

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Virmantas JUOCEVIČIUS

YPATINGŲJŲ POVEIKIŲ STATINIAMS SUKELIAMOS RIZIKOS VERTINIMO METODAS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

prof. dr. Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Gintaris KAKLAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

prof. dr. Romualdas KLIUKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Henrikas PRANEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

dr. Zenonas TURSKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Juozas AUGUTIS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Audronis Kazimieras KVEDARAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2011 m. gruodžio 7 d. 14 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2011 m. lapkričio 5 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1916-M mokslo literatūros knyga.

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Virmantas JUOCEVIČIUS

**A METHOD FOR ASSESSING RISK TO
ENGINEERING STRUCTURES
EXPOSED TO ACCIDENTAL ACTIONS**

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

**TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)**



LEIDYKLA
Vilnius **TECHNIKA** 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Egidijus Rytas VAIDOGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Romualdas KLIUKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Henrikas PRANEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Dr Zenonas TURSKIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

Prof Dr Habil Juozas AUGUTIS (Vytautas Magnus University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Audronis Kazimieras KVEDARAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 2 p. m. on 7 of December 2011.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 5 November 2011.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Virmantas Juocevičius, 2011

Įvadas

Problemos formulavimas

Disertacijoje nagrinėjama statinių pažaidų, sukeliama pramoninių avarijų ir ekstremalių gamtos reiškinių, prognozavimo problema. Pažaidas galintys sukelti avarijų metu kylantys poveikiai vadinami ypatingais poveikiais, o jų pavyzdžiai yra gaisrai, sproginiai, transporto priemonių smūgiai. Ypatingųjų poveikių sukeliama pažaidų problema išlieka aktuali ir šiomis dienomis, nes nepaisant nemažos įvairių inžinerijos sričių pažangos, avarijos, kurių metu kyla tokie poveikiai, yra kasdieninis reiškinys pasauliniu mastu ir gana dažnas reiškinys pavienės šalies mastu. Akivaizdu, kad ir ekstremalūs gamtos reiškiniai (žemės drebėjimai, stiprūs vėjai, potvyniai, nuošliaužos) taip pat sukelia statinių pažaidas. Šie žmogaus sukurti ir gamtos reiškiniai arba tiesiogiai pažeidžia statybinius objektus arba inicijuoja nepalankių įvykių sekas, galinčias pasibaigti statinių avarijomis.

Darbe tiriama, kaip vertinti ypatingųjų poveikių keliamas statybinių objektų pažaidas. Pagrindinė metodologinė problema – kaip vertinti galimų pažaidų tikimybę, derinant ribotą statistinę informaciją apie ypatinguosius poveikius ir subjektyvius ekspertų spėjimus. Vertinant pažaidų riziką taikomi Bajėso statistikos principai.

Darbo aktualumas

Darbo aktualumas išplaukia iš opios pramoninės saugos problemos. Nepaisant visų pastangų šiuolaikinėje pramonėje vyksta avarijos, sukeltos tiek technogeninių reiškinių, tiek ekstremalių gamtos reiškinių. Pramoninių avarių prevencija ir pasekmių mažinimas remiasi kiekybiniu rizikos vertinimu. Jo reikalauja viena iš pagrindinių Europos Sąjungos saugos direktyvų – Seveso II direktyva 96/82/EC. „Statybinis“ pramoninių avarių aspektas yra statinių ir tiesinių pažaidos, sukeltos ypatingųjų poveikių. Vertinant tokių pažaidų riziką tenka pasitelkti kiekybinio rizikos vertinimo metodus. Jie yra grindžiami Bajėso statistine teorija. Šis darbas gvildena, kaip pritaikyti tos teorijos metodus projektuojant statinius. Disertacijoje atskleidžiama, kaip įtraukti konstrukcijų patikimumo skaičiavimą į kiekybinį rizikos vertinimą. Tam pasitelkiama tiek deterministinė konstrukcijų projektavimo metodika, tiek patikimumo teorijos principai, tiek ir neapibrėžtumų modeliavimas pasitelkiant Bajėso metodus. Be tokio derinio įtraukti konstrukcijų projektavimą į pramoninių objektų saugos užtikrinimą būtų problematiška.

Tyrimų objektas

Tyrimo objektas yra statybinių objektų pažaidos, kurias gali sukelti pramoninės ir transporto avarijos bei ekstremalūs gamtos reiškiniai. Jų metu pasireiškiantys pavojingi poveikiai statybos srityje vadinami ypatingaisiais poveikiais. Tiriama, kaip prognozuoti tokių poveikių keliamas statinių pažaidas pasitelkiant rizikos vertinimo metodus.

Darbo tikslas

Tyrimo tikslas – įvertinti ypatingųjų poveikių konstrukcijoms keliamą riziką. Rizikos vertinimas turi būti grindžiamas tų poveikių sukeliamų konstrukcijų pažaidų tikimybės skaičiavimu. Tam reikia derinti kiekybinį rizikos vertinimą ir statybinių konstrukcijų patikimumo skaičiavimo modelius.

Darbo uždaviniai

1. Sukurti metodą, susiejantį rizikos vertinimą ir konstrukcijų patikimumo skaičiavimą. Metodas turi suteikti galimybę vertinti ypatingųjų poveikių sukeliamų statinių konstrukcijų pažaidų tikimybes. Jas reikia taip skaičiuoti, kad tikimybių įverčius būtų galima įtraukti į kiekybinį pramoninių objektų rizikos vertinimą.
2. Pasiiekti, kad siūlomu metodu būtų galima vertinti konstrukcijų pažaidų tikimybes derinant du informacijos šaltinius: matematinį ypatingojo poveikio modelį ir statistinę imtį, gaunamą atlikus eksperimentinius poveikio tyrimus. Šią informaciją reikia panaudoti sudarant apriorinį pažaidos tikimybės reikšmių tankį ir paverčiant tą tankį aposterioriniu tankiu. Jis turi išreikšti episteminį neapibrėžtumą pažaidos tikimybės atžvilgiu Bajėso statistinės teorijos prasme.
3. Surasti būdą vertinti ypatingojo poveikio statinio konstrukcijai sukeltos pažaidos tikimybę, kai informacija apie šį poveikį išreikšta tik statistinės imties pavidalu ir ši imtis yra maža klasikinės statistikos požiūriu. Panaudoti tokiam vertinimui statistinį kartotinės atrankos metodą.
4. Pritaikyti disertacijoje sukurtą metodą vertinant statinių pažaidas, kurias gali sukelti gaisrai, sprogimai ir ekstremalūs vėjai.

