



Konstantin RASIULIS

**ANALYSIS AND EVALUATION OF THE LOCAL
GEOMETRICAL DEFECTS ON THE WALLS
OF THE OVER GROUND CYLINDRICAL
VERTICAL TANKS**

**Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)**

1440



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2007

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Konstantin RASIULIS

**ANALYSIS AND EVALUATION OF THE LOCAL
GEOMETRICAL DEFECTS ON THE WALLS
OF THE OVER GROUND CYLINDRICAL
VERTICAL TANKS**

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)



Vilnius LEIDYKLA **TECHNIKA** **2007**

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2003–2007.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Antanas ŠAPALAS (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 Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof Dr Habil Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Institute of Mathematics and Informatics, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Assoc Prof Dr Algirdas JUOZAPAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Assoc Prof Dr Žymantas RUDŽIONIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

Prof Dr Habil Jonas BAREIŠIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Habil Gintaris KAKLAUSKAS (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 29 January 2008.

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@adm.vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 29 December 2007.

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).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Konstantin RASIULIS

**PLIENINIŲ ANTŽEMINIŲ CILINDRINIŲ
VERTIKALIŲJŲ TALPYKLŲ SIENELĖS
GEOMETRINIŲ NUOKRYPIŲ ANALIZĖ IR
VERTINIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2007

Disertacija rengta 2003–2007 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Antanas ŠAPALAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

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

Pirmininkas

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

Nariai:

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

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Matematikos ir informatikos institutas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

doc. dr. Algirdas JUOZAPAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

doc. dr. Žymantas RUDŽIONIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Jonas BAREIŠIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

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

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2008 m. sausio 29 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@adm.vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2007 m. gruodžio 29 d.

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

VGTU leidyklos „Technika“ 1440 mokslo literatūros knyga.

General characteristic of the dissertation

Topicality of the problem. Rapid development in the world of huge industrial complexes in 1960–1970 became possible due to exact and effective analytical methods of calculations. It corresponded to the growth rate of the amount of products. Therefore the problems of residual resources of the engineering buildings, their defects, taking into account the operation features have not been considered as the questions of primary importance.

Major repair or regular inspection of the large capacity thin-walled tankages is very expensive. Steel cylindrical tanks are an individual case of the thin-walled tankages. The common calculation of the tanks by analytical and numerical methods is not difficult. Strengthening of the places, where a perfect calculated form is disturbed, that is, at the spots of incuts, hatches, defects etc. is a responsible part of the design of such constructions. The problems of prevention of defects during the operation period and repairs, as well as possibility to assure quickly the safety of defective places of the constructions are more important than the common calculations.

In the classical theory of defects estimation of the problem has been presented for the „sharp“ (incuts, cracks etc) and „soft“ (dents, bulges, flaps etc) defects. The „sharp“ defects are more dangerous because of a higher risk of the destruction. The „soft“ defects are not investigated so widely as the „sharp“ ones and their limitation concerns the geometrical parameters only. Moreover, the influence of such defects location, their forms, thickness of the wall tank etc has not been taken into account. The above-mentioned reasons show that the „soft“ defects are not sufficiently investigated and there is a possibility to improve methods of their evaluation.

Allowable imperfections depend on Design Codes

Standard		Allowance, %
ENV 1993-1-6: Eurocode 3	A	$f \leq 0,6$
	B	$f \leq 1,0$
	C	$f \leq 1,6$
API 650		$f \leq 1,4$
SNIP III-18-75		$f \leq 1,0$
DIN 18800		$f \leq 1,0$

Design codes and operating tanks exist mainly in the USA, Russia, Germany and the whole Europe (Table). There parameter f is a depth of the dent. It cannot exceed a definite percentage of the dent diameter. The codes of the above-mentioned countries limit the dimension of the „soft“ defects during mounting and operation procedures. According to the presented allowable deviations (Table) the codes differently limit the sizes of „soft“ defects. In the

Eurocode the maximum deviation from a perfect form of the structure was proposed. It amounts to 1,6 % of the dent diameter. In this case the structure is considered to be of a good quality, class „C“. In other codes as API, SNIP and DIN the average values of deviations of the defects are used. These allowances are not used in calculations. The considered allowances are very common and do not take into account the place of defects, thickness of the wall, radius etc.

The manufacture and assembling of the cylindrical tanks with a capacity of 5 000–50 000 m³ are very complicated processes and thus already during putting them into operation the local defects are seen on the walls of the structures. The accumulation of the „soft“ defects and the increase of the available ones requires a regular evaluation of the tank fitness for further use. This question is very important for structures with a final operation period. A professional conclusion about the mechanical condition of the structure is very important. Alongside with the plans of the company development the following conclusions can be made: a) expensive overhaul and further operation; b) examination of the tank replacement possibility.

On the other hand, actually a lot of tanks with the defect values exceeding those allowable by the codes are practically used, and this fact, as it follows from the observations, does not cause deterioration of the tanks state.

However, the developments of accurate analytical models are particularly essential for the state investigation of the structures to be applied. To date such solutions are of special concern for practising engineers.

Main objective. The main objectives of the presented investigations are to identify stress/strain state of the tank wall with local imperfections from the ideal cylindrical surface and to determine influence of the local imperfection on safety exploitation of the tank taking into account the membrane theory of the shells by using the semianalytical theory, natural experiment and finite element's method.

Main tasks. In order to achieve the main objective, the following problems have been solved:

1. The existing methods of the evaluation of the stress/strain state on the wall tank with a „soft“ defect were considered.
2. The optimum size of the finite elements for calculation of the wall tank with a dent was defined.
3. The optimum finite elements mesh and type of the element were considered.
4. Locations of the dent point with maximum values of the stresses and displacements have been defined.
5. Linear calculations of the tank wall with the defect by the finite element method were executed.
6. The geometrical and physical non-linear calculations of the tank wall with the defect by finite element method were made.
7. The stress/strain state of the wall with three forms of the defect, semi sphere, cone and truncated cone, were analysed by the finite element method.

