monton A., et al. (2003). The economic burden of stroke in Spain. *Value Health*. Vol. 6. pp. 615–615.

231 Patil, V., Dulhunty, J. M., Udy, A., et al. (2010). Do burn patients cost more? The intensive care unit costs of burn patients compared with controls matched for length of stay and acuity. *J Burn Care Res*. Vol. 31, pp. 598–602.

232 Maksa par ārstēšanas stacionārā un dienas stacionārā [tiešsaite]. Aslimnīca.lv [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: <https://www.aslimnica.lv/lv/saturs/maksa-par-arstesanos-stacionara-un-dienas-stacionara>.

balss spraugas sašaurinājumu, kas radījuši dzīvībai bīstamus elpošanas traucējumus, tiek klasificēti kā dzīvībai bīstami miesas bojājumi.

4.2. tabula

Letāli iznākumi pacientiem ar dažādu apdeguma laukumu²³³

Rādītājs	Cilvēka ķermeņa apdeguma laukums, %				Pacientu kopskaits
	0–19	20–39	40–59	60–100	
Kopējais pacientu skaits	2519	175	71	35	2800
Mirušo pacientu skaits	42	27	34	27	130
Letāli iznākumi, %	1,67	15,43	47,89	78,26	4,36

Monogrāfijas autori traumatisma novērtēšanai un ārstēšanas izmaksu novērtēšanai piedāvā izmantot tālāk tekstā apskatīto algoritmu, kas papildināts ar vairāku autoru piedāvāto informāciju par dažādu veidu traumu ārstēšanu un ilgumu. I. Sahins laikposmā no 2005. gada līdz 2008. gadam veica pētījumu Gulhane Militārās medicīnas akadēmijas Apdegumu centrā Stambulā, Turcijā, aprēķinot vidējās izmaksas vidējā pacienta ar apdegumiem ārstēšanai. Pamatojoties uz pētījuma kritērijiem, tika identificēti 43 pacienti ar smagiem apdegumiem, kuru vidējais uzturēšanās ilgums slimnīcā bija 73 ± 33 dienas, vidējais ķermeņa apdeguma virsmas laukums – 36 ± 7 %. Kopējās vidējās izmaksas bija 15 250 USD.²³⁴ Tātad pacientu ar apdegumiem aprūpe ir viena no dārgākajām veselības aprūpes jomām, jo saistīta ar ilgstošu uzturēšanos slimnīcā, daudzām nepieciešamajām operācijām un dārgu, mūsdienīgu aprīkojumu. Ir svarīgi noteikt ne tikai apdeguma pakāpi, bet arī apdeguma laukumu, jo tas lielā mērā ietekmē ārstēšanās gaitu un letāla iznākuma gadījumu skaitu. Zinātnieks E. Žilinskis veicis pētījumu (rezultāti – 4.3. tab.), lai noteiktu to cilvēku skaitu, kas guvuši apdegumus un palika invalīdi atkarībā no ķermeņa apdeguma laukuma. Kombinēta ietekme, kas parasti notiek avārijas rezultātā RRO, var stipri pasliktināt apdeguma traumu ārstēšanas prognozes.²³⁵

Novērtējot apdegumu smaguma pakāpi, kura atkarīga no ietekmes uz veselību, zinātniece J. Iljinskaja ārstēšanās ilgumu saista ar gūtās traumas smaguma pakāpi (4.3. tab.). Pirmie divi rādītāji atbilst likumā “Par Krimināllikuma spēkā stāšanās un piemērošanas kārtību” noteiktajiem kritērijiem.

233 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 102. lpp.

234 Sahin, I., Ozturk, S., Alhan, D., Açıkel, C. and others (2011). Cost analysis of acute burn patients treated in a burn centre: the Gulhane experience. *Fire Disasters*. Vol. 24 (1), pp. 9–13

235 Brusselaers, N., Monstrey, S., Vogelaers, D., Hoste, E., Blot, S. (2010). Severe burn injury in europe: a systematic review of the incidence, etiology, morbidity, and mortality. (Research) (Report) *Critical Care*. Vol. 14, p. 188.

Cilvēka traumu smaguma pakāpe²³⁶

Nr.	Ietekmes ilgums uz veselību, dienas	Ietekmes uz veselību smaguma pakāpe
1.	7–21	viegla
2.	> 21	vidēja
3.	> 120	smaga

Monogrāfijā izmantoti I. Sahina un E. Žilinska pētījuma dati, lai novērtētu ekonomiskās sekas cietušo ārstēšanai, t. sk. no siltumstarojuma ietekmes, ņemot vērā vidējo slimnīcā pavadīto dienu skaitu – 73 dienas un 36 % ķermeņa virsmas apdegumu. Apdegumu ārstēšanas izmaksas Latvijā ir 401 EUR diennaktī, tas saistīts ar cietušo aprūpi intensīvajā terapijā un ar slimības blakusefektu īpaši smagos gadījumos, piemēram, infekcijas slimībām. Kopējās ārstēšanas izmaksas vienam pacientam par 73 dienu ilgu ārstēšanu ir 29 273 EUR, kas kopumā atbilst apdegumu ārstēšanas kritērijiem pasaulē. Siltumstarojuma radīto apdegumu ietekmē par invalīdiem kļūst 1–2,3 % personu, kas guvušas šādu apdegumu, 40 % pacientu ar vidēji smagiem vai smagiem apdegumiem pēc izrakstīšanas no slimnīcas nepieciešamas turpmākas operācijas.

Toksiskās iedarbības sekas uz organismu uzskatāmas par vidēji smagu vai smagu saindēšanos, šādā gadījumā nepieciešama 2–3 nedēļu ilga ārstēšanās slimnīcā (atkarībā no ķīmiskās vielas sastāva, kas nokļuva atmosfērā). Lai novērtētu sekas cilvēkiem ar vidēji smagu vai smagu saindēšanos, pieņemot, ka vidējais hospitalizācijas ilgums ir divas nedēļas jeb 14 dienas (Latvijā gultas vieta stacionārā maksā 103 EUR diennaktī), kopējās ārstēšanās izmaksas stacionārā būs 1442 EUR.

Pārspiediena rezultātā izplatītākais traumu veids ir kaulu lūzumi. Visu veidu lūzumu vidējais ārstēšanas ilgums ir $137,5 \pm 2,85$ dienas, ko cilvēks pavada, no darbnespējas lapas atvēršanas brīža līdz tam, kamēr pilnīgi izveseļojas, $79 \pm 2,45$ dienas – ārstējoties stacionārā, $64,41 \pm 2,08$ dienas – poliklīnikas ārsta uzraudzībā. Kopējās izmaksas par 79 dienu ilgu ārstēšanos stacionārā ir 8137 EUR. Vidējās traumu ārstēšanas izmaksas stacionārā un dienu kopskaits atkarībā no siltumstarojuma, toksisku vielu vai pārspiediena izraisītu traumu smaguma pakāpes apkopotas 4.4. tabulā.

236 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 103. lpp.

Apkopojums par traumu ārstēšanas izmaksām stacionārā²³⁷

Nr.	Traumas veids	Ietekmes faktors	Stacionārā pavadāmo dienu skaits	Izmaksas par vienu dienu, EUR	Kopējās tiešās izmaksas, EUR
1.	Apdegums	Siltumstarojums	43	401	29 273
2.	Intoksikācija	Toksiskas vielas	14	103	1442
3.	Kaulu lūzumi	Pārspiediens	79	103	8137

Kā redzams, stacionārā visdārgāk izmaksā siltumstarojuma ietekmē gūto traumu ārstēšana – 29 273 EUR, savukārt visilgāk norit pārspiediena rezultātā gūto traumu ārstēšana.

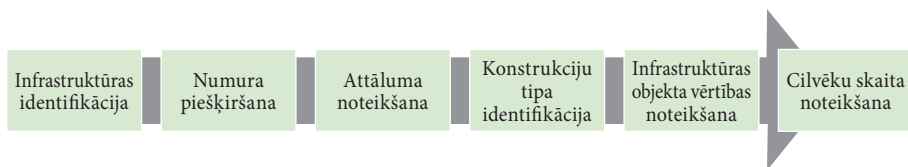
4.2. Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodes

Metode izstrādāta, balstoties kvantitatīvā bīstamības novērtēšanas metodē, identificējot iespējamo bīstamību un nosakot esošos risku līmeņus, lai pamatoti novērtētu infrastruktūras un vides zaudējumus un iespējamās avārijas RRO, kā arī lai pieņemtu nepieciešamos vadības lēmumus, tādējādi mazinot apdraudējuma līmeni.

Minētās bīstamības analīze ietver sešus pamatblokus, ko ieteicams izpildīt secīgi. Dažus blokus var samainīt vietām, tomēr, lai iegūtu labāku rezultātu, jāievēro loģiska secība. Paplašināta bloks shēma ar informāciju par katru pamatbloku – 11. pielikumā.

Saskaņā ar 2.1. attēlā redzamo pirmo bloku vispirms jāveic RRO teritorijas un apkārtnes izpēte, lai apzinātu teritorijā esošos objektus un to attālumu no modelētā notikuma (avārijas) vietas, kā arī jānoskaidro, cik cilvēku atrodas teritorijā un telpās katrā diennakts laikā. Viens no iespējamajiem informācijas apkopošanas variantiem redzams 4.5. tabulā (katrā ailē jāieraksta nepieciešamā informācija). Katram objektam jāpiešķir savs identifikācijas numurs, ko atzīmē situācijas shēmā (kartē; 4.4. att., 4.5. tab.).

Kopējais ieteicamais 1. bloka darbību algoritms ietver sešus posmus (4.3. att.).



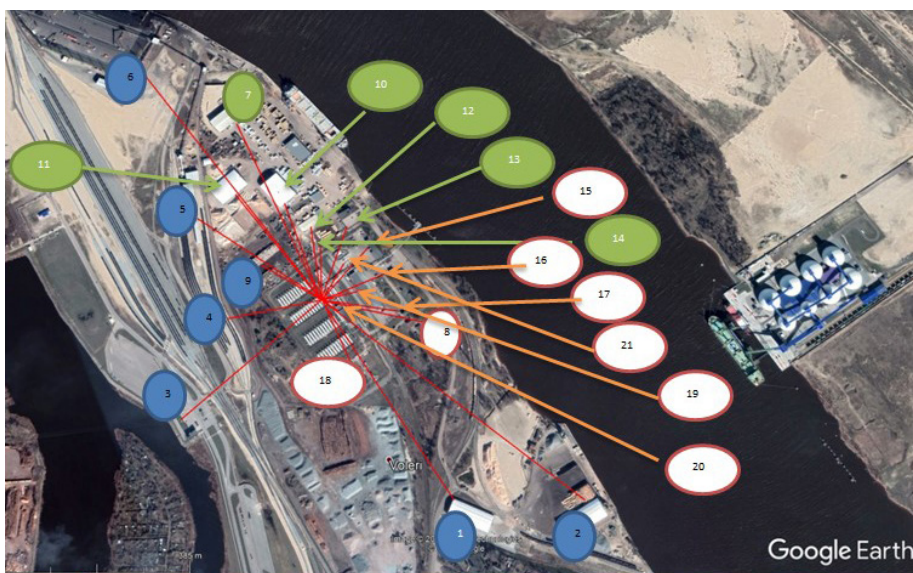
4.3. att. 1. bloka ieteicamais izpildīšanas algoritms (avots: autoru veidots).

