

PLIENINIŲ LANKSČIŲ KABAMŪJŲ BUNKERIŲ ELGSENOS ANALIZĖ

Eugenijus Gudonis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: eugenijus.gudonis@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjama plieninių lanksčių kabamųjų bunkerių ir bunkerių, turinčių baigtinį lenkiamąjį standumą, elgsena veikiant simetrinei ir asimetrinei apkrovoms. Atliekama lyginamoji šių konstrukcijų įtempimų deformacijų būsenos analizė, nagrinėjama atraminio kontūro įtaka lakšto įtempimų deformacijų būsenai. Taip pat aptariami bunkerio iš baigtinio lenkiamojo standumo lakštų projektavimo principai.

Reikšminiai žodžiai: plieninis lankstus kabamasis bunkeris, paslankus ir nepaslankus kontūras, baigtinio lenkiamojo standžio lakštai.

Įvadas

Viena iš seniausiai žinomų ir iki šių dienų naudojamų birių medžiagų talpyklų konstrukcijų yra vadinamieji plieniniai kabamieji bunkeriai. Lankstaus kabamojo bunkerio konstrukciją pasiūlė amerikiečių inžinierius S. Berkvistas 1899 metais. Tais pačiais metais pagal išradėjo projektą buvo pastatytas pirmasis lankstus bunkeris, skirtas anglių ilgalaikiam sandėliavimui. (Ягофаров 1980).

Vienas iš pagrindinių tokių kabamųjų konstrukcijų trūkumų, lyginant su įprastiniais standžiais bunkeriais, yra didelis jų deformuojamumas veikiant asimetrinėms, ir lokalioms apkrovoms (Aghajari 2006; Prabu 2010; Doerich 2008). Siekiant mažinti tokių konstrukcijų kinematinės kilmės poslinkius pagrindiniam ištisiniam lakštui reiktų suteikti baigtinį lenkiamąjį standumą (Brown 2001; Brown 1998). Vienas iš galimų konstrukcinių sprendimų – naudoti gofruotą lakštą.

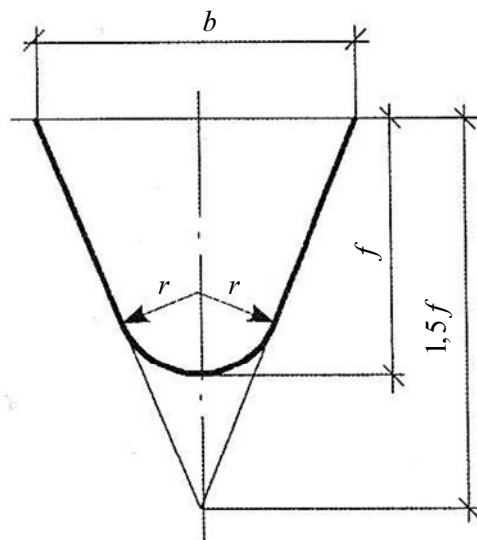
Šiame darbe nagrinėjama kabamojo bunkerio su baigtiniu lenkiamuoju standumu įtempimų ir deformacijų elgsena, atsirandanti dėl simetrinės ir asimetrinės apkrovos. Aptariamas bunkerio su lenkiamuoju standumu efektyvumas.

Plieninio lankstaus kabamojo bunkerio su nepaslankiu kontūru elgsena veikiant simetrinei ir asimetrinei apkrovoms

Plieninio lankstaus kabamojo bunkerio elgsena nagrinėjama pasitelkiant skaitinį metodą. Pasirinkta plieninio lankstaus kabamojo bunkerio konstrukcinė schema parodyta 1 pav. Konstrukcijos tarpsnis $b = 8,2$ m., ilgis – 10,65 m. Pasirinkta supaprastinta bunkerio pradinė apybrėža, kurios pradinis įsvyris

$f = 6,6$ m (žr. 1 pav.). Pagrindinis plieninio lankstaus kabamojo bunkerio elementas – ištisinis lakštas, skaičiuojamas kaip geometriškai tiesinė sistema.