8. The stress/strain state of the steel plate with the soft defect was analyzed using experimental method.
9. The most dangerous place and failure mechanism of the tensile plate with a dent was obtained.
10. The calculations of the steel plate with the soft defect were executed when physical non-linearity of the material and geometrical non-linearity of the deformations are taken into account.
11. The comparisons of the stress/strain states of the steel plate with the soft defect and tank wall with the soft defect were executed.
12. The stress concentration factors depending on the dent geometry and kind of the steel has been defined.

Scientific novelty

1. The calculation method of the wall tank segment with the dent has been proposed.
2. The calculated algorithm of the stress concentration factor of the dent on the tank wall was proposed taking into account forms of the dent, its geometry as well as geometry of the tank.
3. A method of the stress concentration factor determination in the most dangerous portion of the semi-spherical defect is suggested when physical non-linearity of the different steels and geometrical non-linearity of the deformations of the tank wall are taken into account.
4. The method of the research of the stress/strain state of the plate with the dent was developed.
5. The stress concentration factor of the dent on the surface of the plate was stated.
6. The practical evaluation method of the influence of the soft defect on safe exploitation of the tank is proposed.

Methodology of research. From the practical point of view and for more exact conclusions about mechanical state, near the „soft“ defect minimum, two duplicated investigation methods should be applied. In this investigation the *experimental method* (EM) as well as *finite element analysis* (FEA) methodology was taken into account.

Approbation and publications. The main results of this work were reported at eight scientific technical conferences. Fourteen papers were published on the topic of the doctoral thesis and four of them were published in the journals, which are included in to the list approved by the Department of Science and Higher Education in Lithuania.

Practical value. The results of carried out investigations can be used to improve allowances sizes of geometrical defects specified by codes and to improve evaluation the state of the tank with geometrical defects. Therefore the term of the safe usage of the tank can be increased.

Defended propositions

1. The geometrical defects are not main cause of tank's collapse.
2. The calculated algorithm of the stress concentration factor.
3. The allowances of the geometrical defects by codes should be specify by location, forms, construction etc.

The scope of the scientific work. The thesis consists of general description, list of notations, 60 pictures, 10 tables, six main chapters, general conclusions and list of references. The total scope of the dissertation is 140 pages.

THE CONTENT OF THE DISSERTATION

1. Design, operation and investigation of over ground metal cylindrical vertical tanks

Practical observations prove that accumulation of defects becomes the main reason of a failure if the tank is being used for 20–25 years. In many cases, local shape defects (Fig 1), according to statistical investigations, are considered as



Fig 1. Examples of local shape defects of steel cylindrical tanks

secondary factors of various technical collapses. More importantly, the influence of such defects is observed in combination with poor-quality steel, near welded zones or next to the rigidity ribs. The „soft“ defects are not investigated as widely as the „sharp“ ones. The design codes and operating tanks in the USA, Europe and Russia limit the dimension of the „soft“ defects during mounting and operation procedures. According to allowable deviations the codes differently limit the sizes of „soft“ defects. The allowances are very common and do not take into account the place of defects, thickness of the shell, radius etc.

Practically, to study the influence of local shape defects on the thin walls of a tank, the descriptions of 84 cylindrical steel tank crashes have been investigated. In general, the most valuable 16 factors have been considered. In many cases, local shape defects can be described as an additional factor. On the other hand, this factor should be taken into account during the analysis of the mechanical behaviour of a geometrically non-perfect structure.

Besides, local shape defects are not considered to be uncommon phenomenon. For example, an industrial complex of 78 thin-walled cylindrical

tanks has been designed for light oil products. A great part of local geometric defects has been disclosed on the first (lowest) strip of the tanks. Generally, 286 defects have been detected (Fig 1), 106 of which had the highest geometrical parameters in comparison with those limited by the standards. On the other hand, practically a lot of tanks with defect values exceeding those allowable by the standards are used, and this fact, as it follows from observations, does not cause deterioration of the tanks state.

Detection of more accurate dependences between allowable values factors and parameters of the specific tank in the analysed investigations is based on analytical relations of the stress distributions, as well as on results of the observations of defects on the tanks used. Methods of the defect evaluation on pipes, as well as calculations of the *stress concentration factors* (SCF) on tensile plates were widely applied for getting formula for calculating SCF. The most dangerous points for the dent are upper points of its contour and its middle point. The most dangerous SCF with „variable success“ is available in the areas mentioned. The proposed formulas for the analysis of the wall's stress condition across the dent area are expressed by a polynomial with empirical factors. In this case, in contrast to the codes, the influence of the thickness t and radius R of the tank wall is taken into account, besides the principal differences between middle and contour points are indicated. Results of analysing the stress condition of the wall for a tank of specific capacity with initial parameters $R = 11,5$ m, $H = 12,0$ m and $t = 7$ mm are different when the methods considered are used. It is obvious that the methods are not perfect enough and opinions concerning investigation of the given object are also different. It should be noted that all formulas take into account elastoplastic deformations of the material.

2. Linear calculation of cylindrical tanks with the „soft“ defect by the finite elements method

The modelling of defect for a real structure has been performed. In this case the main solutions are made by using standard finite element code COSMOS/M.

For modelling of the problem by COSMOS/M, 1/12 portion of the cylindrical tank was taken, considering conditions of geometric shape symmetry and loading by the liquid pressure from within. The tank parameters were as follows: $R = 11,5$ m, $H = 12,0$ m and the wall thickness at a site of the defect $t = 7$ mm. Tetragonal *finite elements* (FE) of “SHELL” type having 4 nodes and described by 24 *degrees of freedom* (DOF) were employed during this calculation. A segment of the tank has been subjected to the product pressure, which have been linearly applied.