Tyrimų metodai

Tyrimų metodika suformuota derinant kiekybinio rizikos vertinimo ir statybinių konstrukcijų patikimumo teorijos metodus. Metodologinis disertacijos branduolys yra Bajėso statistinė teorija. Ja remiasi dauguma kiekybinio rizikos vertinimo metodų. Iki šiol ši teorija retai taikyta prognozuojant ypatinguosius poveikius ir projektuojant konstrukcijas šiems

poveikiams atlaikyti. Siūlomas pažaidų tikimybių vertinimo metodas įgyvendintas taikant Monte Carlo (stochastinį) modeliavimą.

Mokslinis darbo naujumas

Mokslinį naujumą sudaro kiekybinio rizikos vertinimo ir statybinių konstrukcijų patikimumo teorijos metodų derinimas prognozuojant ypatinguosius poveikius ir jų sukeliamas pažaidas. Pastebėta, kad tie poveikiai yra natūralus kiekybinio rizikos vertinimo objektas, o jų sukeliamų pažaidų prognozavimas – šio vertinimo uždavinys. Nauja šiame darbe yra ir tai, kad konstrukcijų skaičiavimo rezultatai, gaunami taikant siūlomą metodą, pateikiami Bajėso ir klasikinės statistikos išraiškomis, nusakančiomis pažaidos tikimybės reikšmės neapibrėžtumą. Toks rezultatų išreiškimas suteikia galimybę juos naudoti vertinant pramoninių objektų riziką.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Praktinė darbo rezultatų reikšmė – galimybė taikyti kiekybinio rizikos vertinimo metodus projektuojant konstrukcijas, kurias gali pažeisti ypatingieji poveikiai. Pasitelkiant šiuos metodus galima tinkamai atsižvelgti į neapibrėžtumus, susijusius su ypatingaisiais poveikiais ir konstrukcijų reakcija į šiuos poveikius. Siūlomą konstrukcijų pažaidų vertinimo metodą santykinai lengva taikyti praktiškai, pasitelkiant kompiuterines programas, parašytas ruošiant šią disertaciją.

Ginamieji teiginiai

1. Ypatingųjų poveikių ir jų sukeliamų pažaidų prognozavimas yra natūralus kiekybinio rizikos vertinimo uždavinys. Jį sunku spręsti taikant įprastinius, deterministinius metodus, kurie šiandien vyrauja projektuojant statybines konstrukcijas. Deterministiniai metodai suteikia mažai galimybių atsižvelgti į neapibrėžtumus, susijusius su ypatingaisiais poveikiais ir jų sukeliamomis statinių pažaidomis.
2. Informacija apie konkretų ypatingąjį poveikį ir statinių pažaidas, kurias jis gali sukelti, būna gana įvairi. Vienas šios informacijos šaltinis gali būti nelabai tikslūs matematiniai modeliai, tinkantys apytikriai vertinti pažaidos tikimybę; kitas – paprastai nedidelė eksperimentinių duomenų, kuriais galima patikslinti pažaidos tikimybės įvertį, imtis. Abu šiuos informacijos šaltinius galima derinti pasitelkiant Bajėso statistinės teorijos metodus.
3. Taikant Bajėso statistinės teorijos metodus pažaidos tikimybei vertinti, rezultatą galima išreikšti tikimybinio skirstinio. Jis kiekybiškai nusako episteminių neapibrėžtumą vertinamos pažaidos tikimybės reikšmės

atžvilgiu. Bajėso statistinėje teorijoje šis skirstinys vadinamas arba aprioriniu arba aposterioriniu, priklausomai nuo to kokia informacija panaudota pažaidos tikimybei vertinti. Kai ypatingųjų poveikių sukeltamų statinių pažaidų tikimybės nusakomos episteminių neapibrėžtumų skirstiniais, galutinį rizikos vertinimo rezultatą galima išreikšti konservatyviais tų skirstinių procentiliais. Jie yra lengviau suprantami nei patys skirstiniai, kai reikia priimti sprendimus užtikrinant pramoninių objektų saugą.

4. Kai informacija apie ypatingąjį poveikį yra išreikšta tik mažo dydžio statistine imtimi ir apriorinį pažaidos tikimybės skirstinį suformuoti sunku, šią tikimybę galima vertinti skaičiuojant pasikliautinuosius intervalus, gaunamus taikant kartotinės atrankos (angl. *bootstrap*) metodą. Jei reikia šis intervalinis vertinimas gali atsižvelgti ir į episteminius neapibrėžtumus.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbo rezultatai publikuoti septyniolikoje mokslo leidiniuose: šeši – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę; du – konferencijų leidiniuose, įtrauktuose į *Thomson ISI Proceedings* duomenų bazę; vienas – recenzuojamame mokslo žurnale; penki – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų leidiniuose; trys – Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijose.

Darbo rezultatai ir teiginiai aprobuoti ir pristatyti septyniose mokslinėse konferencijose:

- 16-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Mechanika 2011“, vykusioje 2011 m. balandžio 7–8 d. Kaune;
- 10-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, vykusioje 2010 m. gegužės 19–21 d. d. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „COMPDYN 2009: *ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering*“, vykusioje 2009 m. birželio 22–24 d. d. Rhodos saloje, Graikijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „ESREL 2008 and 17th SRA – *Europe Conference*“, vykusioje 2008 m. rugsėjo 22–25 d. d. Valensijoje, Ispanijoje;
- 11-ojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, tema „STATYBA“, vykusioje 2008 m. balandžio 2–4 d. d. Vilniuje;

- 9-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, vykusioje 2007 m. gegužės 16–18 d. d. Vilniuje;
- 10-ojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, tema „STATYBA“, vykusioje 2007 m. kovo 29–30 d. d. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, išvados, literatūros šaltiniai, autoriaus publikacijų sąrašas ir keturi priedai. Darbo apimtis – 128 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 117 numeruotų formulių, 31 paveikslas ir 8 lentelės. Rašant disertaciją naudoti 156 literatūros šaltiniai.