1. bloks. Atbilstoši 4.3. attēlā redzamajam algoritmam vispirms ir jāapkopo informācija 4.5. tabulā. Sadalot infrastruktūras objektus pēc zonām, ieteicams zonas lielumu noteikt aptuveni 50–2000 m diapazonā (attālums atkarīgs no galvenā bīsta-

²³⁷ Urbans, M., Malahova, J., Jemeljanovs, V. (2020) Methodology for calculating adverse health effects in Latvia. Published by VGTU Press, pp. 195–201.

mības faktora un nepieciešamās datu precizitātes). Piemēram, pārspiediena, siltumstarojuma, toksisko vielu iedarbības, kā arī attāluma no avārijas vietas – jo tālāk no notikuma vietas, jo parasti zona ir lielāka.

1. zonā jāidentificē, kāda infrastruktūra (objekti) atrodas RRO teritorijā, kāds ir attālums no modelētās notikuma vietas līdz nozīmīgajiem objektiem, piemēram, katlumājai, administrācijas ēkai, apsardzes postenim, piešķirot katram objektam savu numuru. Lai būtu vienkāršāk saprast visu objektu atrašanās vietas, visus identificētos objektus jāatzīmē kartē, piemēram, izmantojot *Google Earth* kartes attēlu vai citu kartogrāfisku materiālu. Piemērs redzams 4.4. attēlā.



4.4. att. RRO apkārtnes identifikācija un numuru piešķiršana
(avots: autoru veidots).

Pēc infrastruktūras objektu identificēšanas jāsniedz konkrētā objekta raksturojums, izmantojot speciālu kodu, piemēram R-1, kas atbilstoši informācijai 6. pielikumā tiek identificēts atkarībā no objekta lietojuma un konstrukcijas veida. Pēc koda piešķiršanas jānosaka potenciāli ietekmētā objekta kopējā platība (m^2). 6. pielikumā sniegtos datus var neizmantot, ja apdraudējuma sekas ir saistītas tikai ar siltumstarojumu un toksisko vielu iedarbību, jo toksiskā iedarbība neietekmē konstrukciju stiprību.

Ja apdraudējums saistīts ar iedarbību pārspiediena rezultātā, tad atbilstoši grāmatvedības dokumentiem jānosaka katra infrastruktūras objekta atlikusī vērtība vai kadastrālā vērtība. Kadastrālo vērtību var uzzināt tīmekļa vietnē www.kadastrs.lv (informācija ir pieejama bez maksas). Atkarībā no šīs vērtības var noteikt tiešos ekonomiskos zaudējumus, kas varētu rasties, ja pārspiediena ietekmē tiktu bojātas tehnoloģiskās iekārtas, infrastruktūra vai citas tehnoloģiskās struktūras.

Nemot vērā informāciju par tehnoloģisko procesu, jānoskaidro infrastruktūras objektos pastāvīgi strādājošo cilvēku skaits atkarībā no tā, vai cilvēki strādā telpās vai ārā. Cilvēku skaits jāpiesaista konkrētajam objektam. Galīgo sadalījumu zonās jāveic tikai pēc tam, kad ir apzināta bīstamības teritorija, kas ir atkarīga no bīstamības veida. Nepieciešamības gadījumā 4.5. tabulu pēc tam var pārstrukturēt. 2. zonā jāizmanto 1. algoritms, kas noteikts 1. zonā, un jāapkopo informācija par tuvumā esošiem objektiem atkarībā no iespējamās bīstamās vielas RRO vai no tehnoloģijas bīstamības.

4.5. tabula

Modelējamās avārijas vietas apkārtnes raksturojums (avots: autoru veidots)

Nozīmīgākie objekti avārijas vietas tuvumā: 	Numurs kartē	Attālums, m	Adrese	Kadastrālā vai atlikusi vērtība, EUR	Ēkas, infrastruktūras un citu būvju raksturojums	Platība, m²		Darbinieku skaits			Siltumstarojuma zona, kW	Pārspiediena zona
						Kopā	Telpās	Teritorijā	Kopā			
1. zona (attālums: 0–100 m)												
1. SIA XX		50 1	X iela	1111 R-2	1000	1000	1	1	2			

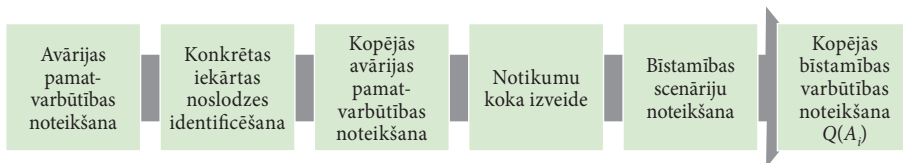
2. bloks. Saskaņā ar 4.4. attēlā redzamo uzskaitījumu, 2. blokā jānosaka meteoroloģiskā informācija, iekļaujot visnelabvēlīgākos laikapstākļus, vēja virzienu, gaisa temperatūru, atmosfēras stabilitātes klasi un bezvēja varbūtību. Šos datus var iegūt, izmantojot uzziņas avotus (piemēram, LVGMC timekļa vietni www.meteo.lv), un tos izmanto, modelējot avārijas scenāriju. 2. blokā ieteicamais izpildes algoritms redzams 4.5. attēlā.



4.5. att. 2. bloka izpildes algoritms (meteoroloģiskā informācija; avots: autoru veidots).

3. bloks. Saskaņā ar 4.6. attēlā redzamo uzskaitījumu, 3. blokā jāidentificē bīstamās vielas un to galvenie bīstamības rādītāji, kā arī jāveido iespējamie avārijas bīstamības scenāriji un ar notikumu koka metodi jāaprēķina riska varbūtība. Ja notikums saistīts ar VUŠ vai SOG, notikumu koka izveidei var izmantot 3.8. tabulā apkopotās varbūtības.

Ilglaicīgi ekspluatējamās RRO jānosaka arī analizējamais iekārtu nolietojums, lai noskaidrotu, vai nepastāv paaugstināta iekārtas avārijas varbūtība. Nolietojuma pakāpe ietekmē arī iekārtas vērtību. 4.6. attēlā redzams ieteicamais 3. bloka izpildes algoritms.



4.6. att. 3. bloka izpildes algoritms (avots: autoru veidots).

Veidojot notikumu koku, vispirms jānosaka avārijas situācijas pamatvarbūtība (apzīmē ar Q_p). Šim nolūkam var izmantot uzziņas avotos pieejamos datus vai 4.6., 4.7. un 4.8. tabulā apkopotās avārijas gadījumu pamatvarbūtības. Avārijas pamatvarbūtība ir cieši saistīta ar attiecīgās iekārtas noslodzi gada laikā. Katras iekārtas darba laiku diennakti jāreizina ar RRO darba laiku gadā, izmantojot 3.3. formulu.

Avārijas situāciju riska biežumu RRO, ekspluatējot viena veida aprīkojumu viena gada laikā jānosaka, izmantojot 3.3. formulu.

4.6. tabula

Tehnoloģiskā aprīkojuma bojājumu biežums²³⁸

Aprīkojuma nosaukums	Avārijas notikums	Noplūdes cauruma diametrs, mm	Biežums, gadā ⁻¹
Sūkņi (centrbēdzes)	Pilnīgs sabrukums un šķidruma izlīšanu vai divfāžu vide	5	$4,4 \times 10^{-3}$
		12,5	$6,1 \times 10^{-4}$
		25	$5,1 \times 10^{-4}$
		50	$2,0 \times 10^{-4}$
		Pilnīgs sabrukums	$1,0 \times 10^{-4}$
		Pienākošā/izejošā cauruļvada diametrs, mm	
Rezervuāri VUŠ uzglabāšanai, tuvu atmosfēras spiedienam	Pilnīgs sabrukums un šķidruma izlīšana aizsargvalņa ieskaustajā apgabalā	25	$8,8 \times 10^{-5}$
		100	$1,2 \times 10^{-5}$
		Pilnīgs sabrukums	$5,0 \times 10^{-6}$
Rezervuāri ar "peldošo" jumtu	Ugunsgrēks pa apli gar visa rezervuāra malu	–	$4,0 \times 10^{-3}$
	Ugunsgrēks visā rezervuāra platumā	–	$9,3 \times 10^{-4}$
Šļūteņu savienojumi ieliešanai un noliešanai	Pilnīgs sabrukums un šķidruma, gāzes noplūde	5	$1,3 \times 10^{-5}$
		15	$1,0 \times 10^{-6}$
		Pilnīgs sabrukums	$4,0 \times 10^{-6}$

238 Gordienko, D. M., Karpov, A. V. i dr. (2009). Dannye o chastotah vozniknoveniya pozharov i pozharoopasnyh situacij v obshhestvennyh zdaniyah razlichnogo naznachenija i na proizvodstvennyh objektah. Pozharnaja bezopasnost': nauchno-tehnicheskij zhurnal, Nr. 2, pp. 42–46.

4.7. tabula

Tehnoloģisko cauru/vadu noplūdes biežums

Cauru/vada diametrs, mm	Noplūdes veids, $m^{-1} \times gads^{-1}$				
	Mazs caurums (Ø 12,5 mm)	Vidējs caurums (Ø 25 mm)	Liels caurums (Ø 50 mm)	Ļoti liels caurums (Ø 100 mm)	Plisums
150	$1,9 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-8}$
250	$1,1 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$7,8 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-8}$

4.8. tabula

Automašīnu un dzelzceļa cisternu bojājumu biežums (statiskā stāvoklī)²³⁹

Aprikojuma veids	Momentāna visa satura izplūde, $gads^{-1}$	Ilglaicīga noplūde no cisternas pa caurumu, kas atbilst lielākajam savienojumam, $gads^{-1}$	Pilnīgs ieliešanas un noliešanas savienojuma vietas plisums, h^{-1}	Noplūde pa caurumu ieliešanas un noliešanas savienojuma vietā, ja cauruma diametra 10 % ir līdz Ø 50 mm, h^{-1}	Cietā ieliešanas un noliešanas mehānisma pilnīgs sabrukums, h^{-1}	Noplūde pa caurumu cietās ieliešanas un noliešanas savienojuma vietā, ja cauruma diametra 10 % ir līdz Ø 50 mm, h^{-1}
Cisterna ar atmosfēras spiedienu tajā	1×10^{-5}	5×10^{-7}	4×10^{-6}	4×10^{-5}	3×10^{-8}	3×10^{-8}

Ja avārijas situācijas tiek noteiktas, izmantojot notikumu koku, jāaprēķina katra zara scenārija varbūtība (apzīmē ar Z), sareizinot uz katra zara esošās varbūtības. Kad avārijas scenāriji ir sagatavoti, tos jāapkopo tabulā (piemērs – 4.9. tab.). Katram scenārijam jāpiešķir numurs un jā sareizina pamatvarbūtības lielums, kas noteikts, izmantojot 3.3. formulu, un katra zara varbūtību.