In the present research the analysed „soft“ defect in the form of a dent has two dangerous areas. They are middle and contour areas of the dent. Within each marked area there are peculiar points of the stress or/and displacement concentration. For the examined defect there are points „a“ and „b“. In order to

determine the FE optimum size the results of the numerical calculations of the tank wall with the dent have been analysed.

From the presented results it is clear that size of the finite element at the defect place is more important for a contour point's results than for its middle part. The optimum size of the FE is 50 mm ($\zeta = 7,1$).

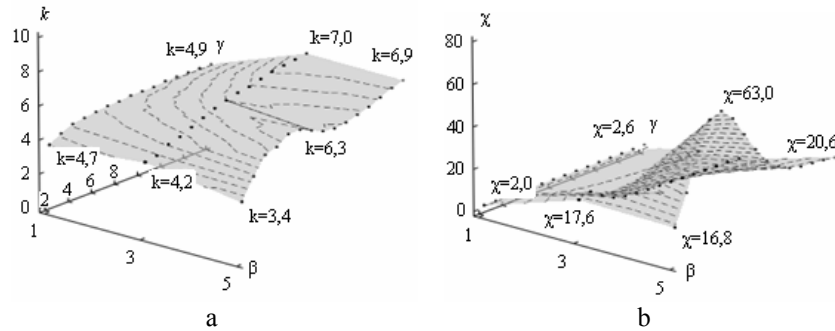


Fig 2. Variation of SCF (a) and DCF (b) depending on defect sizes and factors β and γ

Further in this part of the research distribution of the SCF and *displacement concentration factor* (DCF) depending on dent sizes, β , γ , and kind of calculation is analysed (Fig 2). In the linear calculations case SCF increases when radius and depth of the dent increase too. The DCF increases at the same time as SCF. But DCF amounts to maximum with decrease in depth, when $\beta = 5$ (Fig 2b).

A large number of calculations using the FEM provides an exact analysis of the results. The results obtained were accumulated in the data file to perform the regression analysis. The SCF have been analyzed for the most dangerous point of the dent „b“. As the SCF dependence on the dent shape, its sizes, depth and radius in nonuniform it is advisable to use polynomial regression.

The polynomial function of 3rd degree was used to obtain relationship between SCF and the defect sizes. The given function for the data obtained inquires the data file sufficiently precisely to an accuracy of 98–99 %.

3. Elasto-plastic calculation of the tank wall with the geometrical defect

The *geometrical non-linearity* (GNL) of deformation of the tank wall and its material *physical non-linearity* (FNL) result is a more uniform distribution of stresses and displacements over the dent surface. It causes the decrease of SCF (Fig 3a) and DCF (Fig 3b). But with every kind of the calculation, GNL and FNL, separately have a different influence on the distribution value of the SCF with the same dent sizes.

In case of geometrical-physical non-linear calculation, values of the SCF and DCF decrease greatly in comparison with linear calculation results (Fig 3). It is the result of a more uniform distribution of the deformations. From diagrams we can see, that an increase of the dent radius and depth has less influence on SCF resulting in its decrease (Fig 3a).

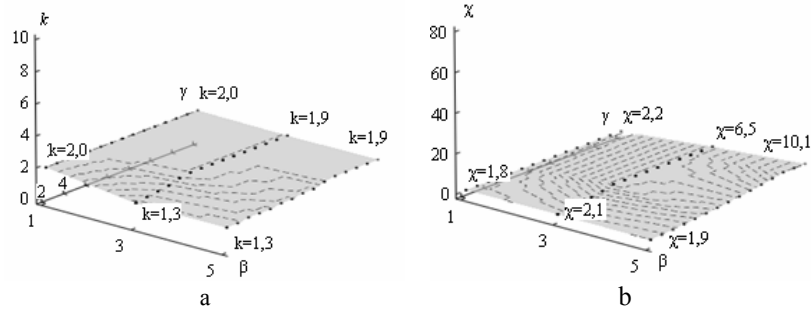


Fig 3. Variation of SCF (a) and DCF (b) depending on defect sizes and factors β and γ

In case of the geometrical-physical non-linear calculation, we can see a clear dependence between DCF and sizes of the dent (Fig 3b). The DCF increases with an increase of dent sizes, radius and depth. In case of the geometrical-physical non-linear calculation DCF is greatly less than in the linear one.

4. Stress/strain state investigation of soft defects on the surface of thin steel plate by using experimental and numerical methods

The test of steel plates with a soft geometrical defect such as a dent is the most common method, it is not so cheap as, to investigate the influence of the

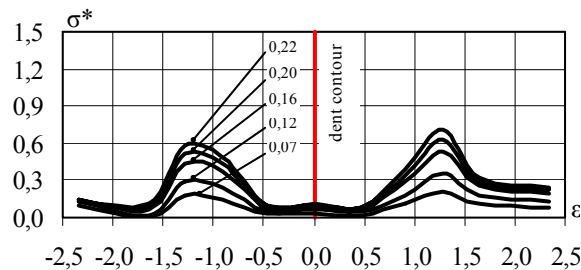


Fig 4. Variation of the stresses on the surface of the steel plate with a defect across the middle cut of the plate

dent on stresses distribution on the wall surface of a steel tank under the action of pressure of the stored product. The experimental model is described by parameters: width $b = 200$ mm, length $l = 270$ mm and thickness $t = 2$ mm. The semi-spherical dent was pressed out on the surface of the steel plate by a semi-spherical extruding die. The model was tested till destruction under the load being applied by steps. Strain gauge transducers were added from both sides of the defect. The variation of the stresses defined from one side of the plate till another one directly through a defect, is presented (Fig 4). Indications of the transducers were defined when the load factor η was of the order of: 0,07, 0,12, 0,16, 0,20, 0,22. On the vertical axis of the diagram relative longitudinal stresses σ^* due to the load are marked; on the horizontal axis – relative distances ε between transducers. According to the diagram (Fig 4, 5) with an increase of the load the concentration of the stresses on the contour of the defect is also increased. The diagrams (Fig 5), which determine a value of the SCF, show that the SCF is changing slightly from $k = 2,5$ to $k_{max} = 2,7$ and within limits from $k = 3,0$ to $k_{max} = 3,3$. On the vertical axis of the diagrams (Fig 5) the SCF was marked.