1. Pavojingų reiškinių keliamos rizikos vertinimo apžvalga konstrukcijų inžinerijos požiūriu

Pirmajame skyriuje pateikiama kiekybinio rizikos vertinimo metodų, kurie gali būti naudingi prognozuojant ypatingųjų poveikių sukeltą statinių pažaidas, analizė. Ji aprašo ir rizikos vertinimo bei konstrukcijų patikimumo teorijų apjungimo galimybes. Apžvelgtas ir Bajėso statistinės teorijos metodų taikymas vertinant pramoninių objektų riziką. Suformuluojama ypatingųjų poveikių statiniams pavojaus problema ir aptariama, kokiais priemonėmis tą problemą galima būtų spręsti. Matematiškai ši problema išreiškiama kaip statinio konstrukcijų atsako tikimybės vertinimo problema sudarant pažeidžiamumo funkciją. Teigiama, kad reikia taikyti kiekybinio rizikos vertinimo metodus išreiškiant neapibrėžtumus, susijusius tiek su pažeidžiamumo funkcija, tiek su ypatingojo poveikio charakteristikomis. Baigiant apžvalgą yra suformuluojama ypatingųjų poveikių keliamų statinių pažaidų tikimybės vertinimo metodo būtinybė. Pirmasis skyrius apibendrina medžiagą, paskelbtą Juocevičiaus (2008a) bei Vaidogo ir Juocevičiaus (2008b, 2009a, 2007a).

2. Ypatingųjų poveikių sukeltų statinių pažaidų rizikos vertinimo metodas

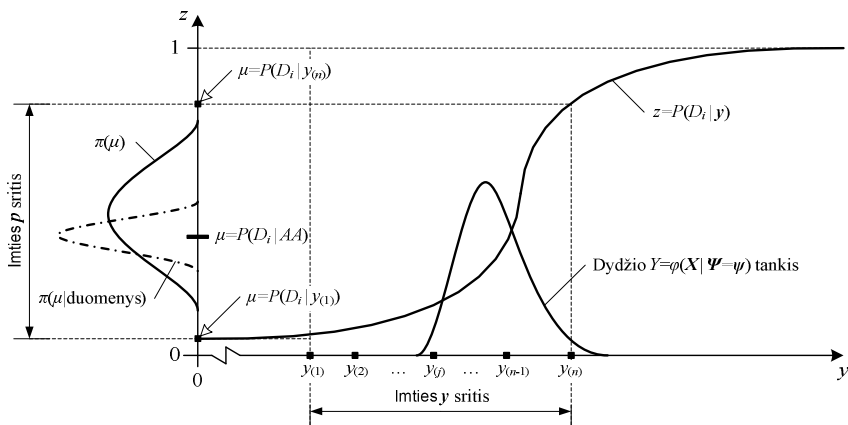
Antrajame skyriuje siūlomas metodas, sukurtas ypatingųjų poveikių sukeltų statinių pažaidų tikimybei vertinti. Pažaidos i patyrimas laikomas atsitiktiniu įvykiu D_i , kurio sąlyginė tikimybė yra $P(D_i | AA)$, o AA – ypatingojo poveikio pasireiškimo įvykis. Šio poveikio charakteristikos nusakomos vektoriumi y . Sąlyginė tikimybė $P(D_i | y)$ yra konstrukcijos pažeidžiamumo

funkcija, kurios argumentai yra y komponentai (1 pav.). Neapibrėžtumas ypatingojo poveikio charakteristikų atžvilgiu yra modeliuojamas atsitiktiniu vektoriumi Y . Jis leidžia išreikšti pažeidimo tikimybę $P(D_i | AA)$ pažeidžiamumo funkcijos $P(D_i | y)$ reikšmių vidurkio pavidalu:

$$\mu = P(D_i | AA) = E_Y(P(D_i | Y)). \quad (1)$$

Taigi, pažeidimo tikimybę galima vertinti kaip atsitiktinio dydžio vidurkį μ . Jeigu žinoti tikimybinį vektoriaus Y skirstinį, tą vidurki galima išreikšti per Y tankio funkciją $f_Y(y)$:

$$P(D_i | AA) = \int_y P(D_i | y) f_Y(y) dy. \quad (2)$$



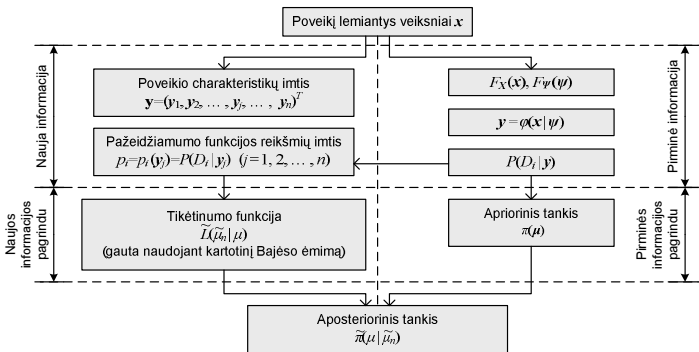
1 pav. Tikimybiniai skirstiniai susiję su statinio pažeidimo D_i tikimybės $P(D_i | AA)$ vertinimu, kai ypatingasis poveikis nusakomas viena charakteristika y (vektorius y yra vienmatis) (Vaidogas ir Juocevičius 2009a)

Daugeliu atvejų statistinių duomenų apie ypatinguosius poveikius truks, kad galėtumėme sudaryti imtis, leidžiančias parinkti tankį $f_Y(y)$. Sprendžiant praktinius uždavinius, ypatingojo poveikio charakteristikas galima prognozuoti dviem būdais:

- Pasitelkiant matematinį modelį $\varphi(x | \psi)$, kuris sieja y su ypatingąjį poveikį lemiančiais vektoriaus x komponentais ir kurio parametrų

vektorius yra ψ . Vektorių x ir ψ komponentų neapibrėžtumą galima išreikšti tikimybiniais skirstiniais su pasiskirstymo funkcijomis $F_X(x)$ ir $F_\Psi(\psi)$ (2 pav.).

- Atliekant eksperimentą, imituojanti ypatingą poveikį ir suteikianti galimybę gauti statistinę imtį $(y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n)$, kurios komponentai yra Y reikšmės. Toks eksperimentas paprastai būna sudėtingas ir brangus, todėl imties dydis n bus mažas. Toliau ši imtis bus žymima simboliu y (2 pav.).