4.9. tabula

Avārijas situācijas scenārijs un noteiktā pamatvarbūtība (avots: autoru veidots)

Scenārija Nr.	Avārijas scenārijs: rezervuāra sabrukums	Rezervuārs ar pārspiedienu		
		Q_p – scenārija varbūtība, $gads^{-1}$	Z zara varbūtība (kopā)	$Q(A_i)$ – kopējā realizācijas varbūtība, $(P \times Z)$ $gads^{-1}$
C1	Ugunslode	$3,0 \times 10^{-7}$	$0,20 \times 0,704$	$4,2 \times 10^{-8}$

4. blokā notikums tiek modelēts, izmantojot *ALOHA* vai citu datorprogrammu, kas ļauj ātrāk veikt aprēķinu un noteikt apdraudējuma zonas. Šim nolūkam var izmantot arī matemātisko modelēšanu, veicot aprēķinus ar formulām un atzīmējot apdraudējuma zonas kartē, lai atkarībā no ietekmes scenārija noteiktu apdraudējuma ietekmi un ietekmes zonas apgabalu. Saskaņā ar 4.8. attēlā redzamo uzskaitījumu, 4. blokā jāizvēlas modelējamie avārijas scenāriji, negatīvo seku modelēšanas aprēķi-

²³⁹ Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 108. lpp.

na metodika, jāveic modelēšana, izmantojot iepriekš noteikto metodiku.



4.8. att. 4. bloka izpildes algoritms (avots: autoru veidots).

5. bloks. Negatīvās sekas videi un to varbūtības apzināšanās. Saskaņā ar 4.9. attēlā redzamo uzskaitījumu, 5. blokā jāanalizē negatīvas sekas izpausmes, t. sk. notikuma iedarbības attālums, iedarbība uz ietekmēto vidi, jāizvēlas negatīvo seku modelēšanas aprēķina metodika, jāveic modelēšana, izmantojot iepriekš izvēlēto metodiku.



4.9. att. 5. bloka izpildes algoritms (avots: autoru veidots).

Vienādojumam, ar ko var novērtēt bīstamās situācijas varbūtību, izmanto noteiktu integrāli, kas plaši pazīstams kā Gausa formula (klūdu formula), ko var izteikt kā ietekmes (zaudējumu) risku (2.5. vienādojums).²⁴⁰

Augšējā integrēšanas robeža ir sakarība starp skaitlisko kaitīgās ietekmes mērvienību, piemēram, saņemto bīstamās vielas devu, siltumenerģijas daudzumu, kas ietekmē cilvēku, un objekta ietekmes varbūtību.

4.10. tabula

Letāla iznākuma varbūtība cilvēkiem, kas pakļauti toksiskā mākoņa iedarbībai (paraugs aizpildīšanai)

	Toksiskā iedarbība, ppm vai %			Ekspozīcijas ilgums, s
	10	20	30	
Attālums, km				–
Cilvēku kopskaits				–
Probit funkcija				–
Letāla iznākuma varbūtība, %				3600
Ietekmēto cilvēku skaits				–

240 Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātās bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 115. lpp.

Prognozējamais konkrētā apdraudējuma ietekmēto cilvēku skaits jāieraksta tabulā (piemērs – 4.11. tab.).

4.11. tabula

Traumatisma varbūtība cilvēkiem, kas pakļauti ugunslodes vai cita veida siltumstarojuma ietekmei, procentos (paraugs aizpildīšanai) (avots: autoru veidots)

Traumatisma parametri	Probit modeļa vērtība	Siltumstarojums, kWt/m ²							Ekspozīcijas ilgums, sek.
		37	17	12,9	10,5	7	4,2	1,4	
Attālums, m									
Cilvēku skaits									
I pakāpes apdegumi	Ietekmēto cilvēku skaits								
	<i>Probit</i>								
II pakāpes apdegumi	Ietekmēto cilvēku skaits								
	<i>Probit</i>								
III pakāpes apdegumi	Ietekmēto cilvēku skaits								
	<i>Probit</i>								
Bojājuma robežvērtība									
	<i>Probit</i>								
Letāla iznākuma varbūtība	Ietekmēto cilvēku skaits								
	<i>Probit</i>								

Individuālā riska aprēķins

Lai novērtētu kopējo riska situāciju, ir jānosaka objekta individuālā riska līmenis. Bīstamo objektu individuālā riska dati tiek izmantoti, lai noteiktu objekta kopējā riska līmeni un apdraudējuma zonu un plānotu teritorijas attīstību. Veicot individuālā riska aprēķinu, jāanalizē objekta iespējamo avāriju scenāriju kopējā varbūtība izraisīt cilvēka bojāeju, atrodoties noteiktā vietā objektā vai tā tuvumā.

Individuālais risks – darbinieku letāla iznākuma risks – ir atkarīgs no tā, cik stundas diennaktī darbinieki atrodas darba vietā, to aprēķina, izmantojot 3.4. formulu.

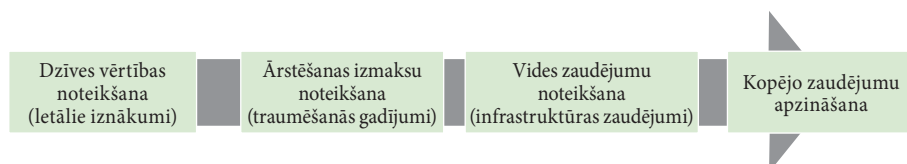
Cilvēka individuālais risks jāaprēķina tikai sliktākajiem notikumu scenārijiem. Iespējamo riska novērtējuma tabulas piemērs – 4.12. tabulā.

4.12. tabula

Individuālā riska aprēķins (avots: autora veidots)

Scenārija Nr.	Attālums, m	kPa	kWt/m ²	$Q(A_p)$	Q_p	f_k	Individuālais risks, R , gads ⁻¹
							Kopējā varbūtība
C1							
C2 _{n+i}							

6. bloks. Ekonomisko zaudējumu novērtēšana. Saskaņā ar 4.10. attēlā redzamo uzskaitījumu 6. blokā jāanalizē ekonomiskās sekas, kas pamatotas ar iepriekšējos blokos izanalizēto informāciju par avārijas sekām, to varbūtību utt. Nepieciešams aprēķināt vidēji statistiskā cilvēka vērtību, ārstēšanas izmaksas, vides un infrastruktūras zaudējumus, noslēgumā summējot visus zaudējumus.



4.10. att. 6. bloka izpildes algoritms (avots: autoru veidots).

Izmantojot piedāvāto metodi un iegūtos datus, var aprēķināt riska līmeni RRO un novērtēt iespējamās ekonomiskās un vides zaudējumus, kas atkarīgi no apdraudējuma ietekmes un avārijas raksturojuma.

Nobeigums

Mūsdienās Latvijā riska novērtējumam var izmantot jebkuru novērtēšanas metodi, jo likumos nav noteikta vienota metodika. Rezultātā avāriju seku un riska novērtēšana nesniedz precīzu informāciju, jo, novērtējot vienu RRO ar dažādām metodēm, tiek iegūti dažādi rezultāti.

Aplūkotās riska novērtēšanas metodes sniedz iespēju izvēlēties piemērotāko un ērtāko metodi RRO novērtēšanai, katrs speciālists var izmantot patīkamāko un saprotamāko metodi, lai saprastu RRO bīstamību, novērtētu iespējamās kaitīgās sekas infrastruktūrai, cilvēkam un videi gan RRO teritorijā, gan arī ārpus tās. Šāda informācija ir īpaši noderīga, plānojot attīstību ap RRO, jo tikai konkrēto seku apzināšana un noteiktais riska līmenis var sniegt pamatotu informāciju objekta vadībai, kā arī valsts un pašvaldības iestādēm par iespējamo avāriju un plānot nepieciešamos reaģēšanas pasākumus ārpus RRO teritorijas. Tomēr jāapzinās, ka riska novērtēšanas pieejas nesniedz skaidru un nepārprotamu informāciju, kad konkrēti negatīvais notikums notiks. Tās sniedz informāciju par konkrētā negadījuma norises scenāriju, nevis laiku, kad tieši tas notiks. Ja šāds negatīvais notikums būs, tad var noteikt šī negatīvā notikuma iespējamās sekas atkarībā no objekta specifikas un ķīmisko vielu, kas var izraisīt avārijas notikumu, raksturojuma.

21. gadsimts sniedz iespēju novērtēt RRO objekta bīstamību, pamatojoties jau uz gatavām riska novērtēšanas metodēm, kurām ir dažādas nianšes un piemērošanas trūkumi. Monogrāfijas autori sniedz priekšstatu par šīm novērtēšanas metodēm un to nianšēm. Atsevišķi tiek piedāvāti bīstamības un riska novērtēšanas aprēķinu piemēri, kas izstrādāti, lai lasītājam bez iepriekšējas pieredzes būtu iespēja labāk saprast riska būtību un novērtēšanas procedūru. Monogrāfijā apskatītas gan kvantitatīvā riska novērtēšanas metodes, kurām ir nepieciešama matemātiskā pieeja, gan kvalitatīvās metodes, ko var izmantot ne tikai speciālisti, bet arī cilvēki, kuriem nav īpašu zināšanu par riska novērtēšanu un kuri vēlas savas zināšanas paplašināt. Dažas riska novērtēšanas metodes ir universālas, un tās var lietot, ne tikai novērtējot RRO, bet arī novērtējot ekonomiskos riskus objektam, piemēram, par nesaražotas produkcijas vai produkcijas brāķa gadījumiem un to, kādi iemesli var izraisīt brāķētas produkcijas izgatavošanu, kā arī to, kādas ir iespējamās sekas šādas produkcijas izgatavošanai vai realizācijai. Kopumā riska novērtēšanas metodes ir universālas, un tās bieži vien jau ir iekļautas dažādu valstu standartos, tāpēc konkrētās izvēlētas riska novērtēšanas metodes pamatojums vienmēr būs atrodams citu valsts RRO pieredzē.