Additionally in this investigation, distribution of normal longitudinal stresses in the cross-section of the thin steel plate with a geometrical defect was analysed by the FEM.

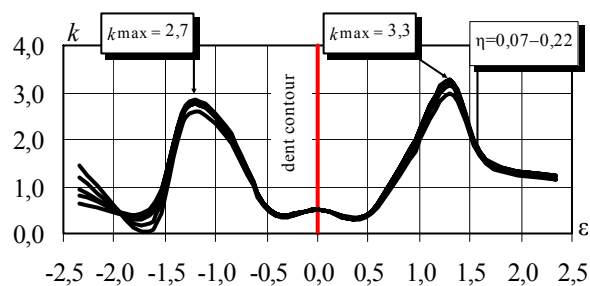


Fig 5. Variation of the SCF on the surface of the steel plate with a defect across the middle cut of the plate (natural experimental results)

By studying the presented results of the distribution of the σ^* and SCF in the cross-section of the plate with the dent, we see the evident stresses concentration on the contour of the dent and their significant decreasing across the middle part of the dent. The SCF is constant and is equal to $k = 2,5$ at load of 0,07–0,48. According to the linear calculations results, concentration of stresses increases on the contour of the defect and a constantly low level of the stresses is observed on the middle part of the dent. Further, when investigating the GNL of deformation of the plate with the defect and FNL of the material one observes

the agreement of the stress/strain state with the linear results of calculation at load of 0,07–0,22. In the case of the load 0,07–0,22 stresses do not exceed yield stresses of the material in the most dangerous place of the defect, i.e. on the contour of the dent. The stresses values are similar to results of the linear calculations. Further increase in the load produces the geometrical non-linearity of the model and physical non-linearity of the plate material. Stresses within the concentration area of the dent do not increase, and they are more uniformly distributed across the plate's cross-section. The SCF decreases from value $k = 2,5$ when the load is 0,07–0,22 to $k = 1,4$ when the load is 0,48.

5. Elasto-plastic calculation of the tank wall with geometrical defect in case of different metal qualities

The calculation results of the tank wall having a „soft“ defect with different kinds of metal are given in this chapter. As the calculation result SCF have been obtained, and the data analysis was performed according to the calculation results. For SCF calculation COSMOS/M was employed. Processing of the results was made by means of „STATISTICA“ software. The results have been fixed in the most dangerous upper point „b“ of the dent contour. In the FEM program diagrams $\sigma - \varepsilon$ were specified for the metals of grade BCт3Гпс, 09Г2 and 15Г2СФД.

The plots (Fig 6) show the results of SCF depending on geometrical sizes of the dent. The diagrams of SCF dependences illustrate that with different types of metal dependence of SCF from the dent geometry is different. In case of metals of better class having good plastic qualities SCF is not considerably depends on the defect sizes. Further, it increasing during calculations the metal class one observes more obvious dependence of SCF values on the defect geometrical parameters due to more limited plastic qualities of the metal. Therefore in cases of

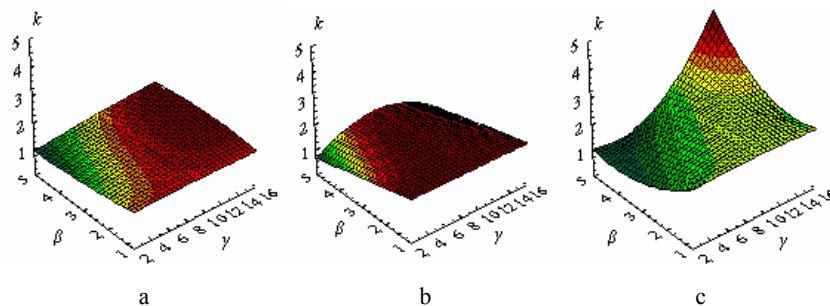


Fig 6. The SCF dependence on geometrical sizes of semi-spherical dent in the upper point of its contour, when the metal grade of BCт3Гпс (a), 09Г2 (b), 15Г2СФД (c) is used

the higher class of the metal the SCF dependence on the defect geometry must be taken into consideration. SCF to an equal degree becomes very dangerous in the upper point of the dent contour in case of the sharp defects.

Further the regression analysis of the SCF data obtained was carried out using the method of the least squares. The SCF calculation function depending on the defects parameters and metal of the tank wall has been obtained:

$$k = b_1 + (b_2\gamma + b_3\beta + b_4 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} + b_5\gamma\beta \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u})^{b_6} .$$

The accuracy results of this function makes up 88,6% of the results obtained using the FEM.

6. General results and conclusions

1. The executed investigations prove that defects tolerances should be classified by their location, forms, construction etc. Therefore evaluation method of the dent on the tank wall should be improved.
2. The dents on the tank wall were proposed to classify by three groups, semi-spherical defects, cone shape defects, truncated cone shape defects.
3. It has been defined that the most dangerous shape of the dent is truncated cone.
4. The calculated algorithm of the stress concentration factor of the dent on the tank wall was proposed taking into account forms of the dent, its geometry as well as geometry of the tank.
5. The given work investigates in details the stress/strain state of the tank wall with a dent:
 - the specific points of the dent were stated. It is a middle point of the dent, upper and side points of the dent contour. The basic differences of the stress/strain state in the specific points were showed.
 - the extreme point of the dent was defined. It's an upper point of the dent contour.
6. The method of the research of the stress/strain state of the plate with the dent was developed.
7. The stress concentration factor of the dent on the surface of the plate at linear deformation stage is $k_{max} = 3,2$.
8. The stress concentration factor decreases within $k_{max} = 3,2$ to $k_{min} = 1,4$ when physical non-linearity of the material and geometrical non-linearity of the deformations are taken into account.
9. The contour has been defined as the most dangerous place of the dent of the steel plate.