2 pav. Ypatingųjų poveikių keliamų statinio pažeidimų tikimybės vertinimo algoritmas (Vaidogas ir Juocevicius 2009a)

Matematinis modelis $\varphi(x | \psi)$ ir imtis y yra du informacijos šaltiniai, kuriuos galima derinti vertinant tikimybę μ , pasitelkus Bajeso statistinės teorijos metodus. Modelis $\varphi(x | \psi)$, kartu su funkcijomis $F_X(x)$ ir $F_\Psi(\psi)$ gali būti naudojamas parenkant apriorinį tikimybės μ tankį $\pi(\mu)$ (1 pav.). Pavyzdžiui, $\pi(\mu)$ gali būti tokio atsitiktinio dydžio tankis:

$$\tilde{M} = E_X(p_i(\varphi(X | \Psi))) = \int_{\mathcal{X}} P(D_i | \varphi(x | \Psi)) dF_X(x). \quad (3)$$

Čia Ψ yra atsitiktinis vektorius, išreiškiantis modelio $\varphi(x | \psi)$ parametru neapibrėžtumą episteminė prasme, o $p_i(y)$ – trumpesnis pažeidžiamumo funkcijos $P(D_i | y)$ žymėjimas. Apriorinį tankį $\pi(\mu)$ galima parinkti Monte Karlo metodu generuojant Ψ reikšmes $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$ ir tuo pačiu metodu skaičiuojant vidurkio $E_X(p_i(\varphi(X | \Psi)))$ įverčius $\bar{p}_i(\varphi(X | \psi_1)), \bar{p}_i(\varphi(X | \psi_2)), \bar{p}_i(\varphi(X | \psi_3)), \dots$.

Apriorinį tankį $\pi(\mu)$ galima atnaujinti pasitelkiant mažo dydžio imtį y . Kalbant Bajeso statistinės teorijos terminais, y yra nauji duomenys. Tam pradinę imtį y reikia pakeisti kita imtimi, sudaryta iš pažeidžiamumo funkcijos $p_i(y)$ reikšmių:

$$p = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n\} \equiv \{p_i(y_1), p_i(y_2), \dots, p_i(y_j), \dots, p_i(y_n)\}. \quad (4)$$

Imties p komponentai skaičiuojami pasitelkiant statybinių konstrukcijų patikimumo teorijos metodus. Apskaičiavus p , aposteriorinis tikimybės μ tankis turės tokį bendrą pavidalą:

$$\pi(\mu | \text{duomenys}) \propto \pi(\mu) L(\text{duomenys} | \mu). \quad (5)$$

Čia „duomenys“ yra informacija išreikšta imtimi p , o $L(\text{duomenys} | \mu)$ – tikėtinumo funkcija. Disertacijoje siūloma aposteriorinį tankį $\pi(\mu | \text{duomenys})$ vertinti pasitelkiant kartotinės atrankos (angl., *bootstrap*) metodą (Vaidogas ir Juocevičius 2009ab):

$$\hat{\pi}(\mu | \text{duomenys}) \propto \pi(\mu) \hat{L}_B(\text{duomenys} | \mu). \quad (6)$$

Čia $\hat{L}_B(\text{duomenys} | \mu)$ yra tikėtinumo funkcijos įvertis, gaunamas kartotinės atrankos būdu:

$$\hat{L}_B(\hat{\mu}_n | \mu) = \frac{1}{B w} \sum_{b=1}^B \kappa \left(\frac{2\hat{\mu}_n - \mu - \hat{\mu}'_{nb}}{w} \right). \quad (7)$$

Čia $\hat{\mu}_n$ – imties p vidurkis; B – kartotinių atrankų skaičius; w – skaitmeninis parametras; $\kappa(\cdot)$ – standartinio normaliojo tankio funkcija; o $\hat{\mu}'_{nb}$ – imties, gautos b -tąjį kartą imant iš imties p , vidurkis ($b = 1, 2, \dots, B$).

Apriorinis ir aposteriorinis tankiai $\pi(\mu)$ ir $\pi(\mu | \text{duomenys})$ išreiškia episteminių neapibrėžtumą pažeidos D_i tikimybės $P(D_i | AA)$ atžvilgiu (1 pav.). Priimant konstrukcinio pobūdžio sprendimus, $P(D_i | AA)$ įverčiais galima imti konservatyvius šių tankių procentilius.

Vertinti pažeidos tikimybę $P(D_i | AA)$ kartais tenka neturint matematinio modelio $\varphi(x | \psi)$. Informacija apie ypatingąjį poveikį tuomet gali būti turima tik imties y pavidalu. Dažniausiai jos dydis bus mažas. Tuomet $P(D_i | AA)$ galima vertinti ne Bajeso teorijoje naudojamais tankiais $\pi(\mu)$ ir $\pi(\mu | \text{duomenys})$, o

skaičiuojant Fišerio statistikos siūlomus pasikliautinusius $P(D_i | AA)$ intervalus: dvipusį $]\underline{P}_i, \overline{P}_i[$ arba vienpusį $]0, \overline{P}_i[$. Šiuos intervalus galima skaičiuoti naudojant kartotinę atranką iš pažeidžiamumo funkcijos reikšmių imties \mathbf{p} (Vaidogas ir Juocevičius 2007ab). Dvipusis pasikliautinis 100% intervalas skaičiuojamas kartotinę atranką atliekant B kartų ir turi tokį pavidalą:

$$]\underline{P}_i, \overline{P}_i[=]\overline{P}_{B(1-\gamma)/2}, \overline{P}_{B(1+\gamma)/2}[. \quad (8)$$

Čia $\overline{P}_{B(1-\gamma)/2}$ ir $\overline{P}_{B(1+\gamma)/2}$ yra empiriniai $(1-\gamma)/2$ ir $(1+\gamma)/2$ lygmens procentiliai, apskaičiuoti imčiai, sudarytai iš kartotinės atrankos imčių vidurkių \overline{p}_b ($b = 1, 2, \dots, B$).

Pasikliautiniai intervalai $]\underline{P}_i, \overline{P}_i[$ arba $]0, \overline{P}_i[$ tinka vertinti $P(D_i | AA)$ tuo atveju, kai pažeidžiamumo funkcija $P(D_i | \mathbf{y})$ išreiškia tik stochastinį neapibrėžtumą. Kai $P(D_i | \mathbf{y})$ reikšmės yra neapibrėžtos ir epistemine prasme, intervalinį $P(D_i | AA)$ vertinimą galima išplėsti įtraukiant episteminio neapibrėžtumo matus (Vaidogas ir Juocevičius 2011).