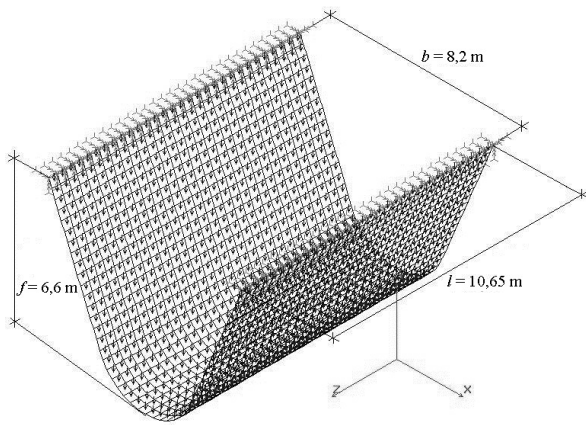
Modeliuojant programa COSMOS/M, plieninio lakšto apybrėža buvo sudaryta iš dviejų tiesių strypinių elementų ir vieno pusapskritimio strypinio elemento, iš kurių tiesūs elementai vėliau buvo sudalinti dar į 16 baigtinių strypinių elementų, o apskritiminė dalis – taip pat į 16 baigtinių strypinių elementų. Formuojant paviršių buvo sudaryta 1440 keturkampių plokščių baigtinių elementų.



1 pav. Plieninio lankstaus kabamojo bunkerio supaprastinta apybrėža

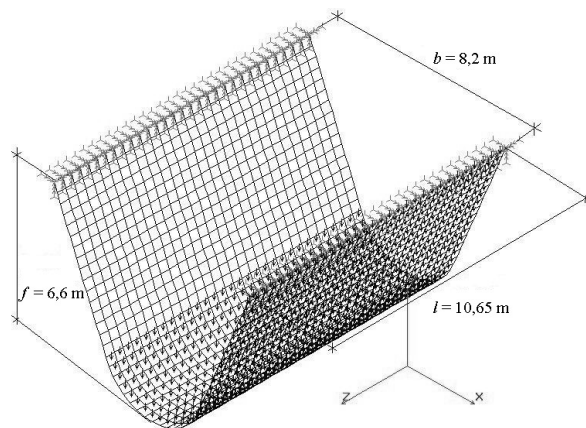
Fig. 1. The simplified contour of a suspended flexible steel bunker

Bunkerio lakštas buvo apkrautas savojo svorio ir birios medžiagos slėgio apkrovomis. Skaičiuojamoji schema, veikiant simetrinei apkrovai, pateikta 2 pav., o asimetrinei – 3 pav.



2 pav. Plieninio lankstaus kabamojo bunkerio skaičiuojamoji schema veikiant simetrinei apkrovai

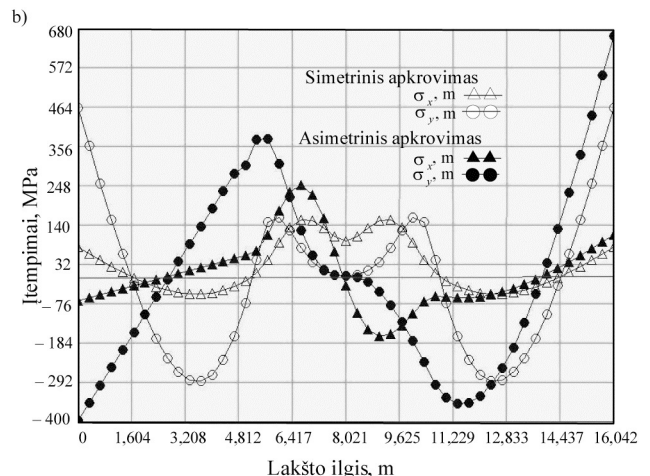
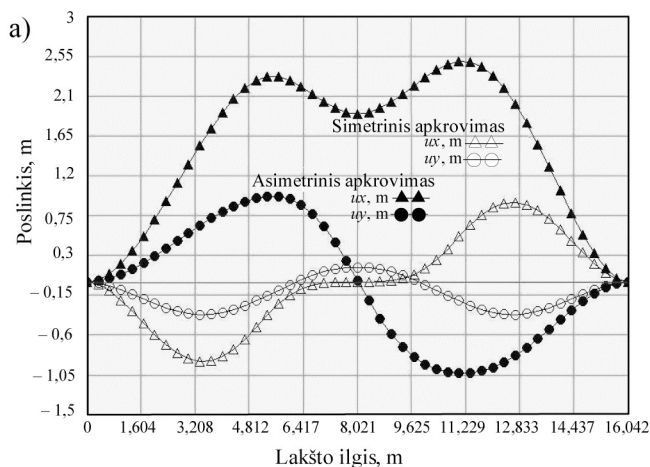
Fig. 2. A calculation scheme for a suspended flexible steel bunker under symmetric load