10. A deformation mechanism of the plate with the dent up to its destruction has been determined.
11. As a result of the comparison of the calculations performed for the tank wall with a dent with experimental data obtained for the metal plate having a dent the coincidence of the investigations has been stated.
12. A method of the stress concentration factor determination in the most dangerous portion of the semi-spherical defect is suggested when physical non-linearity of the different steels and geometrical non-linearity of the deformations of the tank wall are taken into account.
13. A mechanism of modelling of the tank wall with a dent is proposed.
14. The practical evaluation method of the influence of the soft defect on safe exploitation of the tank is proposed.

**List of published works on the topic of the dissertation
In the reviewed scientific periodical publications**

1. RASIULIS, K.; ŠAPALAS, A.; VADLŪGA, R.; SAMOFALOV, M. Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, Vol. 62, iss. 12, p. 1232–1237. ISSN 0143-974X. (ISI Web of Science; ISI Proceedings; INSPEC; Science Direct; Compendex).
2. ALIPHANOV, L. A.; ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); LEPIKHIN, A. M.; MOSKVICHEV, V. V.; SAMOFALOV, M. Analysis of geometrical shape defects of a steel cylindrical tank wall by numerical and analytical methods. *The 8th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques": selected papers*. Vilnius: Technika, 2004, p. 334–342. ISBN 9986-05-757-4.
3. RASIULIS, K.; SAMOFALOV, M.; ŠAPALAS, A. Application of the non-linear fe models to estimate effect of soft defects on thin walls of steel cylindrical tanks. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2006, Vol. 12, No. 2, p. 169–179. ISSN 1392-3730 (EBSCO; ICONDA; Compendex; VINITI).
4. ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); SAMOFALOV, M.; ŠAPALAS, A.; ALIPHANOV, L.A. Linear and physically non-linear stress state analysis of local shape defects on steel cylindrical tank walls by finite element method. *Mechanika*, 2004, No. 2(46), p. 5–13. ISSN 1392-1207 (INSPEC; Compendex; Scopus; VINITI).
5. RASIULIS, K.; SAMOFALOV, M.; ŠAPALAS, A. Stress and strain state investigation of soft defects on thin steel plate using experimental and numerical methods. *Mechanika*, 2006, No. 3(59), p. 19–27. ISSN 1392-1207 (INSPEC; Compendex; Scopus; VINITI).
6. ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); SAMOFALOV, M. Numerical Modelling of Mechanical Behavior Near the Holes of a Cylindrical Steel

- Tank. In *Proceedings of the International Conference "MECHANIKA-2003"*, held in Kaunas on 3–4 April, 2003 (Tarptautinės konferencijos „MECHANIKA-2003“, įvykusios Kaune 2003 m. balandžio 3–4 d., mokslinių pranešimų rinkinys). Kaunas: Technologija, 2003, p. 339–344 (in Lithuanian). ISBN 9955-09-404-4.
7. ALIPHANOV, L. A.; LEPIKHIN, A. M.; MOSKVICHEV, V. V.; ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.). Substantiation of tolerances of the dents depth on the steel cylindrical tanks walls. In *Proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference. „Modern Methods of the Mathematic Modelling of Natural and Anthropogenic Catastrophes”*, held in Krasnoyarsk on 13–17 October, 2003 (Труды VII Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых „Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф“, 13–17 октября 2003 года, Том 2). Krasnoyarsk: ИБМ СО РАН, 2003, p. 11–19 (in Russian).
 8. ALIPHANOV, L. A.; ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); LEPIKHIN, A. M.; MOSKVICHEV, V. V.; SAMOFALOV, M. Analysis of geometrical shape defects of a steel cylindrical tank wall by numerical and analytical methods. In *Proceedings of the 8th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*, held in Vilnius on 19–22 May, 2004 [elektroninis išteklius]. Vilnius: Technika, 2004, p. 1–8. ISBN 9986-05-722-1.
 9. ALIPHANOV, L. A.; ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); SAMOFALOV, M. FEM application in geometrically non-linear analysis of local shape defects on steel cylindrical tank walls. In *Proceedings of the International 17th Seminar on Computational Mechanics "NSCM - 17"*, held in Stockholm on 2004. Stockholm, 2004, p. 90–93.
 10. ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); ŠAPALAS, A.; KVEDARAS, A. K.; SAMOFALOV, M. Physical and geometrical non-linearity in stress/strain state FE analysis of thin - walled structures. In *Proceedings of the International 17th Seminar on Computational Mechanics "NSCM - 17"*, held in Stockholm on 2004. Stockholm, 2004, p. 179–182.
 11. ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); SAMOFALOV, M.; ŠAPALAS, A.; ALIPHANOV, L. Linear and physically non-linear analysis by the finite element method of mechanical state of local shape defects on steel cylindrical tank walls. In *Proceedings of the International Conference "MECHANIKA-2004"*, held in Kaunas on 1–2 April, 2004 (Tarptautinės konferencijos „MECHANIKA-2004“, įvykusios Kaune 2004 m. balandžio 1–2 d., mokslinių pranešimų rinkinys). Kaunas: Technologija, 2004, p. 56–61 (in Lithuania). ISBN 9955-09-630-6.
 12. ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.); SAMOFALOV, M. Analysis and estimation of the soft defects on the thin wall tankages. In *Proceedings of the 10th International Conference "MECHANIKA-2005"*, held in Kaunas on

- 7–8 April, 2005. (10-osios tarptautinės konferencijos „MECHANIKA-2005“, įvykusios Kaune 2005 m. balandžio 7–8 d., mokslinių pranešimų rinkinys). Kaunas: Technologija, 2005, p. 17–23 (in Lithuania). ISBN 9955-09-850-3.
13. RASIULIS, K.; SAMOFALOV, M.; ŠAPALAS, A. Stress strain state investigation of soft defects on the thin plate by using experimental method. In *Proceedings of the 11th International Conference “MECHANIKA-2006”, held in Kaunas on 6–7 April, 2006*. Kaunas: Technologija, 2006, p. 283–288. ISSN 1822-2951.
 14. ROMANENKO, K. (RASIULIS, K.). Analysis of geometrical shape defects of a steel cylindrical tank wall by numerical and analytical methods. In *Proceedings of the VII Conference of Lithuanian Young Scientists “Lithuania without science – Lithuania without future”, held in Vilnius on 25–26 March, 2004. Civil engineering (7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“), įvykusios Vilniuje 2004 m. kovo 25–26 d., medžiaga. Statyba*. Vilnius: Technika, 2004, p. 301–307 (in Lithuania).