3. Siūlomo metodo taikymas gaisro veikiamų konstrukcijų pažeidžiamumui vertinti

Trečiajame skyriuje aprašoma, kaip taikyti disertacijoje sukurtą metodą vertinant gaisro veikiamų medinės statybinės konstrukcijos pažaidos tikimybę. Pagrindinė priežastis, kodėl pasirinkta ši taikymo sritis yra ta, kad gaisro procesui, kaip fiziniam reiškiniui, yra būdingi dideli neapibrėžtumai. Gaisro metu konstrukcijas pažeidžiantys temperatūriniai poveikiai yra, be abejo, atsitiktiniai procesai. Trečiajame skyriuje parodyta, kaip, gavus mažą, 30 elementų turinčią tokių poveikių statistinę imtį, disertacijoje siūlomu metodu vertinti gaisro pažeistos medinės sijos suirimo tikimybę. Šią imtį siūloma sudaryti kompiuteriu atkuriant gaisro procesą ir stochastiškai modeliuojant atsitiktinius tą procesą lemiančius veiksnius. Gaisro modeliavimo rezultatus galima paversti medinės konstrukcijos anglėjimo gylio reikšmių imtimi ir taikyti šią imtį skaičiuojant aposteriorinį konstrukcijos suirimo tikimybės tankį. Tam reikia sudaryti šios konstrukcijos pažeidžiamumo funkciją, o jos argumentas turi būti anglėjimo gylis. Pažeidžiamumo funkciją reikia taikyti ir parenkant apriorinį konstrukcijos suirimo tikimybės tankį (Vaidogas ir Juocevičius, 2008a; Vaidogas *ir kt.* 2009; Linkutė *ir kt.* 2010).

4. Avarinio sproginio sukeltamų statinių pažaidų vertinimas taikant siūlomą metodą

Ketvirtajame skyriuje pateiktas disertacijoje siūlomo metodo taikymo pavyzdys, skirtas vertinti sproginio bangos veikiamo apsauginio barjero pažaidas. Ši metodo taikymo sritis buvo pasirinkta dėl atsitiktinės sproginio sukeltos apkrovos prigimties ir didelių neapibrėžtumų, susijusių su sproginio veikiamų konstrukcijų mechaniniais modeliais (Juocevičius *ir kt.*, 2010; Juocevičius ir Vaidogas, 2010; Linkutė *ir kt.*, 2011). Šiame skyriuje Bajėso metodai taikyti siekiant įvertinti episteminio pobūdžio neapibrėžtumus, būdingus apsauginio barjero konstrukcinio elemento mechaniniam modeliui. Ypatingasis poveikis, tirtas šiame skyriuje – geležinkelio cisternos sproginio sukelta slėgio banga. Poveikis aprašomas maža statistine slėgio signalų imtimi. Barjero pažaidos vertinimo rezultatas yra šią konstrukciją sudarančių profiliuotų plieno lakštų leistinos deformacijos viršijimo tikimybė. Ji vertinama pasikliautinuoju intervalu, skaičiuojamu taikant statistinį kartotinės atrankos metodą. Pasikliautinasis pažaidos tikimybės intervalas gaunamas atsižvelgiant į episteminius mechaninio barjero elemento modelio neapibrėžtumus.

5. Ekstremalių vėjų sukeltamų statinių pažaidų vertinimas taikant siūlomą metodą

Penktajame skyriuje pateikiamas disertacijoje sukurto metodo taikymas uraganinių vėjų atveju. Nagrinėjamos statinių pažaidos, kurias gali sukelti uraganiniai vėjai Lietuvoje. Skyriuje skaičiuojama konstrukcija – gelžbetoninis kamins, veikiamas uraganinių vėjų. Šių vėjų keliamas slėgis laikomas ypatinguoju poveikiu. Poveikis nusakomas maža statistine imtimi, sudaryta iš 17 uraganinio vėjo greičių reikšmių, išmatuotų Lietuvoje per paskutinįjį penkiasdešimtmetį (Vaidogas ir Juocevičius, 2011). Mechaninis gelžbetoninio kamino modelis laikomas neapibrėžtu episteminė prasme, modelio neapibrėžtumas išreiškiamas aprioriniais tikimybiniais jo parametru skirstiniais (Vadlūga *ir kt.*, 2011). Kamino suirimo veikiant uraganiniam vėjui tikimybė vertinama pasikliautinuoju intervalu, gaunamu taikant statistinį kartotinės atrankos metodą. Ši disertacijoje siūlomo metodo taikymo sritis pasirinkta dėl poreikio iš naujo vertinti vėjui jautrių konstrukcijų patikimumą, nes jos Lietuvoje iki šiol buvo projektuojamos naudojant vėjo apkrovas, parenkamas ne pagal uraganinių vėjų matavimus, o pagal mažesnius metinius vėjo greičio maksimumus. Tyrimu nustatyta, kad uraganinių vėjų greičiai ir jų pasireiškimo dažniai viršija Lietuvos projektavimo normose nustatytas skaičiuotines reikšmes.

Bendrosios išvados

Disertacijoje aprašyti rezultatai gauti sprendžiant statinių, kuriuos gali pažeisti ypatingieji poveikiai, projektavimo problemą. Toks projektavimas skiriasi nuo projektavimo, kuris atsižvelgia į poveikius, pasireiškiančius normalaus statinių naudojimo metu. Sprendžiant disertacijos uždavinius gautos tokios išvados:

1. Atlikus kiekybinio rizikos vertinimo ir konstrukcijų patikimumo teorijos metodų analizę nustatyta, kad šios dvi metodologijos nėra pritaikytos skaičiuoti statinių konstrukcijoms, kurias gali pažeisti ypatingieji poveikiai. Prognozuoti ypatingųjų poveikių konstrukcijoms sukeltas pažeidas reikia derinant rizikos vertinimo ir konstrukcijų patikimumo skaičiavimo metodus. Ypatingųjų poveikių modeliavimas yra šias dvi sritis jungianti grandis.
2. Išnagrinėjus statinių konstrukcijų atsako tikimybės išreiškimo galimybes, rasta, kad ypatingojo poveikio sukeltos konstrukcijos pažeidos tikimybę galima išreikšti pažeidžiamumo funkcijos vidurkiu. Tuomet šią tikimybę galima skaičiuoti taikant įvairius statistinius atsitiktinio dydžio vidurkio vertinimo metodus. Nustatyta, kad statinių konstrukcijų pažeidos tikimybę galima vertinti naudojant pažeidžiamumo funkcijos reikšmių imtį, kuri gali būti gauta iš ypatingojo poveikio charakteristikų reikšmių imties. Pažeidžiamumo funkcijos reikšmių imtis gali būti taikoma skaičiuojant pasikliautinąjį konstrukcijos pažeidos tikimybės intervalą.
3. Išnagrinėjus bendrąją atsitiktinio dydžio vidurkio vertinimo procedūrą, taikomą Bajėso statistinėje teorijoje, rasta, kad ypatingųjų poveikių sukeltamų statinių pažeidų tikimybę galima vertinti naudojant du informacijos šaltinius: apytikrą matematinį ypatingojo poveikio modelį ir statistinę to poveikio charakteristikų imtį. Pirmasis informacijos šaltinis suteikia galimybę suformuoti apriorinį pažeidos tikimybės skirstinį, antrasis – tą skirstinį atnaujinti ir gauti aposteriorinį skirstinį. Kai vertinant pažeidos tikimybę yra turimas tik vienas informacijos šaltinis – ypatingojo poveikio charakteristikų imtis – pažeidos tikimybę galima vertinti pasikliautiniu intervalu. Matematinų priemonių grupė, skirta vertinti pažeidos tikimybę Bajėso statistiniu metodu arba skaičiuojant pasikliautinąjį intervalą disertacijoje yra vadinama pažeidos tikimybės vertinimo metodu.
4. Siekiant pritaikyti disertacijoje siūlomą metodą gaisro veikiams medinėms konstrukcijoms skaičiuoti, nustatyta, kad gaisro keliamo