Bīstamības novērtēšanas procedūras gaitā ieteicams izmantot starptautiski atzītas datormodelēšanas programmas, kas samazina nepieciešamo aprēķinu laiku, kā arī sniedz iespēju vizuāli noteikt iespējamās sekas, piemēram, ASV izstrādāto programmu ALOHA. Tomēr, lai ar šīs programmas palīdzību noteiktu RRO riska līmeni, nepieciešams zināt riska novērtēšanas metodes un algoritmu, kā savienot programmas izejas datus ar seku novērtēšanas rezultātiem. Pasaulē ir izstrādātas dažādas ris-

ka novērtēšanas programmas, kas uzreiz sniedz rezultātu par seku apmēru objektā. Jāpiebilst, ka šo programmu izmantošana ir ļoti dārga un atsevišķā uzņēmumā šādas programmas iegāde un licences uzturēšana ne vienmēr ir iespējama. tāpēc monogrāfijas autori neanalizē konkrētu datorprogrammu, bet sniedz iespēju veidot izpratni par to, atbilstoši kādiem algoritmiem šīs programmas strādā un kā iegūt nepieciešamo rezultātu, lieki netērējot finanšu resursus. Jāuzsver, ka katrai šādai programmai, lai speciālists varētu ar to strādāt, ir nepieciešamas arī apmācības. Ja darbinieks katru dienu nestrādā ar šādu programmu, iemaņas laika gaitā pasliktinās, turklāt jāņem vērā arī tas, ka programmatūra tiek atjaunināta un tās izkārtojums un funkcionalitāte var mainīties. Tāpēc šī monogrāfija būs aktuāla arī pēc ilgāka laika, jo speciālists nepieciešamības gadījumā varēs atsvaidzināt zināšanas.

Lai īstenotu tehnogēnās vides pārvaldību, sabiedrībai ir jāsaprot iespējamo zaudējumu apmērs un sekas, jāapzinās savas pašreizējās zināšanas par tehnogēno sistēmu un jāveic pamatoti aizsardzības pasākumi, lai uzlabotu vidi un samazinātu negatīvās sekas. Tādējādi plānošanas dokumenti, kas balstīti iespējamo aprioro zaudējumu novērtēšanā, ir aktuāls temats. Attīstoties tehnogēnajai videi, ĀS gadījumu skaits nav samazinājies, un, neskatoties uz drošības sistēmu pilnveidojumiem un kopējo pasaules attīstību, negatīvo seku apjomi tikai pieaug.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN AVOTU SARAKSTS

1. 2018. gadā bija nodarbināti 64,5 % Latvijas iedzīvotāju (2019). [tiešsaiste]. Centrālā statistikās pārvalde [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/socialie-procesi/nodarbinatiba/meklet-tema/2582-nodarbinatiba-2018-gada>.
2. Altabbakh, H., Alkazimi, M. A., Murray, S., Grantham, K. (2014). STAMP – holistic system safety approach or just another risk model? *J. Loss Prev. Process Ind.* Vol. 32, pp. 109–119.
3. Altamirova, E., Perminov, V. A., Akchina, S. S. (2018). Analysis and estimation of fire-ball parameters using existing methods. *Technosphere safety*. Vol. 3, No. 1 XXI Century. pp. 84–91.
4. Anastas, J. W. (2004). Quality in qualitative evaluation: Issues and possible answers. *Research on Social Work Practice*. Vol. 14, pp. 57–65.
5. Annex 1 Constants in the Antoine equation (2008). *Industrial Safety Series*. Volume 8, pp. 333–334.
6. Anvarifara, F., Voorendt, M. Z., Zevenbergena, C., Thissen, W. (2017). An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk analysis of multifunctional flood defences in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 158. pp. 130–141.
7. Apiratikula, R. (2015). Approximation Formula For The Prediction Of Downwind Distance That Found The Maximum Ground Level Concentration Of Air Pollution Based On The Gaussian Model. *Social and Behavioral Sciences* Vol. 197. pp. 1257–1262.
8. Apostolakis, G. E. (2004). How useful is quantitative risk assessment? *Risk Analysis*. Vol. 24 (3), pp. 515–520.
9. *Ar ko atšķiras iekšzemes kopprodukts no nacionālā kopienākuma / nacionālā kopprodukta? (2011)*. [tiešsaiste]. Makroekonomika.lv [skatīts 2019. gada 3. augustā]. Pieejams: <https://www.makroekonomika.lv/ar-ko-atskiras-iekšzemes-kopprodukts-no-nacionala-kopienakuma-nacionala-kopprodukta>.
10. Arrow, J. (1981). *Costs of Environment-Related Health Effects: A Plan for Continuing Study*. Washington, National Academy Press, Institute of Medicine, p. 218.
11. Aven, T. (2013). How to define and interpret a probability in a risk and safety setting. Discussion paper with G. Reniers. *Safety Science*. Vol. 51 (1), pp. 223–231.
12. Aven, T., Zio, E. (2014). Foundational issues in risk assessment and risk management. *Risky analysis*. Vol. 34 (7), pp. 1164–1172.
13. Bakian, A. V., Huber, R. S., Coon, H., Gray, D., Wilson, P., McMahon, W. M., Renshaw, P. F. (2015). Acute air pollution exposure and risk of suicide completion. *Am. J. Epidemiol.* Vol. 181 (5), pp. 295–303. <https://doi.org/10.1093/aje/kwu341>.
14. Baecher, G. B., Abedinisohi, F., Patev, R. C. *Societal Risk Criteria for Loss of Life*. University of Maryland, p. 85.
15. Barends, D. M., Oldenhof, M. T., Vredenburg, M. J., Nauta, M. J. (2012). Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* Vol. 64–65, pp. 82–86.
16. Belmonte, F., Schoen, W., Heurley, L., Capel, R. (2011). Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: an application to railway traffic supervision. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 96 (2), pp. 237–249.
17. Benintendy, R. (2018). *Process Safety Calculations*. Elsevier, 662 p.
18. *Best Practice Regulation Guidance Note Value of statistical life*. (2014). [tiešsaiste].

- Australasian government Department of the Prime Minister and Cabinet, [skatīts 2018. gada 1. septembrī]. Pieejams: https://www.pmc.gov.au/sites/default/files/publications/Value_of_Statistical_Life_guidance_note.pdf.
19. Bjerga, T., Aven, T., Zio, E. (2016). Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 156. pp. 203–209.
20. Brantlinger, E., Jimenez, R., Klingner, J., Pugach, M., Richardson, V. (2005). *Qualitative studies in special education. Exceptional Children*. Vol. 71, pp. 195–207.
21. Briggs, G. A. (1974). Diffusion Estimation for Small Emissions, Report ATDL-106 (Washington, DC: Air Resources, Atmospheric Turbulence, and Diffusion Laboratory, Environmental Research Laboratories).
22. Brizio, E., Genon, G. (2005). The influence of different mixing heights on the “ECO-SENSE” model results at a local scale. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 20, pp. 917–933.
23. Brusselaers, N., Monstrey, S., Vogelaers, D., Hoste, E., Blot, S. (2010). Severe burn injury in Europe: a systematic review of the incidence, etiology, morbidity, and mortality. (Research) (Report) *Critical Care*, Vol. 14, 188 p.
24. Bubbico, R. (2018). A statistical analysis of causes and consequences of the release of hazardous materials from pipelines. *The influence of layout. Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 56, pp. 458–462.
25. Casal, J., Arnaldos, J., Montiel, H., Planas-Cuchi, E., Vilchez, J. A. (2002). *Modeling and understanding BLEVES*. [Tiešsaiste] Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya – Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain, [skatīts 2018. gada 17. septembrī]. Pieejams: <https://docplayer.net/20806029-Chapter-22-modeling-and-understanding-bleves.html>.
26. Certa, A., Hopps, F., Inghilleri, R., La Fata, C. M. (2017). A Dempster-Shafer Theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 159, pp. 69–79.
27. Cocheo, C., Sacco, P., Zaratini, L. (2011). Assessment of Human Exposure to Air Pollution Assessment of Human Exposure to Air Pollution. *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 230–237.
28. Cox, L. A. (2012). Confronting deep uncertainties in risk analysis. *Risk Analysis* Vol. 32 (10), pp. 1607–1629.
29. Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S. (2005). The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. A127, pp. 14–30.
30. Dakwat, A. L., Villan, E. (2018). System safety assessment based on STPA and model checking. *Safety Science*. Vol. 109, pp. 130–143.
31. Dallat, C., Salmon, P. M., Goode, N. (2019). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. Vol. 119, pp. 266–279.
32. Deacon, T., Amyotte, P. R., Khan, F. I., (2010). Human error risk analysis in offshore emergencies. *Safety Science*. Vol. 48 (6), pp. 803–818.
33. Dekker, S., Pitzer, C. (2016). Examining the asymptote in safety progress: a literature review. *Int. J. Occup. Safety Ergon*. 22 (1), pp. 57–65.
34. Directive 2003/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2003 Amending Council Directive (2003). 96/82/EC on the Control of Major-accident Hazards involving Hazardous Materials. *Official Journal of the European Union, L*

- 345/97. Brussels, 31.12.2003. 37 p.
35. Dziubinski, M., Fratzcka, M., Markowski, A. S. (2006). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* Vol. 19, pp. 399–408.
36. Eiropas vides aģentūra [tiešsaiste]. Eiropas vides aģentūra mājaslapa [skatīts 2018. gada 7. martā]. Pieejams: <https://www.eea.europa.eu/lv/themes/air/intro>.
37. Elliott, R., Fischer, C. T., Rennie, D. L. (1999). Evolving guidelines for publication of qualitative research studies in psychology and related fields. *British Journal of Clinical Psychology*. Vol. 38, pp. 215–229.
38. Enaleev, R. Sh., Teljakov, Je. Sh., Hajrullin, I. R., Kachalkin, V. A. (2008). Burning of gases in a fireball: *Abstracts and reports of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer*, pp. 327–329.
39. Firza, R., Rosyid, D., Dirta, M. C. (2017). Project Delay Analysis on Jacket Structure Construction. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 862, pp. 315–320.
40. Fletcher, W. J. (2005). The application of qualitative risk assessment methodology to prioritize issues for fisheries management. *ICES Journal of Marine Science*. Vol. 62 (8), pp. 1576–1587.
41. Forouzanfar, M. H., et al., (2015). Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* Vol. 386 (10010), pp. 2287–2323.
42. French, S., Bedford, T., etc. (2011) Human reliability analysis: A critique and review for managers. *Safety Science*. Vol. 49, pp. 753–763.
43. Garvey, P. R., Lansdowne, Z. F. (1998). Risk matrix: an approach for identifying, assessing, and ranking program risks. *Air Force journal of logistics* Vol. 22 (1), pp. 18–21.
44. Geng, L., Wu, Z., Zhang, S., Zhou, K. (2019). The end effect in air pollution: The role of perceived difference. *Journal of Environmental Management* Vol. 232, pp. 413–420.
45. Giardina, M., Morale, M. (2015). Safety study of an LNG regasification plant using an FMECA and HAZOP integrated methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 35, pp. 35–45.
46. Graves, R. J., Way, K. R., Riley, D., Lawton, C., Morris, L., (2004). Development of risk filter and risk assessment worksheets for HSE guidance – ‘Upper Limb Disorders in the Workplace’ 2002. *Appl. Ergonomics*. Vol. 35 (5), pp. 475–484.
47. Groso, A., Ouedraogo, A., Meyer, T. (2012). Risk analysis in research environment. *Journal Risk Researches*. Vol. 15 (2), pp. 187–208.
48. *Guidelines for Chemical process Quantative Risk Analysis*. (2000). American institute of chemical engineers. New-York: A John Wiley & sons, inc., publication. 122 p.
49. *Guidelines for hazard identification, risk assessment and risk control (HIRARC)*. (2008). Ministry of Human Resources Malaysia. Department of Occupational Safety and Health Ministry of Human Resources Malaysia. 18 p.
50. Guo, L., Kang, J. (2015) An extended HAZOP analysis approach with dynamic fault tree. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 38, pp. 224–232.
51. Hsieh, M., Wang, E., Lee, W., etc. (2018). Application of HFACS, fuzzy TOPSIS, and AHP for identifying important human error factors in emergency departments in Taiwan. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Vol. 67, pp. 171–179.
52. Huang, F., Liu, B. (2017). Software defect prevention based on human error theories. *Chinese Journal of Aeronautics*. Vol. 30, Issue 3, pp. 1054–1070.
53. Huang, J., Li, Z., Liu, H. (2017). New approach for failure mode and effect analysis using linguistic distribution assessments and TODIM method. *Reliability Engineering and*