PLIENINIŲ ANTŽEMINIŲ CILINDRINIŲ VERTIKALIŲJŲ TALPYKLŲ SIENELĖS GEOMETRINIŲ NUOKRYPIŲ ANALIZĖ IR VERTINIMAS

Bendrasis aprašymas

Tiriamoji problema. Sparti didelių pramoninių kompleksų plėtra 1960–1970 metais pasaulyje tapo įmanoma dėl tikslių ir efektyvių analitinių skaičiavimo metodų. Plėtra atitiko naftos produktų, dujų kiekio ir t.t. augimo spartą. Dėl šios priežasties problemos, susijusios su inžinerinių statinių likutiniais ištekliais, jų nuokrypiai (*defektai*), atsižvelgiant į eksploatacijos savybes, nebuvo laikomi pirmo svarbumo klausimais.

Didelės talpos plonasienių talpyklų remontas ir jų nuolatinė priežiūra yra labai brangūs. Ritininės plieno talpyklos yra atskiras plonasienių talpyklų atvejis. Įprastas talpyklų skaičiavimas, taikant analitinius metodus, nėra sudėtingas. Tų vietų, kur yra sutrikdoma tobula forma, pavyzdžiui, ties įpjovimo vietomis, angomis, defektais ir pan., sustiprinimas yra atsakinga ir sudėtinga tokių konstrukcijų projektavimo dalis. Defektų prevencijos eksploatacijos ir remonto metu kylantys uždaviniai, taip pat būtinybė greitai užtikrinti pažeistų konstrukcijos vietų saugumą yra svarbesni ir labiau komplikuoti, nei įprasti skaičiavimai.

Klasikinėje defektų vertinimo teorijoje analizuojamos „aštrių“ (įpjovių, įtrūkių ir pan.) ir „minkštų“ (įdubių, išsipūtimų, pakibimų ir pan.) defektų problemos. „Aštrūs“ defektai yra pavojingesni dėl didesnės talpyklų irties

rizikos. Todėl „minkšti“ nuokrypiai nėra tirti taip plačiai, kaip „aštrieji“, o jų apribojimai susiję tik su geometriniais rodikliais. Be to, nebuvo atsižvelgiama į tokių nuokrypių vietas, jų formų, talpyklos sienelės storio ir t.t. įtaką. Aukščiau išvardintos priežastys rodo, kad „minkšti“ nuokrypiai nėra pakankamai ištirti ir yra galimybė pagerinti jų įtaką konstrukcijos būviui vertinti.

JAV, Rusijoje ir Vokietijoje (API, SNIP, DIN) yra parengti naudojamų talpyklų nacionaliniai projektavimo standartai. Pastaruoju metu visoje Europoje įsigaliojo bendrieji tokių statinių projektavimo ir eksploatacijos standartai. Anksčiau minėtų šalių standartai riboja „minkštų“ nuokrypių matmenis tik montuojant ir naudojant. Pagal pateiktas leistinas nuokrypas, standartai skirtingai riboja „minkštų“ defektų dydį. Eurocode buvo pasiūlytas didžiausias leistinas nuokrypis nuo tobulos konstrukcijos formos. Jis sudaro 1,6 % įdubos skersmens (lentelė). Čia parametras f yra įdubos gylis. Jis negali būti didesnis, nei nustatyta procentinė įdubos skersmens dalis. Tokiu atveju konstrukcija laikoma geros kokybės („C“ klasės). Kiti standartai, API, SNIP ir DIN, naudoja vidutines nuokrypių reikšmes. Šios leistinosios nuokrypos konstrukcijų skaičiavimų neįtakoja. Aptariamose nuokrypos yra labai apibendrintos, jose neatsižvelgiama į nuokrypių vietą konstrukcijoje, sienelės storį, spindulį ir pan.

Leistinos nuokrypos, priklausomai nuo projektavimo standartų

Standartas		Leistinoji nuokrypa, %
ENV 1993–1–6: Eurocode 3	A	$f \leq 0,6$
	B	$f \leq 1,0$
	C	$f \leq 1,6$
API 650		$f \leq 1,4$
SNIP III–18–75		$f \leq 1,0$
DIN 18800		$f \leq 1,0$

Mokslo problemos aktualumas. Ritininių talpyklų, kurių talpa 5000–50000 m³, gaminimas ir montavimas yra labai sudėtingas: vos pradėjus jas naudoti, konstrukcijų sienelėje matosi vietiniai defektai. „Minkštų“ nuokrypių sanaupa ir esamų (bendrųjų nuokrypių nuo projektinės geometrijos, nuosėdžių ir t.t.) didėjimas reikalauja talpyklos tinkamumo tolimesniam naudojimui įvertinimo. Šis klausimas yra labai svarbus konstrukcijoms su galutiniu naudojimo laikotarpiu. Profesionali išvada apie mechaninę konstrukcijos būklę yra labai svarbi. Jos pagrindu rengiant įmonės plėtros planus, būtina pasirinkti: a) brangus kapitalinis remontas ir tolimesnis talpyklos naudojimas; b) talpyklos pakeitimas.