ypatingojo poveikio charakteristikų imtis gali būti gauta kompiuteriu modeliuojant gaisro procesą ir panaudota sudaryti medinės konstrukcijos anglėjimo gylio reikšmių imtį. Tą imtį galima paversti į šios konstrukcijos pažeidžiamumo funkcijos reikšmių imtį. Pastarąją imtį galima taikyti vertinant gaisro pažeistos medinės konstrukcijos atsako tikimybę.

5. Išanalizavus pavojų, kurių kelia galimas avarinis geležinkelio cisternos sproginimas, rasta, kad disertacijoje siūlomas metodas tinka projektuoti barjerą, apsaugantį nuo šio sproginimo. Barjero elementų pažaidos tikimybę galima vertinti taikant santykinai mažą, 30 elementų turinčią sproginimo bangos charakteristikų imtį. Nustatyta, kad skaičiuojamo apsauginio barjero elemento pažeidžiamumo funkcija yra neapibrėžta epistemine prasme. Barjero elemento pažaidos tikimybę reikia vertinti atsižvelgiant į šį neapibrėžtumą. Pažaidos tikimybę galima vertinti skaičiuojant pasikliautinusius intervalus kartotinės atrankos būdu.
6. Surinkus ir apdorojus duomenis apie uraganus, vykusius Lietuvoje per pastaruosius 48 metus, nustatytos dvi uraganinių vėjų pavojaus zonos, apibūdinamos dvejomis statistinėmis 17 ir 10 vėjo greičių matavimų imtimis. Įrodyta, kad pasitelkiant disertacijoje siūlomą metodą šias mažo dydžio imtis galima taikyti vertinant uragano sukeltos vėjui jautrios konstrukcijos pažaidos tikimybę. Nustatyta, kad tam prireiks vertinti tos konstrukcijos pažeidžiamumo funkcijos reikšmes visiems uraganinio vėjo greičių imties elementams atsižvelgiant į skaičiuojamos konstrukcijos mechaninio modelio parametrų neapibrėžtumus. Disertacijoje siūlomas metodas taip pat gali būti taikomas projektuojant gelžbetoninį kaminą uragano poveikiui.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2011. A critical estimation of data on extreme winds in Lithuania. *Journal of Environmental Engineer and Landscape Management* 19(2): 178–188. ISSN 1648-6897. (Thomson ISI Web of Science)

Juocevičius, V.; Vaidogas, E. R. 2010. Effect of explosive loading on mechanical properties of concrete and reinforcing steel: towards developing a predictive model. *Mechanika* 1(81): 5–12. ISSN 1392-1207. (Thomson ISI Web of Science)

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2009a. Assessment of structures subjected to accidental actions using crisp and uncertain fragility functions. *Journal of Civil Engineering and Management* 15(2): 95–104. ISSN 1392-3730. (Thomson ISI Web of Science)

Juocevičius, V. 2009. Dependence of strength enhancement on shock front overpressure: the case of RC structures. *Science – Future of Lithuania* 1(5): 25–29. ISSN 2029-2341.

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2008a. Reliability of a timber structure exposed to fire: estimation using fragility function. *Mechanika* 5(73): 35–42. ISSN 1392-1207. (Thomson ISI Web of Science)

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2008b. Sustainable development and major industrial accidents: the beneficial role of risk-oriented structural engineering. *Technological and Economic Development of Economy: Baltic Journal on Sustainability* 14(4): 612–627. ISSN 1392-8619. (Thomson ISI Web of Science)

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2007a. Assessing external threats to structures using limited statistical data: an approach based on data resampling. *Technological and Economic Development of Economy: Baltic Journal on Sustainability* 13(2): 170–175. ISSN 1392-8619. (Thomson ISI Web of Science)

Straipsniai kituose leidiniuose (ISI Proceedings)

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, Virm.; Juocevičius, Virg. 2009. Developing fragility function for a timber structure subjected to fire, in *ESREL 2008 and 17th SRA–Europe Conference*, held in Valencia, Spain on 22–25 September. 2009. Universidad Politécnica de Valencia. London: Taylor & Francis Group. Selected papers 1–4: 1641–1649. ISBN 978-0-415-48513-5. (Thomson ISI Proceedings)

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2007b. Utilising fragility functions in assessing damage to structures due to accidental actions, in the *9th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, held in Vilnius, Lithuania on 16–18 May. 2007. Vilnius: Technika. Selected papers 3: 1090–1099. ISBN 978-9955-28-200-6. (Thomson ISI Proceedings)

Straipsniai kituose leidiniuose

Vadlūga, R.; Juocevičius, V.; Vaidogas, E. R. 2011. Developing fragility functions for the estimation of extreme wind damage to chimneys, in the *16th International Conference “Mechanika 2011”*, held in Kaunas, Lithuania on 7–8 April. 2011. Kaunas: Technologija. Selected papers: 311–316. ISSN 1822-2951.

Linkutė, L.; Juocevičius, V.; Vaidogas, E. R. 2011. Numerical evaluation of concrete and steel strain rate in the RC section subjected to high rate loading, in the *16th International Conference “Mechanika 2011”*, held in Kaunas, Lithuania on 7–8 April. 2011. Kaunas: Technologija. Selected papers: 209–214. ISSN 1822-2951.

Juocevičius, V.; Linkutė, L.; Vaidogas, E. R. 2010. Assessment of potential mechanical damage to tanks of flammable liquids, in the *10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, held in Vilnius, Lithuania on 19–21 May. 2010. Vilnius: Technika. Selected papers 2: 1237–1245. ISBN 978-9955-28-594-6.

Linkutė, L.; Juocevičius, V.; Vaidogas, E. R. 2010. On reliability of timber structures subjected to fire, in the *10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, held in Vilnius, Lithuania on 19–21 May. 2010. Vilnius: Technika. Selected papers 2: 1266–1273. ISBN 978-9955-28-594-6.