3 pav. Plieninio lankstaus kabamojo bunkerio skaičiuojamoji schema veikiant asimetrinei apkrovai

Fig. 3. A calculation scheme for a suspended flexible steel bunker under asymmetric load

Simetrinės apkrovos sukeltos poslinkių ir įtempimų reikšmės būdinguosiuose taškuose pateiktos 1 lentelėje.



4 pav. Lygaus lakšto poslinkių (a) ir įtempimų (b) kitimo grafikas, esant nepaslankiam kontūrai

Fig. 4. Variations in the displacement (a) and stress (b) of the flat plate having an inert contour

1 lentelė. COSMOS/M skaičiavimo rezultatai veikiant simetrinei apkrovai

Table 1. The results of calculating COSMOS/M under symmetric load

Taško Nr.	u_x , m	u_y , m	σ_x , MPa	σ_y , MPa
16	0,0000	0,0000	79,34	462,6
326	-0,8989	-0,3724	-48,89	-285,0
760	0,0000	0,1647	97,22	0,60

Iš gautų poslinkių ir įtempimų rezultatų matyti, kad veikiant simetrinei apkrovai bunkerio apybrėža artėja prie apskritiminės formos (Ягофаров 1980), šoninės dalys stipriai deformuojasi, o apatinė dalis nedaug pasilenka teigiama y ašies kryptimi (žr. 4 pav.). 5 paveiksle matyti, kad σ_x įtempimai maksimalią reikšmę pasiekia apatinėje bunkerio dalyje. Dėl pakraščio efekto σ_y įtempimai didžiausią reikšmę įgyja prie nepaslankiai įtvirtinto kontūro.

Asimetrinės apkrovos sukeltų poslinkių ir įtempimų reikšmės būdinguosiuose taškuose pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. COSMOS/M skaičiavimo rezultatai veikiant asimetrinei apkrovai

Table 2. The results of calculating COSMOS/M under asymmetric load

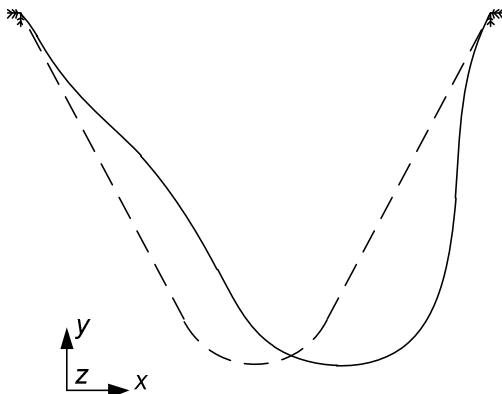
Taško Nr.	u_x , m	u_y , m	σ_x , MPa	σ_y , MPa
16	0,000	0,000	-67,78	-395,2
326	1,542	0,639	15,07	87,89
760	1,902	0,011	-25,70	-0,158
1194	2,013	-0,834	-43,34	-252,7
1504	0,000	0,000	113,1	659,5

Iš pateiktų skaičiavimo rezultatų matyti, kad veikiamas asimetrinės apkrovos konstrukcija yra linkusi deformuotis. Didžiausias poslinkis x kryptimi siekia 2,551 m, o y kryptimi – 1,057 m (žr. 4 pav., a).

Įtempimai (žr. 4 pav., b) apkrautoje pusėje prie nepaslankaus kontūro padidėja apie 30 %, lyginant su simetriniu apkrovimu.

5 paveiksle parodyta konstrukcijos deformuotoji schema. Iš pateikto grafiko matyti, kad bunkerio lakštai pasislenka į apkrautosios dalies pusę.

Nepaslankus kontūro įtvirtinimas praktikoje nėra realizuojamas, kadangi plieninis lakštas tokiuose bunkeriuose yra prikabinamas prie išilginių sijų. Todėl atsižvelgiant į atrėmimo sąlygas konstrukcijos elgsena pakinta.