- System Safety*. Vol. 167, pp. 302–309.
54. I, Y. P., Shu, C. M., Chong, C. H. (2009). Applications of 3D QRA technique to the fire/explosion simulation and hazard mitigation within a naphtha-cracking plant. *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 22, pp. 506–515.
55. *Iekšzemes kopprodukta un nacionālā kopienākuma saistība 2018. gadā* (2019) [tiešsaiste]. Centrālā statistiskās pārvalde [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/ekfin/ekfin__ikp__IKP__ikgad/IKG10_070.px/table/tableViewLayout/.
56. *Iekšzemes kopprodukts pavisam, uz vienu iedzīvotāju un uz vienu nodarbināto* (2019). [tiešsaiste]. Centrālās statistiskās pārvaldes datu bāze [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/ekfin/ekfin__ikp__IKP__ikgad/IKG10_010.px/table/tableViewLayout1/.
57. International Electrotechnical Commission, (2016). IEC 61882:2016 *Hazard and operability studies (HAZOP studies) – application guide*. IEC, Geneva, Switzerland. 124 p.
58. Jeanfreau, S. G., Leonard, Jr. J. (2010). Appraising qualitative research in health education: Guidelines for public health educators. *Health Promotion Practice*. Vol. 11, pp. 612–617.
59. Jegorovs, P., Šļahovs, I., Alabins, N. (1973). *Civilā aizsardzība*. Rīga. Izdevējs: Liesma. 211 lpp.
60. Jemeljanovs, A., Ieviņš, J., Puškina, J. (2007). *Objekta riska novērtēšana*. Rīga: RTU izdevniecība. 184 lpp.
61. Jeong, B., Lee, B. S., Zhou, P., Ha, S. (2018). Quantitative risk assessment of medium-sized floating regasification units using system hierarchical modelling. *Ocean Engineering*. Vol. 151, pp. 390–408.
62. Kaļķis, V., Roja, Ž., Kaļķis, H. (2015) *Arodveselība un riski darbā*. Medicīnas apgāds. 534 lpp.
63. Kennedy, R., Kirwan, B. (1998). Development of a hazard and operability-based method for identifying safety management vulnerabilities in high risk systems. *Safety Science*. Vol. 30 (3), pp. 249–274.
64. Khan, F. I., Abbasi, S. A. (1998). *Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 11 (4), pp. 261–277.
65. Kirwan, B. (1992). Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches. *Applied Ergonomics*. Vol. 23 (5), pp. 299–318.
66. Kirwan, B. (1998). Human error identification techniques for risk assessment of high risk systems – Part 1: Review and evaluation of techniques. *Applied Ergonomics*. Vol. 29 (3), pp. 157–177.
67. Landrigan, P. J. (2012). The hidden costs of environmental contamination. *European Respiratory Journal*. Vol. 40, pp. 286–288.
68. Lanzi, E., Dellink, R., Chateau, J. (2018). The sectoral and regional economic consequences of outdoor air pollution to 2060, *Energy Economics*. Vol. 71, pp. 89–113.
69. Laumann, K. (2020). Criteria for Qualitative Methods in Human Reliability Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 194, 106198 [tiešsaiste]. Science Direct [skatīts 2019. gada 20. septembrī]. Pieejams: <https://www.sciencedirect-com.resursi.rtu.lv/science/article/pii/S0951832017310268>.
70. Leveson, N. (2012). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Cambridge, Mass: The MIT Press, p. 531.
71. Liu, X., Li, J., Li, X. (2017). Study of dynamic risk management system for flammable and explosive dangerous chemicals storage area. *Journal of Loss Prevention in the Pro-*

- cess Industries. Vol. 49, pp. 983–988.
72. Linnerooth, J. (1996). "Does Society Mismanage Risk?" In *Wise Choices*, 133–51. Cambridge: Harvard University Press.
73. Lopez Bastida, J., Serrano Aguilar, P., Monton, A. et al. (2003). The economic burden of stroke in Spain. *Value Health*. Vol. 6, pp. 615–615.
74. Macdonald, D. (2004). *Practical Hazops, Trips and Alarms*. Publisher: Newnes 1st Edition, p. 352.
75. *Maksa par ārstēšanas stacionārā un dienas stacionārā* [tiešsaiste]. Aslimnīca.lv [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: <https://www.aslimnica.lv/lv/saturs/maksa-par-arstešanas-stacionara-un-dienas-stacionara>.
76. Mandal, S., Singh, K., Behera, R. K., Sahu, S. K., etc. (2015). Human error identification and risk prioritization in overhead crane operations using HTA, SHERPA and fuzzy VIKOR method. *Expert Systems with Applications* Vol. 42, pp. 7195–7206.
77. Marhavišas, P. K., Koulouriotis, D., Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: on a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 24 (5), pp. 477–523.
78. Markmann, C., Darkow, I. L., Gracht, H. (2013). A Delphi-based risk analysis –identifying and assessing future challenges for supply chain security in a multi-stakeholder environment. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 80 (9), pp. 1815–1833.
79. Martin, M. (1981), Statistical Practice in Bureaucracies, *Journal of the American Statistical Association*, Volume 76, pp. 1–8.
80. Martinsen, W. E., Marx, J. D. (1999). *An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs*. International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28–October 1, 1999, p. 4.
81. Meng, X., Chen, G., Shi, J., Zhu, G., Zhu, Y. (2018). STAMP-based analysis of deepwater well control safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 55, pp. 41–52.
82. Meyrick, J. (2006). What is good qualitative research? A first step towards a comprehensive approach to judging rigour/quality. *Journal of Health Psychology*. Vol. 11, pp. 799–808.
83. Naderpour, M., Lu, J., Zhang, G. (2014). A situation risk awareness approach for process systems safety, *Safety Science*. Vol. 64 (3), pp. 173–189.
84. Napier, B. A., Peloquin, R. A., Streng, D. L., Ramsdell, J. V. (1988). *GENII-The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System*. Volume 1: Conceptual Representation. Pacific Northwest Laboratory. Washington, p. 184.
85. Naumann, K-H. (2003). COSIMA – a computer program simulating the dynamics of fractal aerosols. *Journal of Aerosol Science*. Vol. 34, Issue 10, pp. 1371–1397.
86. Ortmeier, F., Reif W., Schellhorn, G. (2005). Deductive cause-consequence analysis (dcca). *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 38, Issue 1, pp. 62–67.
87. Ottino, J. M. (2004). Engineering complex systems. *Nature*. Vol. 427 (6973), pp. 399–399.
88. Ozoliņš, J., Stunda-Zujeva, A., Bušs, A. Praktikums. *Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti. Hidromehāniskie procesi*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 104 lpp.
89. *Par Krimināllikuma spēkā stāšanās un piemērošanas kārtību* (1998). LR Likums, pieņemts Rīgā 1998.gada 5.novembrī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018. gada 20. augustā]. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=50539>.
90. Pasman, H., Rogers, W. (2013). Bayesian networks make LOPA more effective, QRA more transparent and flexible, and thus safety more definable! *Journal of Loss Preven-*

- tion in the Process Industries*. Vol. 26, pp. 434–442.
91. Patil, V., Dulhunty, J. M., Udy, A., et al. (2010). Do burn patients cost more? The intensive care unit costs of burn patients compared with controls matched for length of stay and acuity. *J Burn Care Res*. Vol. 31, pp. 598–602.
92. Pisoni, E., Carnevale, C., Volta, M. (2009). *Multi-criteria analysis for PM10 planning*. Atmospheric Environment. Vol. 43, pp. 4833–4842.
93. Raiyan, A., Das, S., Islam, M. (2017). Event Tree Analysis of Marine Accidents in Bangladesh. *Procedia Engineering*. Vol. 194, pp. 276–283.
94. Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science*. Vol. 27 (2–3), pp. 183–213.
95. Rausand, M., Hoyland, A. (2004). *System reliability theory. Models, Statistical methods, and applications*. 2nd edition. A John Wiley & Sons, inc., publication. 672 p.
96. Reālais IKP pieauguma temps (2019) [tiešsaiste]. Centrālā statistikās pārvalde [skatīts 2019. gada 16. septembrī]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/ekonomika/ikp/meklet-tema/399-realais-ikp-pieauguma-temps-procentos-salidzinot-ar>.
97. Risk Engineering [tiešsaiste], [skatīts 2023. gada 16. aprīlī]. Pieejams: <https://risk-engineering.org/concept/Farmer-diagram>.
98. Ruijter, A., Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review, *Safety Science*. Vol. 88, pp. 211–218.
99. Saedi, A. M., Thambirajah, J. J., Pariatamby, A. (2014). A HIRARC model for safety and risk evaluation at a hydroelectric power generation plant. *Safety Science*. Vol. 70, pp. 308–315.
100. Sahin, I., Ozturk, S., Alhan, D., Açikel, C., and others (2011). Cost analysis of acute burn patients treated in a burn centre: the Gulhane experience. *Fire Disasters*. Vol. 24 (1), pp. 9–13.
101. Schuller, T. (2006). Evidence and policy research. *European Educational Research Journal*, Volume 5 (1), pp. 57–70.
102. Sellami, I., Manescau, B., Chetehouna, K., Izarra, C., Nait-Saida, R., Zidani, F. (2018). BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 54, pp. 69–84.
103. Septītā VRP – vispārējā Savienības vides rīcības programma līdz 2020. gadam [tiešsaiste]. An official website of the European Union [skatīts 2018. gada 15. martā]. Pieejams: <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/7eap/lv.pdf>.
104. Serbo, V. V. (2003). Status of AIDA and JAS 3. *Nucl.Instrum.Meth*. Vol. A502, pp. 663–665.
105. Sharma, R. K., Kumar, D., Kumar, P. (2005). Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling, *International journal of quality & reliability management*. Vol. 22, Issue 9, pp. 986–1004.
106. Shultz, T. (1968). Human Capital. In: Sills D. L. (ed.) *International Encyclopedia of the Social Sciences* New York: Macmillan Free Press., Vol. 2, pp. 278–286.
107. Sihombing, F., Torbol, M. (2018). Parallel fault tree analysis for accurate reliability of complex systems. *Structural Safety* Vol. 72, pp. 41–53.
108. Siquieroli, D., Boas, V., Matsuda, M., Toffoletto, O., Garcia, M. L. B., Saldiva, P. H. N., Marquezini, M. V. (2018). Workers of São Paulo city, Brazil, exposed to air pollution: Assessment of genotoxicity. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* Vol. 834, pp. 18–24.
109. Sistēma [tiešsaiste]. Latvian Oxford Living Dictionaries [skatīts 2019. gada 2. jūnijā]. Pieejams: <https://lv.oxforddictionaries.com/skaidrojums/sistema>.
110. Smith, D., Veitch, B., Khan, F., Taylor, R. (2017). Understanding industrial safety: Com-