Vaidogas, E. R.; Juocevičius, V. 2009b. Propagation of epistemic uncertainty in the fragility function used for bayesian estimation of failure probability, in *the COMPDYN 2009: ECCOMAS thematic conference on computational methods in structural dynamics and earthquake engineering*, held in island of Rhodes, Greece on 22–24 June. 2009. Athens: National Technical University of Athens. In the volume of abstracts and accompanying CD-ROM: 1–19. ISBN 978-9602-54-682-6.

Juocevičius, V. 2008a. Assessment of Damage due to accidental actions: discussion on problematic issues, in *11th Conference of Lithuanian Young Scientist „Science – Future of Lithuania“ thematic conference “STATYBA”*, held in Vilnius, Lithuania on April 2–4. 2008. Vilnius: Technika. Selected papers: 93–102. ISBN 978-9955-28-319-5.

Juocevičius, V. 2008b. Developing fragility function for a timber structure subjected to fire, in *11th Conference of Lithuanian Young Scientist „Science – Future of Lithuania“ thematic conference “STATYBA”*, held in Vilnius, Lithuania on April 2–4. 2008. Vilnius: Technika. Selected papers: 103–112. ISBN 978-9955-28-319-5.

Juocevičius, V. 2007. Probabilistic prediction of prestress losses in concrete members, in *10th Conference of Lithuanian Young Scientist „Science – Future of Lithuania“ thematic conference “STATYBA”*, held in Vilnius, Lithuania on March 29–30. 2007. Vilnius: Technika. Selected papers: 160–165. ISBN 978-9955-28-163-4.

Trumpos žinios apie autorių

Virmantas Juocevičius gimė 1983 m. kovo 10 d. Vilniuje.

2005 m. įgijo statybos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos fakultete. 2007 m. įgijo statybos inžinerijos magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos fakultete. 2007–2011 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Nuo 2002 iki 2004 dirbo inžinierium UAB „Skanska statyba“, nuo 2004 iki 2007 – inžinierium konstruktorium UAB „Constructus“, nuo 2007 iki 2008 – inžinierium konstruktorium UAB „Ecodomus“, nuo 2008 iki dabar dirba konstrukcinės projekto dalies vadovu UAB „Conserela“, nuo 2010 iki dabar – direktorium UAB „Doris group“, nuo 2011 iki dabar – asistentu Vilniaus Gedimino technikos universitete darbo ir gaisrinės saugos katedroje.

A METHOD FOR ASSESSING RISK TO ENGINEERING STRUCTURES EXPOSED TO ACCIDENTAL ACTIONS

Formulation of the problem

This work considers in the broad sense the phenomenon of industrial accidents. They are well-known due to their severity and catastrophic losses which sometimes involve the loss of human lives. The present work is devoted to the assessment of the damage caused by the accidents. The relevance of this work stems from occurrences of the accidents involving mechanical damage to constructed facilities. Despite the progress in various fields of engineering, accidents involving explosions, collisions and fires are still an almost everyday phenomenon on the worldwide scale, and relatively frequent phenomenon on the nationwide scale in most countries. Needless to say that extreme natural phenomena (earthquakes, strong winds, floods, landslides, etc.) are also an often cause of accidents in industrial facilities.

Topicality of the problem

The prevention of major accidents is unthinkable without assessment of risk posed by hazardous activities in industry. The risk of an industrial accident can be a relatively complex concept; however, both accident consequences and their likelihood will in many cases involve damage to constructed facilities. Thus it can be indispensable for the risk assessment to predict damage to specific structures by the estimation of the probability that this damage will occur in the course of an accident. An industrial accident is a natural subject of the quantitative risk assessment (QRA). It is natural to assume that the “structural part” of the risk should also be estimated by means of QRA. From the structural point of view, the industrial accident is a physical process which generates abnormal and unexpected actions and these can be imposed on structures during the accident. In the European design codes these actions are called the accidental actions (AAs). A full scale assessment of the risk related to a potential industrial accident will inevitably involve an analysis of structures exposed to AAs.

The topicality of the problem considered in the dissertation consists to a large margin in the need to deal with usually very limited statistical data on characteristics of a specific AA. The engineer will usually be faced with the necessity to assess potential damage by means of such data. This can be done, at least in some cases, by applying the method proposed in the dissertation.

Research object

The object of research is damage to constructed facilities caused by AAs which are induced during industrial accidents and extreme natural phenomena. It is investigated how to predict this damage by applying methods of QRA.

The aim of the work

The aim of the dissertation was an assessment of the risk to constructed facilities posed by AAs. The core of the risk assessment was an estimation of probabilities of foreseeable damage events. Such estimation required to combine methods of QRA and structural reliability theory.

Tasks of the work

1. To develop a method which allows to assess the damage to structures due to AAs by applying principles of QRA and structural reliability analysis (SRA). The method should be aimed at an estimation of probabilities of potential damage. Estimates of these probabilities must be suited to the integration into a general framework of QRA.
2. To achieve that the proposed method would allow to combine two sources of information on an AA typically available for the engineer: a mathematical model used for predicting AA and a statistical sample consisting of direct experimental measurements of the AA. This information must be used for choosing a prior density of the damage probability and updating this density to a posterior density.
3. To build an approach which allows to estimate the probability of damage to structure due to an AA in the case when information on this AA is expressed only by a statistical sample which is small from the standpoint of the classical statistics. To apply the method of bootstrap resampling to such an estimation.
4. To apply the method proposed in the dissertation to assessing damage to structures subjected to fires, accidental explosions and extreme winds.

Methodology of research

The research methodology was formed by a combination of methods developed and widely used in the fields of QRA and SRA. The methodological core of the research was the Bayesian approach to QRA. This approach underpins most methods of QRA; however, it was only sparsely applied to prediction of AAs and design of structures for AAs. A stochastic simulation (Monte Carlo method) was used as the main computational means for an estimation of probabilities of damage caused by AAs.

Scientific novelty

The main element of scientific novelty consists in combining methods of QRA and SRA in an attempt to predict structural damage caused by AAs. As AAs and damage from them are natural subjects of QRA, the damage assessment was carried out by an extensive application of QRA methods to structural analysis. The method of damage assessment proposed in the dissertation can be considered to be an extension of SRA. This method is based on SRA; however, the new element is that results of its application express uncertainties in the values of damage probabilities. These uncertainties can be quantified, for instance, by Bayesian prior and posterior distributions. They match naturally a methodological framework of QRA. Estimates of damage probabilities allow to integrate structural damage into the total spectrum of consequences to be identified in a full-scale QRA.