Tačiau daug talpyklų, kurių nuokrypių matmenys viršija leistinąsias nuokrypas, yra praktiškai naudojamos, ir šis faktas, kaip rodo ilgalaikiai stebėjimai, nesąlygoja talpyklų būklės blogėjimo.

Tačiau analitinių modelių tobulinimas yra ypatingai svarbus taikytinam konstrukcijų būklės tyrimui. Šiandien tokie sprendimai ypatingai domina inžinierius praktikus.

Pagrindinis tikslas. Pagrindiniai pristatomų tyrimų tikslai yra šie:

1. Talpyklos sienelės su įduba įtempptojo deformuotojo būvio identifikavimas.
2. Skirtumų tarp pažeistos (su įduba) ir idealios geometrijos ritininių kevalų įtempptųjų deformuotųjų būvių nustatymas.
3. Metodikos įvertinančios įdubos įtaką saugiam talpyklos naudojimui sukūrimas.

Pagrindiniai uždaviniai. Siekiant pagrindinio tikslo, buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Esamų talpyklos sienelės su „minkštu“ defektu įtempptojo deformuotojo būvio nustatymo metodų apžvalga.
2. Racionalaus baigtinių elementų dydžio talpyklos sienelės su įduba skaičiavimui nustatymas.
3. Racionalaus baigtinių elementų tinklo ir jų tipo parinkimas.
4. Įdubos taškų su maksimaliomis įtempių ir poslinkio reikšmėmis vietų nustatymas.
5. Talpyklos sienelės su defektu įtempptojo deformuotojo būvio nustatymas įvertinant medžiagos tik tamprias deformacijas.
6. Talpyklos sienelės su defektu įtempptojo deformuotojo būvio nustatymas įvertinant medžiagos tampriąsias plastiškąsias deformacijas ir deformacijų netiesiškumą.
7. Išanalizuoti trijų pavidalų įdubų poveikį – pusiau rutulio, kūgio ir nupjautojo kūgio – įtempptajam deformuotajam būviui.
8. Sukurti plieninės plokštelės su įduba įtempptojo deformuotojo būvio analizės metodiką, taikant eksperimentinį ir skaitinį metodus.
9. Nustatyti plieninės plokštelės įdubos pavojingiausią sritį ir irimo mechanizmą.
10. Atlikti plieninės plokštelės su įduba skaičiavimus įvertinant medžiagos tampriąsias plastiškąsias deformacijas ir deformacijų netiesiškumą.
11. Atlikti palyginimus tarp plieninės plokštelės su įduba ir talpyklos sienelės su įduba įtempptųjų deformuotųjų būvių.
12. Apskaičiuoti įtempių samplaikos koeficientus, priklausomai nuo įdubos pavidalo ir plieno rūšies.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta talpyklos sienelės segmento su įduba skaičiavimo metodika.
2. Pasiūlyta talpyklos sienelės įdubos teorinių įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika įvertinanti tris įdubų pavidalus, atsižvelgianti į talpyklos ir defekto geometrinį pavidalą.
3. Sukurta talpyklos sienelės pusiau rutulio įdubos įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika, įvertinanti skirtingų plienų tampriosios-

plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelius ir sienelės deformacijų netiesiškumą.

4. Sukurta plieninės plokštės su įduba įtemptojo deformuotojo būvio analizės metodika.
5. Nustatytos įtempių samplaikos koeficiento reikšmės plokštei su įduba.
6. Sukurtas praktinis įdubos pavojingumo vertinimo metodas.

Tyrimų metodika. Siekiant pagrįstų išvadų apie talpyklų su „minkštais“ nuokrypiais mechaninę būklę, lygiagrečiai taikomi du tyrimo metodai – *eksperimentinis metodas* (EM) ir *baigtinių elementų analizė* (BEA).

Praktinė tyrimų vertė. Atlikti tyrimai gali būti naudojami ilgą laiką eksploatuojamų talpyklų su defektais būklės įvertinimui (ekspertizei). Tikėtina daugeliu atvejų, pratęsiant jų saugios eksploatacijos laikotarpį sutaupame daug lėšų. Jų pagrindu gali būti tobulinami nuokrypius normuojantys teisiniai dokumentai.

Ginamieji teiginiai

1. Geometriniai nuokrypiai nėra pagrindinė talpyklų irimo priežastis.
2. Praktinis samplaikos koeficientų nustatymo metodas.
3. Normuojančiuose teisiniuose dokumentuose pateikiami nuokrypių apribojimai turi būti tikslinami įvertinant įdubas pagal defektų išdėstymą, jų pavidalus, vietą, talpyklų konstrukcijas ir pan.

Darbo aprobavimas ir publikacijos. Disertacijos tema buvo paskelbta keturiolikoje straipsnių, iš kurių trys išspausdinti žurnaluose, įtrauktuose į Lietuvos Mokslo Tarybos patvirtintą sąrašą. Pagrindiniai šio darbo rezultatai buvo pristatyti aštuoniose mokslinėse techninėse konferencijose.

Disertacijos apimtis. Disertacija susideda iš bendrojo aprašymo, notacijų sąrašo, 60 paveikslų, 10 lentelių, 6 pagrindinių skyrių, bendrųjų išvadų ir šaltinių sąrašo. Visa disertacija apima 140 puslapių.

Disertacijos struktūra

Pirmąjį skyrių sudaro įžanga, kurioje trumpai apžvelgtos talpyklų avarijos ir jų priežastys. Skyriuje pateikta defektų klasifikacija, jų apribojimų klasifikacija pagal skirtingus standartus. Taip pat apžvelgtos talpyklų skaičiavimo metodikos, įvertinančios nuokrypių įtaką. Aptarti šių metodų privalumai ir trūkumai.