- paring Fault tree, Bayesian network, and FRAM approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 45, pp. 88-101.
111. Sofiev, M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M., Kukkonen, J. (2006). A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data. *Atmospheric Environment* Vol. 40, pp. 674–685.
112. Spreafico, C., Russo, D., Rizzi, C. (2017). A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review*. Vol. 25, pp. 19–28.
113. Steinbuch, P. (2001). *Logistik*. Berlin: Herne Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, p. 422.
114. Stern, E. (2017). *Risk Assessment of Severe Accidents Involving Atmospheric Dispersion of Anhydrous and Hydrous Ammonia mixtures*. [tiešsaiste]. Presented at Ammonia World New and Old – 2017 conference Technion, Haifa, Israel 15.11.17. Pieejams: https://www.youtube.com/watch?v=p_ldUMMZVPo.
115. Swann, C. D., Preston, M. L., (1995). Twenty-five years of HAZOPs. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 8 (6), pp. 349–353.
116. Šmidre, P., Jemeljanovs, A., Ieviņš, J. (2008). *Vides aizsardzība no tehnogēno avāriju un katastrofu ģenerētajiem piesārņojumiem*. Rīga: RTU Izdevniecība. 138 lpp.
117. Šteinberga, I. (2007). *Kvazistatisku atmosfēras piesārņojuma līmeņu kompleksā analīze un modelēšana*. Promocijas darbs. Rīga: Latvijas Universitāte. Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte. 72 lpp.
118. Thomas, J., Suo, D. (2015). STPA-based method to identify and control feature interactions in large complex systems. *Procedia Engineering*. Vol. 128, pp. 12–14.
119. Tseng, J. M., Su, T. S., Kuo, C. Y. (2012). International Symposium on Safety Science and Technology Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering* Vol. 45, pp. 384–389.
120. Uddi, N., Ang, H. S. A. (2011). *Quantitative Risk Assessment for Natural Hazards*. Council on Disaster Risk Management (CDRM) Monograph No. 5. New York: American Society of Civil Engineers. 84 p.
121. Uijt de Haag P. A. M., Ale, B. J. M. (2005). *Guideline for Quantitative Risk Assessment, "Purple Book" CPR18E*, National Institute of Public Health and Environment (RIVM), den Hague. Part 1: Establishments 237 p.
122. Underwood, P., Waterson, P., Braithwaite, G. (2016). Accident investigation in the wild' – A small-scale, field-based evaluation of the STAMP method for accident analysis. *Safety Science*. Vol. 82, pp. 129–143.
123. Urbans, M., Malahova, J., Jemeljanovs, V. 2019). Identifying Potential Risks Created by State Joint-Stock Company Latvijas Dzelzceļš Jelgava Station and Evaluating Their Impact on Environment, Inhabitants and Infrastructure. No: *18th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": Proceedings*. Vol.1 8, Latvija, Jelgava, 22.–24. maijs, 2019.
124. Urbans, M., Malahova, J., Jemeljanovs, V. (2020) Methodology for calculating adverse health effects in Latvia. Published by VGTU Press, pp. 195–201.
125. Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība. 153 lpp.
126. Urbans, M. (2021). Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšanas metodoloģija paaugstinātas bīstamības objektos. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība. 48 lpp.
127. Vadlīnijas rūpniecisko avāriju riska objektu izvietošanas minimālo drošības attālumu un teritorijas izmantošanas un apbūves ierobežojumu noteikšanai teritorijas plānošanas dokumentos. (2017). Rīga. 43 lpp.
128. Vaoderhaegen, F., Polet, P. (2000), Human risk assessment method to control dynamic

- situations. *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 33, Issue 11, pp. 753–758.
129. Vesely, B., Stamatelatos, M., Dugan, J., Fragola, J., Minarick, J., Railsbach, J. (2002). Fault Tree Analysis Concepts and Applications, *NASA Publication*, Version 1.1. p. 230.
130. Viscusi, W. (2003). The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world', *Journal of Risk and Uncertainty*, Vol. 27 (1), pp. 5–76.
131. Vlachokostas, Ch., Achillas, Ch., Moussiopoulos, N., Banias, G. (2011). Multicriteria methodological approach to manage urban air pollution. *Atmospheric Environment*. Vol. 45, pp. 4160–4169.
132. Vyzaite, G., Dunnett, S., Andrews, J. (2006). Cause–consequence analysis of non-repairable phased missions. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 91, pp. 398–406.
133. Wilson, R. (2002). Precautionary principles and risk analysis. *Technology and Society Magazine, IEEE*, Vol. 21 (4), pp. 40–44.
134. WHO and the International Society for Burn Injuries issue new fact sheet on burns [tiešsaite]. World Health organization [skatīts 2018. gada 18. septembrī]. Pieejams: http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/other_injury/en/burns_factsheet.pdf 1-5pp.
135. Yun, G., Rogers, W. J., Mannan, M. S., (2009). Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian–LOPA methodology. *Journal Loss Prevention Process Industries*. Vol. 22 (1), pp. 91–96.
136. Zeng, B., Wub, T., Guo, X. (2019). Interprovincial trade, economic development and the impact on air quality in China. *Resources, Conservation & Recycling* Vol. 142, pp. 204–214.
137. Zio, E., Aven, T. (2013). Industrial disasters: Extreme events, extremely rare. Some reflections on the treatment of uncertainties in the assessment of the associated risks. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 91, pp. 31–45.
138. Кусаинов, А. Б. (2017). Оценка комплексного показателя пожарной опасности городов республики Казахстан. Вестник Кокшетауского технического института. № 1.-С. 19–28 стр.

PIELIKUMI

1. pielikums

Apdegumu pakāpes klasifikācija

Apdeguma pakāpe	Definīcija	Siltumstarojuma intensitāte, kWt/m ²	Ilgums, sekundes	Siltumstarojuma deva, J/m ²
I	Ādas apsārtums. Ādas kapilāri paplašinās, audos izplūst plazma – āda kļūst sāra un pietūkst. Šis izpaušmes pazūd pēc 2–4 dienām un beidzas ar pigmentāciju un ādas lobišanos.	7,0	15–20	1,2 × 10 ⁵
		10,5	6–8	
		20	2	
		30	1	
II	Pūšļu veidošanās. Plazma atslāņo ādas raga kārtu, rodas pūšļi. Dažu dienu laikā tie uzsūcas vai plīst, reizēm sastruto. Pēc pūšļa pārplīšanas paliek jēlums, kas sadzīst 1–2 nedēļu laikā (ja nesāk strutot). Kādu laiku uz ādas ir pigmentācija, kas parasti pazūd 6–12 mēnešu laikā.	7,0	30–40	2,2 × 10 ⁵
		10,5	12–16	
		20	3	
		30	2	
III	Brūču veidošanās. Sākumā var līdzināties II pakāpes apdegumam. 3.–5. dienā pēc apdeguma kļūst redzams, vai iespējama ādas pašatjaunošanās (A grupa) vai bojā gājuši visi audi (B grupa). A grupas gadījumā parasti nav nepieciešama ādas pārstādīšana (B grupas apdeguma gadījumā jāveic ādas pārstādīšana). Izņēmums ir nelielas apdeguma brūces, kurām ādas epitēlijs pāraug pāri no brūces malām. Kad šis apdegums pilnīgi sadzīst, paliek rētas. Kad uz ādas ir pigmentācija – jaunā āda vietām ir tumšāka, citur – zaudējusi pigmentu un ir bāla.			3,2 × 10 ⁵
IV	Audu pārogļošanās. Bojātā āda sākumā parasti ir nespodri bālgani pelēka, līdzīga pergamentam, vēlāk kļūst brūna vai pat melna. Audi ir cieti, no ievainojuma neasiņo. Ja apdegums ir visapkārt loceklim (cirkulārs), elastību zaudējušie audi var sažņaut locekli, traucēt tajā asinsriti un radīt nekrozi. Pirmajās stundās pēc apdeguma sāpju kairinājuma, kā arī plazmas zaudējuma dēļ rodas vispārējas pārmaiņas organismā – paātrināts pulss, slāpes, nemiers. Vēlāk, kad sāk uzsūkties bojā gājušie audi, un tad, ja brūce sastruto, zūd ēstgriba, paaugstinās ķermeņa temperatūra, rodas nespēks, novājēšana, tiek traucēta aknu, nieru, sirds un asinsvadu, kā arī gremošanas orgānu darbība.			> 3,2 × 10 ⁵

Vidējais IKP Latvijā, ņemot vērā cenas 2018. gadā (avots: autoru veidots)

Gads	Novērtējuma IKP vērtība, EUR	2,5 %	Gads	Novērtējuma IKP vērtība, EUR	2,5 %
2018	14 704	367,6	2036	22 932,28	573,31
2019	15 071,6	376,79	2037	23 505,59	587,64
2020	15 448,39	386,21	2038	24 093,23	602,33
2021	15 834,60	395,87	2039	24 695,56	617,39
2022	16 230,47	405,76	2040	25 312,95	632,39
2023	16 636,23	415,21	2041	25 945,34	648,63
2024	17 051,44	426,29	2042	26 593,97	664,85
2025	17 477,73	436,94	2043	27 258,82	681,47
2026	17 914,67	447,87	2044	27 940,29	698,51
2027	18 362,54	459,06	2045	28 638,80	715,97
2028	18 821,60	470,54	2046	29 354,77	733,87
2029	19 292,14	482,30	2047	30 088,64	752,22
2030	19 774,44	494,36	2048	30 840,86	771,17
2031	20 268,80	506,72	2049	31 612,03	790,30
2032	20 775,52	519,39	2050	32 402,33	810,06
2033	21 294,91	532,37	2051	33 212,39	830,31
2034	21 827,28	545,68	2052	34 042,7	851,07
2035	22 372,96	559,32			