The method proposed in the dissertation for estimating damage probabilities is based on the Bayesian reasoning has the advantage of an application of different sources of information including expert knowledge. As far as we know such an approach has not been developed until now in the field of the analysis and design of structures for AAs. We think that the results obtained in the dissertation will allow to carry out the damage assessment in a more realistic and methodologically consistent way.

Practical significance of the work results

The practical significance of the results achieved in this work is a possibility to design structures for AAs by a consistent application of QRA methods. This will allow to increase safety of industrial facilities and transportation objects, which are prone to accidents capable to induce severe AAs. In addition, the method proposed in this work will make the design of structures for AAs more adequate and reliable as compared to the design based on the traditional deterministic approach. The development of the method proposed in this work resulted in several computer codes and these can also contribute to practical implementation of the results.

The statements presented for the defence

1. The phenomenon of AAs and damage to structures caused by AAs are a natural subject of QRA. Dealing with this phenomenon by means of the deterministic approaches prevailing in the today's structural design practice has obvious shortcomings. The deterministic approaches do not provide adequate means for modelling uncertainties related to AAs and damage due to AAs.

2. Knowledge available about a specific AA and potential damage which can be caused by this AA can have different forms. One part of this knowledge is general information which allows an approximate assessment of AA characteristics and damage probability. Another part of this knowledge can be a small-size sample of AA characteristics. This sample can be highly relevant to the situation of exposure of a structure to a specific AA. A combination of these two sources of information is possible within the scheme of the Bayesian updating.
3. In the case where Bayesian reasoning is applied to damage assessment, a natural result of this assessment can be a prior or posterior distributions expressing epistemic (state-of-knowledge) uncertainty in the damage probability. Practical decisions concerning the potential damage from an AA can be made by applying conservative percentiles of these distributions.
4. In the specific case where information about an AA is available in the form a small-size sample of its characteristics and it is difficult to develop an adequate prior distribution of the damage probability, this probability can be estimated by confidence intervals computed by applying the method of bootstrap resampling. If necessary, measures of epistemic uncertainty can be introduced in such estimation.

Approval of the results

Results of this dissertation were presented in 17 scientific publications: six journal articles included in the Thomson ISI Web of Science data base, two papers published in the conference proceedings and included in the Thomson ISI data base, one article published in a reviewed scientific journal, five articles published in proceedings of international conferences and three papers included in the proceedings of the Lithuanian conference of young scientists.

Dissertation structure

The dissertation consists of Introduction, 5 Chapters, Conclusions, References, List of Publications and 5 Annexes. The volume of the dissertation is 128 pages, excluding annexes, 117 numbered formulas are used, 31 figures and 8 tables. Dissertation includes 156 references.

Chapter 1 presents a review of published work on the assessment of risk to structures posed by accidental actions. Chapter 2 proposes a method developed for the assessment of damage to structures from these actions. Chapters 3 to 5 deal with an application of the proposed method to the estimation of risk to structures due to fires, accidental explosions and hurricane winds.

General conclusions

The results presented in the dissertation were obtained by solving the problem of a design of structures which can be damaged by accidental actions. Such a design differs considerably from the structural design which takes into account actions to be resisted during normal service of structures. Solving the problem considered in the dissertation led to the following conclusions:

1. The analysis of methods used in the fields of quantitative risk assessment and structural reliability allows to conclude that these two methodologies are not fully suited to the design of structures which can be damaged by accidental actions. A prediction of damage to structures due to accidental actions requires to combine methods of quantitative risk assessment and structural reliability theory. Predicting accidental actions is a connecting link between these two fields.
2. An analysis of mathematical expressions of structural failure probability led to a discovery of a possibility to express the probability of damage due to an accidental action in the form of a mean of fragility function values. This allows to estimate the damage probability by applying various statistical methods used for a mean estimation. It was found that the damage probability can be estimated by means of a statistical sample consisting of fragility function values. This function can be obtained from a sample of accidental action characteristics recorded in experiment. The sample of fragility function values can be applied to compute an interval estimate of the damage probability.
3. An analysis of the general procedure of estimating a mean value of random variable used in the Bayesian statistical theory led to a finding that the probability of structural damage caused by accidental actions can be estimated using two sources of information: an approximate mathematical model of the accidental action and a sample containing records of characteristics of this action. The first source of information can be applied to developing a prior distribution for the damage probability. The second source can be used for updating the prior distribution and obtaining a posterior distribution of this probability. In the case where the information on the accidental action is available only in the form of the sample of action characteristics, the damage probability can be estimated by means of a confidence interval.
4. The method proposed in the dissertation can be used to assessing fire damage to timber structures. The sample containing characteristics of accidental action induced by fire can be obtained by means of computer simulations of the fire. Such a sample can be transformed into a sample of containing values of the depth of char layer caused by

- fire. The latter sample can be used for generating a sample of fragility function values and consequently to estimating the failure probability of a timber structure damaged by fire.
5. An analysis of the hazard posed by a potential accidental explosion of a railway tank car allows to conclude that the method proposed in the dissertation is suitable to a design of a safety barrier aimed at protecting against this explosion. The probability of damage to components of this barrier can be estimated by applying a sample consisting of 30 values of characteristics of the blast generated by the explosion. It was found that the fragility function developed for barrier is uncertain in the epistemic sense. The probability of explosive damage to the barrier should be estimated by taking into account this uncertainty. The damage probability can be estimated by means of a confidence interval obtained using bootstrap resampling.
 6. A collection and processing of data on hurricane winds recorded in Lithuania during the past 48 years led to a proposition of two hurricane wind regions represented by two statistical samples of wind speed records including 17 and 10 elements. It was proved that the method proposed in the dissertation allows to apply these small-size samples to estimating the probability of wind-induced damage to a wind sensitive structure. Such estimating required to compute values of wind fragility function for all elements of wind speed samples by taking into account uncertainties related to mechanical model of structure. The method proposed in the dissertation can be used for a design of a reinforced concrete chimney subjected to the hazard of hurricane winds.

About the author

Virmantas Juocevičius was born in Vilnius, on 10 of March 1983.

First degree in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2005. Master of Science in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2007. In 2007–2011 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. From 2002 till 2004 worked as engineer in JSC Skanska statyba, from 2004 till 2007 – as structural engineer in JSC Constructus, from 2007 till 2008 – as structural engineer in JSC Ecodomus, from 2008 till now – as senior structural engineer in JSC Conserela, from 2010 till now – as general manager in JSC Doris group, from 2011 till now – as assistant in the Department of Labour Safety and Fire Protection Department of Vilnius Gediminas Technical University.