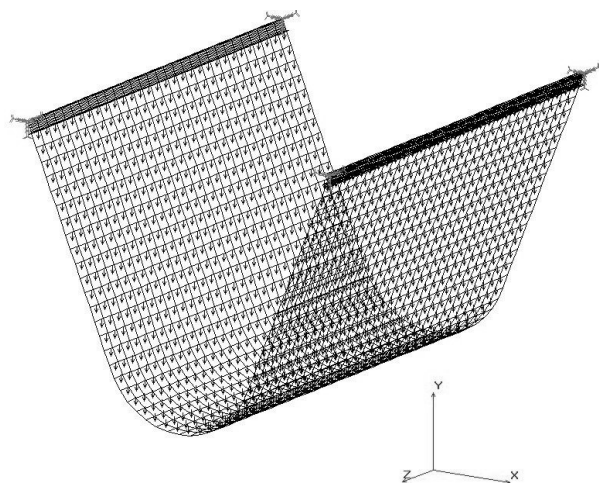


5 pav. Asimetrinės apkrovos veikiamo bunkerio deformuotoji schema

Fig. 5. A deformed bunker under asymmetric load

Plieninio lankstaus kabamojo bunkerio esant paslankiam kontūrai elgsena veikiant simetrinei ir asimetrinei apkrovoms

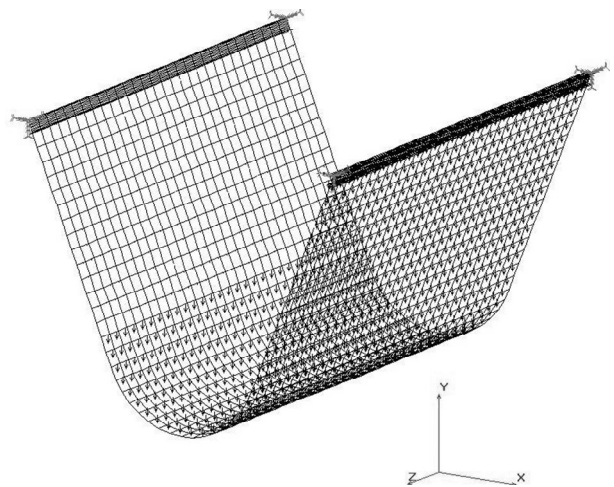
Pagrindinis plieninio lankstaus kabamojo bunkerio ištisinis lakštas pritvirtinamas prie pasvirusios sijos, kurios ašis sutampa su lakšto liestine. Šitaip sumažinamas sijos sukimas (žr. 6 pav.).



6 pav. Bunkerio skaičiuojamoji schema esant paslankiam kontūrai

Fig. 6. A calculation scheme for the bunker having a mobile contour

Skaičiuojamoji schema, veikiant asimetrinei apkrovai, pateikta 7 paveiksle.



7 pav. Bunkerio skaičiuojamoji schema su paslankiu kontūru veikiant asimetrinei apkrovai

Fig. 7. A calculation scheme for the bunker having a mobile contour under asymmetric load

Bunkerio su paslankiu kontūru poslinkių ir įtempių reikšmės būdinguose taškuose pateiktos 3 lentelėje. Iš gautų rezultatų matyti, kad simetrinės apkrovos veikiamo bunkerio šoninės dalys deformuojasi. Apatinė dalis, kaip ir esant nepaslankiam kontūrai, pasislenka teigiama y ašies kryptimi (žr. 8 pav.).

3 lentelė. Paslankaus kontūro bunkerio skaičiavimo COSMOS/M rezultatai veikiant simetrinei apkrovai

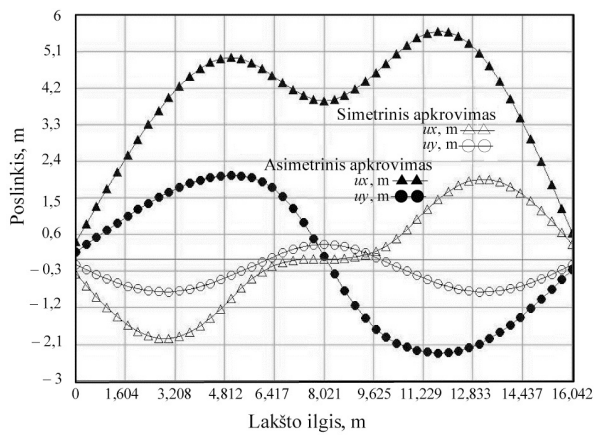
Table 3. The results of calculating COSMOS/M of the bunker having a mobile contour under symmetric load