IKG10_070. Iekšzemes kopprodukts 2018. gadā faktiskajās cenās, tūkstošos EUR

	2018. gads
IEKŠZEMES KOPPRODUKTS	29 523 664
(+) No ārvalstīm saņemtā neto atlīdzība nodarbinātajiem	478 818
(+) No ārvalstīm saņemtā atlīdzība nodarbinātajiem	545 367
(-) Ārvalstīm samaksātā atlīdzība nodarbinātajiem	66 549
(-) Ārvalstīm samaksātie nodokļi par ražojumiem	59 881
(+) No ārvalstīm saņemtās subsidijas par ražojumiem	432 700
(+) No ārvalstīm saņemtie neto īpašuma ieņēmumi	-1 234 071
(+) No ārvalstīm saņemtie īpašuma ieņēmumi	465 210
(+) No ārvalstīm saņemtie procenti	336 008
(-) Ārvalstīm samaksātie īpašuma ieņēmumi	1 699 281
(-) Ārvalstīm samaksātie procenti	283 095

Zaudējumi no cilvēka paliekošas darbaspējas zaudēšanas

Nr.	Darbaspējas zaudēšanas iemesls	Pakāpe, %	Zaudējumi, cilvēkdienas
1.	Letāls iznākums (nāve)	100	7500
2.	Pastāvīga invaliditāte	100	8750
	Daļējs zaudējums		
3.	Visas rokas zaudējums	35	2600
4.	Apakšdelma zaudējums	30	2250
5.	Plaukstas zaudējums	25	1860
6.	Kājas zaudējums	20	1500
7.	Acs zaudējums	15	1125

Miesas bojājumu apraksts atkarībā no traumas pakāpes

Miesas bojājumu pakāpe	Veida Nr.	Bojājuma apraksts
Vidēji smagi miesas bojājumi	1.	Galvaskausa ārējās plātnītes izolēti lūzumi, sietīņkaula acs dobuma daļas lūzumi un izolēti pakauša kaula ārējā locītavpaugura lūzumi bez simptomiem, kas liecina par dzīvības apdraudējumu.
	2.	Krūškaula, vienas ribas vai vairāku ribu lūzumi bez iekšējo orgānu bojājumiem.
	3.	Atsevišķu stobrkaulu nepilni vai nekomplicēti lūzumi.
	4.	Sejas skeleta lūzumi, izņemot nekomplicētus deguna kaula lūzumus.
	5.	Mēles kaula ķermeņa vai radziņu lūzumi bez asfiksijas pazīmēm.
	6.	Balsenes skrimšļu lūzumi bez simptomiem, kas liecina par dzīvības apdraudējumu.
	7.	Lielo locītavu vai locītavu saišu, vai skrimšļu izolēti bojājumi – gūžas, ceļa, pleca izmežģījumi, kā arī citu locītavu izmežģījumi, ja ir locītavas somiņas bojājumi vai saišu plīsumi.
	8.	Galvas smadzeņu un smadzeņu apvalka trauma, kas izraisa apziņas traucējumus (9–12 balles pēc Glāzgovas skales) un nerada draudošu smadzeņu dislokāciju un kompresiju.
	9.	Ilgstošs veselības traucējums, kas ilgāks par 21 dienu.
	10.	Paliekošs veselības traucējums 10–30 % apmērā.
	11.	Psihisks traucējums vai psihiska trauma, kas ilgstoši ietekmē personas sociālo adaptāciju.
Viegli miesas bojājumi	1.	Miesas bojājumi, kas radījuši īslaicīgus veselības traucējumus no 7 dienām līdz 21 dienai, vai tādi, kas tiesu medicīnas ekspertizē atzīti par paliekošu veselības traucējumu mazāk nekā 10 % apmērā.

Pārspiediens, kas atbilst bojājumu pakāpei, kPa

Objekts	Koeficients, a_i Apzīmējums	Bojājums			
		Pilnīgs	Smags	Vidējs	Vājš
		1,0	0,5	0,3–0,4	0,1–0,15
Dzīvojamās ēkas					
Ķieģeļu daudzstāvu ēka	Dz–1	30–40	20–30	10–20	8–10
Ķieģeļu mazstāvu ēka	Dz–2	35–45	25–35	15–25	8–15
Koka ēka	Dz–3	20–30	12–20	8–12	6–8
Ražošanas ēkas					
Ar smagu metālisko vai dzelzsbetona karkasu	R–1	60–100	50–60	40–50	20–40
Ar vieglu metālisko karkasu vai bez karkasa	R–2	60–80	40–50	30–50	20–30
Ar metālisko karkasu un betona aizpildījumu ar stiklojumu laukumu 30 %	R–3	40–50	30–40	20–30	10–20
Ķieģeļu bez karkasa ražošanas nodrošināšanas ēkas ar dzelzsbetona pārsegumu	R–4	45–60	35–45	20–35	10–20
Noliktavu ķieģeļu ēkas	R–5	40–50	30–40	20–30	10–20
Administrācijas ķieģeļu ēkas	1–3 stāvi	R–6	50–60	40–50	20–30
	4–6 stāvi	R–7	45–55	35–45	25–35
Ražošanas objekti					
TEC	RO–1	25–40	20–25	15–22	10–15
Katlumājas	RO–2	35–45	25–35	15–25	10–15
Virszemes cauruļvadi	RO–3	130	50	20	–
Cauruļvadi uz estakādes	RO–4	40–50	30–40	20–30	–
Transformatoru apakšstacijas	RO–5	100	40–60	20–40	10–20
Elektrolīnijas	RO–6	120–200	80–120	50–70	20–40
Ūdenstorni	RO–7	70	40–60	20–40	10–20
Rezervuāri					
Tērauda virszemes	RE–1	90	80	55	35
Gāzes tvertnes un tvertnes ar ķīmiskām vielām	RE–2	40	35	25	20

Objekts	Koeficients, a_i Apzīmējums	Bojājums			
		Pilnīgs	Smags	Vidējs	Vājš
		1,0	0,5	0,3–0,4	0,1–0,15
Daļēji pazemē glabāti naftas produkti	RE-3	100	75	40	20
Apakšzemes glabātavas	RE-4	200	150	75	40
Citi objekti					
Dzelzsbetona un metāliskie tilti	C-1	250–300	200–300	150–200	100–150
Dzelzceļa ceļi	C-2	400	250	175	125
Lokomotīves masa līdz 50 t	C-3	90	70	50	40
Cisternas	C-4	80	70	50	30
Metāliskie dzelzceļa vagoni	C-5	150	90	60	30
Kravas (koka) dzelzceļa vagoni	C-6	40	35	30	15
Kravas automašīnas	C-7	70	50	35	10

Antuāna konstantes²⁴¹

Viela	Formula	A	B	C
Acetaldehīds (Acetaldehyde)	C ₂ H ₄ O	7,05648	1070,60	236
Etiķskābe (Acetic acid)	C ₂ H ₄ O ₂	7,29964	1479,02	216,81
Acetons (Acetone)	C ₃ H ₆ O	7,02447	1161	224
Acetilēns (Acetylene)	C ₂ H ₂	7,09990	711,00	253,38
Amonjaks (Ammonia)	NH ₃	7,36048	926,13	240,17
Argons (Argon)	Ar	6,61562	304,2283	267,31
Benzols (Benzene)	C ₆ H ₆	6,90565	1211,033	220,79
n-Butāns (n-Butane)	C ₄ H ₁₀	6,80897	935,86	238,73
n-Butanols (n-Butanol)	C ₄ H ₁₀ O	7,838	1558,190	196,881
Oglekļa dioksīds, ciets (Carbon dioxide, solid)	CO ₂ (s)	9,81064	1347,788	272,99
Oglekļa dioksīds, šķidr (Carbon dioxide, liquid)	CO ₂ (l)	7,5788	863,35	273,15
Oglekļa monoksīds (Carbon monoxide)	CO	6,24021	230,272	260
Tetrahlorglekklis (Carbon tetrachloride)	CCl ₄	6,9339	1242,43	230
Hlors (Chlorine)	Cl ₂	6,9317	859,17	246,14
Hlorbenzols (Chlorobenzene)	C ₆ H ₅ Cl	6,9781	1431,06	217,55
Hloroforms (Chloroform)	CHCl ₃	6,9547	1170,97	226,23
Cikloheksāns (Cyclohexane)	C ₆ H ₁₂	6,84132	1201,53	222,65
Etāns (Ethane)	C ₂ H ₆	6,80267	656,4028	255,99
Etilacetāts (Ethyl acetate)	C ₄ H ₈ O ₂	7,01457	1211,90	216
Etilspirts (Ethyl alcohol)	C ₂ H ₆ O	8,04494	1554,3	222,65
Etilbenzols (Ethylbenzene)	C ₈ H ₁₀	6,95719	1424,255	213,206
Etilēns (Ethylene)	C ₂ H ₄	6,74756	585,00	255
Fluors (Fluorine)	F ₂	6,80540	310,130	267,15
Hēlijs (Helium)	He	5,32072	14,6500	274,94
Ūdeņradis (Hydrogen)	H ₂	5,92088	71,6153	276,34
Hlorūdeņradis (Hydrogen chloride)	HCl	7,16761	744,490	258,7
Izopropilspirts (Isopropyl alcohol)	C ₃ H ₈ O	8,11822	1580,92	219,61

241 Annex 1 Constants in the Antoine equation. (2008). *Industrial Safety Series*. Volume 8, pp. 333–334.

Viela	Formula	A	B	C
Izopentāns (Isopentane)	C ₅ H ₁₂	6,78967	1020,012	233,097
Svins (Lead)	Pb	7,827	9845,4	273,15
Dzīvsudrabs (Mercury)	Hg	7,8887	3148,0	273,15
Metāns (Methane)	CH ₄	6,61184	389,9278	265,99
Metilspirts (Methyl alcohol)	CH ₄ O	8,07247	1574,99	238,86
Metiletilketons (Methyl ethyl ketone)	C ₄ H ₈ O	6,97421	1209,6	216
n-Dekāns (n-Decane)	C ₁₀ H ₂₂	6,95367	1501,2724	194,48
n-Heptāns (n-Heptane)	C ₇ H ₁₆	6,9024	1268,115	216,9
n-Heksāns (n-Hexane)	C ₆ H ₁₄	6,87776	1171,53	224,366
n-Pentāns (n-Pentane)	C ₅ H ₁₂	6,85221	1064,63	232
Neons (Neon)	Ne	6,08443	78,37729	270,54
Slāpekļa oksīds (Nitric oxide)	NO	8,74295	682,9382	268,27
Slāpekļis (Nitrogen)	N ₂	6,49454	255,6784	266,55
Slāpekļa dioksīds (Nitrogen dioxide)	NO ₂	8,91717	1798,543	276,8
Skābeklis (Oxygen)	O ₂	6,69147	319,0117	266,7
Ozons (Ozone)	O ₃	6,83670	552,5020	250,99
Propāns (Propane)	C ₃ H ₈	6,82970	813,2008	247,99
Stirols (Styrene)	C ₈ H ₈	6,92409	1420	206
Toluols (Toluene)	C ₇ H ₈	6,95334	1343,943	219,377
Ūdens (Water)	H ₂ O	7,94917	1657,462	227,02
o-Ksilols (o-Xylene)	C ₈ H ₁₀	6,99893	1474,68	213,69