Antrajame skyriuje pateiktas talpyklos sienelės su „minkštu“ nuokrypiu skaitinis modelis. Parinktas optimalus BE tinklas. Nustatyta nuokrypio ekstreminio taško padėtis. Atlikti BEM talpyklos sienelės su trijų pavidalų nuokrypiais tiesinių uždavinių skaičiavimai.

Apibendrinti tiesinių skaičiavimų rezultatai. Atlikta didelės apimties tiesinių BEM skaičiavimų regresinė analizė. Regresinei analizei atlikti buvo parinkti γ ir β reikšmės. Pasirinkti pavojingiausiojo įdubos charakteringojo „b“ taško samplaikos koeficientų duomenys.

Trečiajame skyriuje atlikta talpyklos sienelės netiesinė analizė, įvertinant medžiagos tamprias plastines deformacijas ir konstrukcijos deformacijų geometrinį netiesiškumą. Taip pat atlikti nuokrypių apribojimų, numatytų

Eurokode 3, pagrįstumo tyrimai remiantis netiesinio modelio skaitinio eksperimento rezultatais.

Ketvirtajame skyriuje atliktas supaprastintas ir labai plačiai naudojamas laboratorinis eksperimentas su plieninėmis plokštelėmis, turinčiomis geometrinių nuokrypių. Laboratorinis eksperimentas buvo sudubliuotas su skaitiniu eksperimentu. Atlikti abiejų metodų rezultatų palyginimai.

Penktajame skyriuje pateikti talpyklų sienelės su „minkštu“ nuokrypiu skaičiavimo rezultatai, įvertinant skirtingų plienu įtempių ir deformacijų dvišias diagramas. Taip pat atlikta skaičiavimo rezultatų įtempių samplaikos koeficientų reikšmių regresinė analizė.

Šeštajame skyriuje pateikti pagrindiniai rezultatai ir baigiamosios išvados talpyklų „minkštųjų“ nuokrypių įvertinimui.

Pagrindiniai tyrimų rezultatai ir baigiamosios išvados

1. Aliktais tyrimais įrodyta, kad talpyklų geometrinius nuokrypius reglamentuojančiose standartuose pateikiami apribojimai turi būti tikslinami skirstant įdubas pagal nuokrypių išdėstymą, pavidalus, vietą, talpyklų konstrukcijas ir pan. Todėl juose siūlomos sienelės įdubų įvertinimo metodikos turi būti tobulinamos.
2. Sienelės įdubas siūloma klasifikuoti pagal pavidalus į tris grupes: pusiau rutulio, kūginius ir nupjautuosius kūginius nuokrypius.
3. Skaičiavimais nustatytas pavojingiausias įdubos pavidalas – nupjautasis kūginis nuokrypis.
4. Pasiūlyta talpyklos sienelės įdubos teorinių įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika įvertinant tris galimu įdubų pavidalus, atsižvelgiant į talpyklos ir nuokrypių geometriją.
5. Darbe ištirtas talpyklos sienelės su įduba įtemptasis deformuotasis būvis:
 - nustatyti charakteringieji įdubų taškai: vidurinis taškas, viršutinis įdubos apybraižos taškas ir šoninis įdubos apybraižos taškas. Parodyti esminiai įtemptojo deformuotojo būvio skirtumai analizuojamuose taškuose.
 - nustatyta įdubos ekstreminio taško padėtis. Tai yra viršutinis įdubos apybraižos taškas.
6. Sukurta plieninės plokštės su įduba įtemptojo deformuotojo būvio analizės metodika.
7. Tyrimais nustatyta, kad maksimali plokštelės įdubos įtempių samplaikos koeficiento reikšmė lygus $k_{max} = 3,2$, kai plokštelės medžiaga deformuojasi tampriai.
8. Tyrimais nustatyta, kad plokštelės įdubos eksperimentinis įtempių samplaikos koeficientas mažėja įvertinant plieno tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelį ir plokštelės įdubos deformacijų netiesiškumą nuo $k_{max} = 3,2$ iki $k_{min} = 1,4$.
9. Pavojingiausia plokštelės įdubos vieta yra įdubos apybraiža.
10. Nustatyta plokštelės su įduba deformacijos seka iki jos irties.

11. Laboratorijoje atlikto plonos plokštelės eksperimento rezultatai patvirtino talpyklos sienelės su įduba skaitinio modelio tinkamumą.
12. Sukurta talpyklos sienelės pusiau rutulio formos įdubos įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika įvertinanti skirtingų plienų tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelius ir sienelės deformacijų netiesiškumą.
13. Sukurta talpyklos sienelės segmento su įduba skaičiavimo metodika.
14. Sukurtas praktinis įdubos pavojingumo vertinimo metodas.

Briefly about the author

Konstantin Rasiulis was born in Krasnojarsk, on November 13, 1975.

A graduate from Civil and Industry Engineering of Krasnoyarsk Academy of Architecture and Civil Engineering (1998). MSc of Civil Engineering (2003) at Vilnius Gediminas Technical University. PhD studies at Vilnius Gediminas Technical University in 2003–2007.

Trumpos žinios apie autorių

Konstantin Rasiulis gimė 1975 m. lapkričio 13 d. Krasnojarske.

Valstybinėje Krasnojarsko architektūros ir statybos akademijoje Statybos fakultete 1998 m. įgijo statybos inžinieriaus kvalifikacinį laipsnį, o Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos fakultete 2003 m. statybos inžinerijos mokslo magistro laipsnį. 2003–2007 metais – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas.

Konstantin Rasiulis

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE LOCAL GEOMETRICAL DEFECTS ON THE WALLS OF THE OVER GROUND CYLINDRICAL VERTICAL TANKS

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

Konstantin Rasiulis

PLIENINIŲ ANTŽEMINIŲ CILINDRINIŲ VERTIKALIŲJŲ TALPYKLŲ SIENELĖS GEOMETRINIŲ NUOKRYPIŲ ANALIZĖ IR VERTINIMAS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2007 12 19. 1,5 sp. l. Tiražas 100 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius, <http://www.kopija.lt>