Taško Nr.	u_x , m	u_y , m	σ_x , MPa	σ_y , MPa
16	-0,364	-0,151	-5,896	-34,38
326	-1,909	-0,791	-71,06	-414,3
760	0,000	0,354	280,0	1,723

Konstrukcijos deformavimosi pobūdis beveik nepakitęs, tačiau poslinkiai ir x , ir y kryptimi padidėjo apie 45–50 %. Nagrinėjant įtempius matyti, kad σ_x įtempimai maksimalią reikšmę įgyja apatinėje bunkerio dalyje (žr. 9 pav.). O σ_y įtempimai šiuo atveju didžiausią reikšmę pasiekia tiesios sienelės vidurinėje dalyje. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad esant paslankiam kontūrai įtempimai σ_x padidėja 45 %, o σ_y – 31 %.

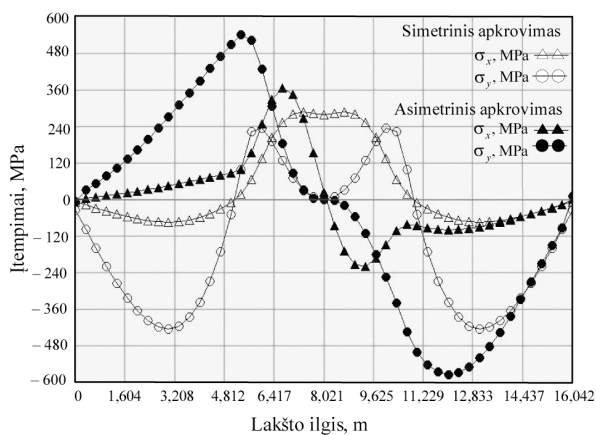
Asimetrinės apkrovos sukeltų poslinkių ir įtempių reikšmės būdinguose taškuose pateiktos 4 lentelėje.

Atlikus skaičiavimų rezultatų analizę galima teigti, kad bunkerio su paslankiu kontūru poslinkiai, lyginant su nepaslankaus kontūro konstrukcija, padidėjo apie 50 %, o įtempimai – apie 45 %.



8 pav. Lygaus lakšto poslinkių kitimo grafikas esant paslankiam kontūriui

Fig. 8. Variations in the displacement of the flat plate having a mobile contour



9 pav. Lygaus lakšto įtempių kitimo grafikas esant paslankiam kontūriui

Fig. 9. Variations in the stress of the flat plate having a mobile contour

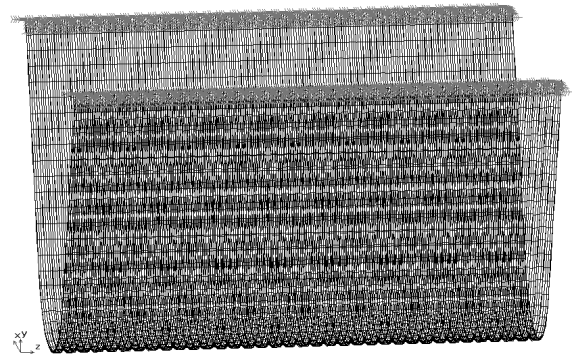
4 lentelė. Paslankaus kontūro bunkerio skaičiavimo COSMOS/M rezultatai veikiant asimetrinei apkrovai

Table 4. The results of calculating COSMOS/M of the bunker having a mobile contour under asymmetric load

Taško Nr.	u_x , m	u_y , m	σ_x , MPa	σ_y , MPa
16	0,424	0,173	-1,057	-6,547
326	4,253	1,759	53,23	310,4
760	3,893	0,065	26,49	0,163
1194	5,302	-2,194	-94,23	-549,4
1504	1,239	-0,511	-15,85	-92,39

Plieninio gofruoto lakšto kabamojo bunkerio su nepaslankiu kontūru elgsena veikiant simetrinei ir asimetrinei apkrovoms

Plieninio kabamojo bunkerio su gofruotu lakštu skaičiuojamoji schema pateikta 10 pav. Lygus plieninis lakštas šiuo atveju buvo pakeistas gofruotu plieniniu lakštu.