Koefficients a_i	Bojājums	Ēkas bojājums, %	Nepieciešamā remonta apmērs	Pārspie- diens, kPa	Sekas cilvēkiem				
					Atkarībā no ēkas bojājuma pakāpes; zaudējumi (%)		Letāls iznākums bojājuma zonā		
					Letālie	Sanitārie	Administrācijas ēkas	Ražošanas ēkas	Atklāts laukums
1,0	Pilnīgs	60–100	Atjaunošana nav iespējama	65–105	0,95	0,05	0,7	0,99	0,5
1,0	Stiprs	50–60		50–65	0,4	0,2	0,15	0,99	0,1
0,5	Vidējs	30–50	Atbilst kapitālajam remontam	30–50	0,05	0,15	0,06	0,6	0,01
0,3–0,4	Vājš	10–30	Atbilst vidējam remontam	10–30	0	0,05	0,02	0,1	0
0,1–0,15	Viegls	< 10	Atbilst standarta remontam	3–10	0	0	0	0	0

Zaudējumi avārijas rezultātā RRO

▶ Tiešie zaudējumi	• Pamatfondu zaudējumi • Materiālo vērtību zaudējumi • Trešo personu īpašuma zaudējumi
▶ Ar avārijas likvidāciju un notikuma izpēti saistīti zaudējumi	• Ar avārijas likvidāciju un lokalizāciju saistīti zaudējumi • Ar avārijas izpēti saistīti zaudējumi
▶ Sociāli ekonomiskie zaudējumi	• Ar personālu saistīti zaudējumi • Zaudējumi personāla traumēšanās rezultātā • Ar trešo personu bojāeju saistīti zaudējumi • Ar trešo personu bojāeju saistīti zaudējumi • Ar trešo personu traumēšanu saistīti zaudējumi
▶ Netiešie zaudējumi	• Alga un nosacīti pastāvīgie zaudējumi dīkstāves laikā • Negūtā peļņa dīkstāves laikā • Ar sodu samaksu saistītie zaudējumi • Peļņas negūšana trešajām personām
▶ Ekoloģiskie zaudējumi	• Ar atmosfēras piesārņojumu saistīti zaudējumi • Ar ūdens resursu piesārņojumu saistīti zaudējumi • Ar zemes piesārņojumu saistīti zaudējumi • Ar bioresursu piesārņojumu saistīti zaudējumi • Ar salauztu konstrukciju rezultātā radītu teritorijas piesārņojumu saistīti zaudējumi
▶ Ar darba resursu zaudējumu saistītie zaudējumi	

Ugunsloides parametri (avots: autoru veidots)

Aprēķina modelis	Ugunsloides diametrs				Ugunsloides pastāvēšanas ilgums			Attālums, m	E_p $E_{p'}$ kW/m ²	q , kWt/m ²
	Koeficienti		Masa, kg	Metri	Koeficienti		Sekundes			
	a_1	b_1			a_2	b_2				
Gayle 1	3,68	0,325	82 300	145,66	0,245	0,356	13,77	262	670,63	28,11
Gayle 2	6,14	0,325	82 300	243,03	0,41	0,34	19,23	262	172,53	16,02
Brasle	3,8	0,333	82300	164,66	0,3	0,333	13,00	262	555,99	28,65
Marshall	5,5	0,333	82 300	238,33	0,38	0,333	16,46	262	209,53	18,94
Roberts	5,8	0,333	82 300	251,33	0,45	0,333	19,50	262	159,10	15,45
SRD	6	0,333	82 300	260,00	0,005		411,5	262	7,045	0,71
Fay & Lewis	6,36	0,333	82 300	275,60	2,57	0,167	17,01	262	151,65	16,57
Hardee	6,24	0,333	82 300	270,40	1,11	0,167	7,34	262	364,77	38,93
Hasegawa (1)	5,28	0,277	82 300	121,39	1,099	0,097	3,29	262	4036,92	122,81
Hasegawa (2)	5,25	0,314	82 300	183,48	1,07	0,181	8,29	262	701,42	43,05
Moorhouse	5,33	0,327	82 300	215,808	0,923	0,303	28,48	262	147,75	11,60
TNO	6,48	0,325	82 300	256,49	0,852	0,26	16,16	262	184,34	18,39
Maurer	3,51	0,333	82 300	152,10	0,32	0,333	13,86	262	610,93	27,57
High	6,2	0,32	82 300	231,91	0,49	0,32	18,32	262	198,82	17,30
HSCC	6,45	0,333	82 300	279,50	5,53	0,333	239,63	262	10,46	1,16
Api	5,33	0,327	82 300	215,80	1,089	0,327	44,09		95,44	7,49
Aloha			82 300	244			15			37
Kulikov	5,33	0,327	82 300	215,80	0,92	0,303	23,8		450	25,57
"Metodiskie norādījumi aprēķināmo ugunsdrošības riska rādītāju noteikšanai ražošanas objektos"	6,48	0,325	82 300	256,49	0,852	0,26	13,88		350	36,23

Ekonomisko un vides zaudējumu novērtēšana (Avots: autoru veidots).

1. bloks.

Apkārtnes izpēte

1. Infrastruktūras identifikācija
2. Numura piešķiršana
3. Attālumu noteikšana
4. Konstrukciju tipa identifikācija
5. Infrastruktūras objekta vērtības noteikšana
6. Cilvēku skaita noteikšana

2. bloks.

Meteoroloģiskā informācija

1. Laikapstākļu noteikšana
2. Vēja virziena noteikšana
3. Gaisa temperatūras noteikšana
4. Atmosfēras stabilitātes klases noteikšana
5. Bezvēja varbūtības noteikšana

3. bloks.

Riska scenāriji

1. Avārijas pamatvarbūtības noteikšana
2. Konkrētas iekārtas noslodzes identificēšana
3. Kopējās avārijas pamatvarbūtības noteikšana
4. Notikuma koka izveide
5. Bīstamības scenāriju noteikšana
6. Kopējās bīstamības varbūtības noteikšana

4. bloks.

Apdraudējuma modelēšana

1. Avārijas scenāriju izvēle
2. Aprēķina metodikas izvēle
3. Avārijas scenāriju modelēšana

5. bloks.

Negatīvo seku un varbūtības novērtēšana videi

1. Negatīvo avārijas seku analīze
2. Avārijas seku varbūtības aprēķins
3. Individuālā riska novērtēšana

6. bloks.

Ekonomisko zaudējumu novērtēšana

1. Dzīves vērtības noteikšana (letālie iznākumi)
2. Ārstēšanas izmaksu noteikšana (traumēšanas gadījumi)
3. Zaudējumu videi noteikšana (infrastruktūras zaudējumi)
4. Kopējo zaudējumu apzināšana

Summary

Nowadays, any assessment method may be used for risk assessment in Latvia, because the laws do not specify a uniform methodology. As a result, the assessment of the consequences and risks of accidents does not provide accurate information, as the assessment of one RRO using different methods leads to different results.

The risk assessment methods considered provide an opportunity to choose the most appropriate and convenient method for assessing RROs. Each specialist can use the most pleasant and understandable method to understand the hazards of RROs, to assess the potential harmful consequences for infrastructure, humans and the environment both inside and outside the RRO area. Such information is particularly useful in planning developments around RROs, as only the identification of the specific consequences and the level of risk identified can provide reasonable information to the management of the site, as well as to the state and local authorities on the possible accident, and plan the necessary response measures outside the RRO area. However, it should be recognised that risk assessment approaches do not provide clear and unambiguous information when the specific negative event occurs. They shall provide information on the scenario of the occurrence of the accident in question, but not the exact time when that happens. If such a negative event occurs, the possible consequences of that negative event may be determined depending on the nature of the object and the characterisation of the chemicals that may cause the emergency event.

The 21st century presents an opportunity to assess the hazards of the RRO site based on pre-existing risk assessment methods with different nuances and application weaknesses. The authors of the monograph give an idea of these assessment methods and their nuances. Examples of hazard and risk assessment calculations are presented separately, designed to enable the reader to better understand the nature of the risk and the assessment procedure without prior experience. The monograph examines both quantitative risk assessment methods, which require a mathematical approach, and qualitative methods, which can be used not only by professionals but also by people who do not have specific knowledge of risk assessment and wish to expand their knowledge. Some risk assessment methods are universal and can be used not only to assess RROs, but also to assess the economic risks to the site, such as cases of non-produced production or production scrap and the reasons which may lead to the production of scrapped production, as well as the possible consequences for the production or disposal of such production. Overall, the risk assessment methods are universal and are often already included in national standards, so the rationale for the specific risk assessment method chosen will always be found in the experience of other national RROs.

In the course of the hazard assessment procedure, it is recommended to use internationally recognised computer modelling programs that reduce the time required for calculation, as well as allow visual identification of possible consequences, such as

the ALOHA program developed in the United States. However, in order to determine the level of risk for RPOS through this programme, it is necessary to know the risk assessment methods and algorithm for linking the output data of the programme with the outcome of the impact assessment. A variety of risk assessment programmes have been developed in the world, giving an immediate result on the extent of the effects on the site.

It should be noted that the use of these programmes is very expensive, and it is not always possible to purchase such a programme and maintain a licence in a separate company. Therefore, the authors of the monograph do not analyse a particular computer program, but provide an opportunity to develop an understanding of which algorithms these programmes work with and how to obtain the necessary result without wasting financial resources. It should be emphasised that each such programme also requires training for a specialist to work with it. If an employee does not work with such a program every day, skills deteriorate over time, and it should also be taken into account that the software is being updated, and its layout and functionality may change. This monograph will therefore continue to be relevant in the longer term, as a specialist will be able to refresh knowledge if necessary.

In order to manage the technogenic environment, society needs to understand the extent and consequences of potential losses, be aware of its current knowledge of the technogenic system and take reasonable safety measures to improve the environment and reduce negative effects. Thus, planning documents based on the assessment of potential a priori losses are a current topic. As the technogenic environment develops, the number of emergency cases has not decreased, and despite improvements in security systems and global development, the negative consequences are only increasing.