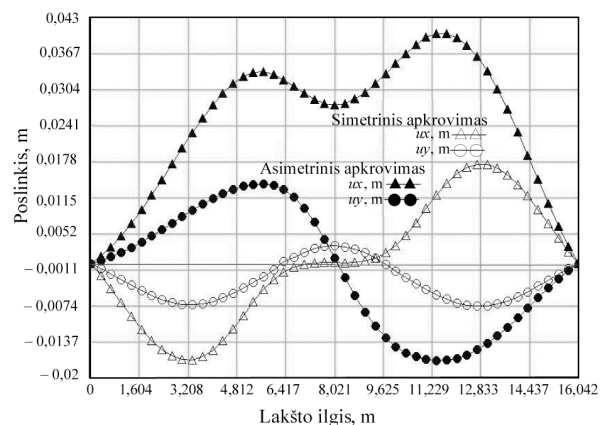


10 pav. Bunkerio, sudaryto iš gofruoto lakšto, skaičiuojamoji schema esant nepaslankiam kontūriui

Fig. 10. A calculation scheme for the bunker made of the corrugated sheet and having an inert contour

Formuojant gofruotą paviršių buvo sudaryti 20 592 keturkampiai plokštieji baigtiniai elementai. Realī apkrova buvo modeliuojama slėgiant paviršių pagal globaliosios koordinatū sistemą ašį y , kaip ir nagrinėjant bunkerį su lygiu lakštu.

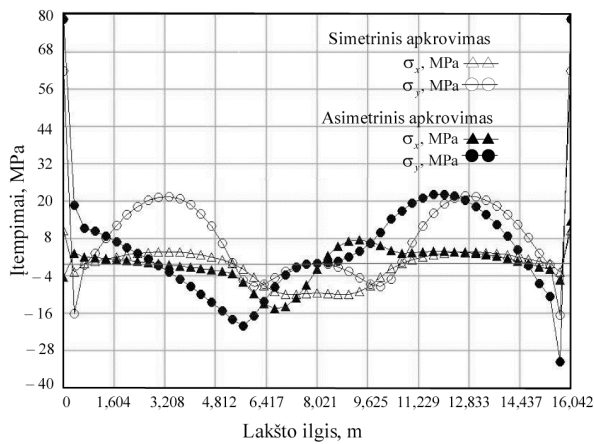
Iš gautų poslinkių ir įtempių rezultatų matyti, kad dėl simetrinės apkrovos poveikio bunkerio apybrėža faktiškai nekinta (žr. 11 pav.). Jo deformavimosi pobūdis išlieka analogiškas kaip ir esant lygiam lakštui. Tačiau poslinkių reikšmės sumažėjo ženkliai – net 98 %. Nagrinėjant įtempius matyti, kad σ_x kaip ir σ_y įtempiai didžiausią reikšmę įgyja esant nepaslankiai įtvirtintam kontūriui (žr. 12 pav.).



11 pav. Gofruoto lakšto poslinkių kitimo grafikas esant nepaslankiam kontūriui

Fig. 11. Variations in the displacement of the corrugated sheet having an inert contour

Pagal atliktų skaičiavimų, esant asimetrinės apkrovos nepaslankiam kontūriui, rezultatus (5 lentelė) matyti, kad konstrukcijos deformavimosi pobūdis išliko toks pat kaip ir lygaus lakšto. Tačiau skaitinės reikšmės labai sumažėjo ir skirtumas siekia 98 %.



12 pav. Gofruoto lakšto įtempių kitimo grafikas, esant nepaslankiam kontūriui

Fig. 12. Variations in the stress of the corrugated sheet having an inert contour

5 lentelė. COSMOS/M skaičiavimo rezultatai esant asimetrinės apkrovos nepaslankiam kontūriui

Table 5. The results of calculating COSMOS/M of the bunker having an inert contour under asymmetric load

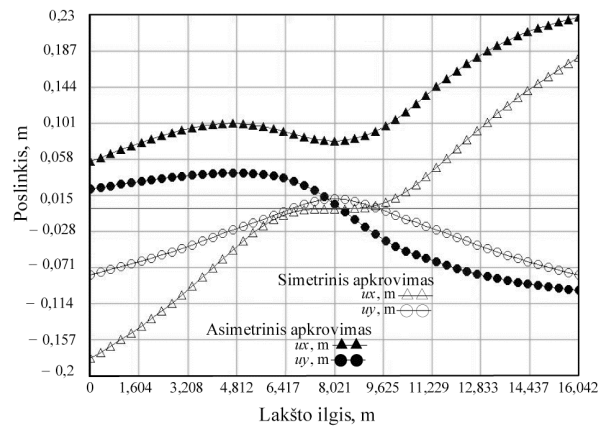
Taško Nr.	u_x , m	u_y , m	σ_x , MPa	σ_y , MPa
210	0,00000	0,00000	-4,532	-26,42
10443	0,02287	0,00932	-0,499	-2,908
10464	0,03350	0,01394	-6,016	-20,09
10473	0,03099	0,01164	-14,54	-7,586
10506	0,03672	-0,01562	4,085	14,23

Plieninio gofruoto lakšto kabamojo bunkerio esant paslankiam kontūriui elgsena veikiant simetrinei ir asimetrinei apkrovoms

Plieninio kabamojo bunkerio su gofruotu lakštu konstrukcinė ir atitinkamai skaičiuojamoji schemas esant paslankiam kontūriui keičiasi. Sprendimo naujumas yra tas, kad atraminio kontūro dvitėjo sienutė daroma atkartojant gofruotą lakštą.

Atlikus skaičiavimus pastebėta, kad veikiant simetrinei apkrovai bunkerio šoninės dalys labiau deformuojasi prie kontūro. Apatinė dalis, kaip ir esant nepaslankiam kontūriui, pasislenka teigiama y ašies kryptimi (žr. 13 pav.).

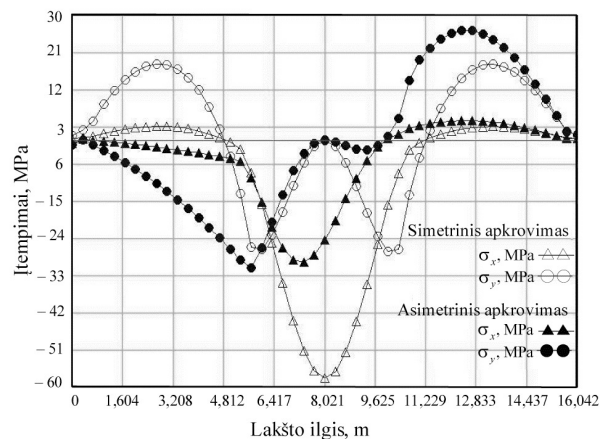
Nagrinėjant įtempius matome, kad σ_x įtempiai maksimalią reikšmę pasiekia apatinėje bunkerio dalyje, o σ_y įtempių atveju didžiausia reikšmė yra $1/3 \cdot l$ atstumu (l – lakšto išklotinė) nuo sijos tiesioje lakšto dalyje (žr. 14 pav.).



13 pav. Gofruoto lakšto poslinkių kitimo grafikas, esant paslankiam kontūriui

Fig. 13. Variations in the displacement of the corrugated sheet having a mobile contour

Pagal atliktų skaičiavimų rezultatus poslinkiai, lyginant su nepaslankaus kontūro asimetriniu apkrovimo variantu, padidėjo apie 72 %, o įtempiai – apie 5 %.



14 pav. Gofruoto lakšto įtempių kitimo grafikas, esant paslankiam kontūriui

Fig. 14. Variations in the stress of the corrugated sheet having a mobile contour

Išvados

Atlikus kabamojo plieninio bunkerio iš lygaus lakšto ir iš gofruoto lakšto poslinkių ir įtempių analizę galima teigti, kad taikant baigtinio lenkiamojo standumo elementus galima sumažinti poslinkius ir įtempius vidutiniškai apie 98 %. Gauti rezultatai akivaizdžiai rodo, kad naujas konstrukcinis sprendimas yra efektyvesnis.

Literatūra

- Aghajari, S. K.; Showkati, A. Showkati, H. 2006. Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure, *Thin-Walled Structures* 44(8): 904–908.
- Brown, Ch. J. 2001. Aspects of the elastic stability of walls in rectangular planform steel silos, *Journal of Process Mechanical Engineering* 215(2): 165–176.
doi:10.1243/0954408011530415
- Brown, Ch. J.; Nielsen, J. 1998. Silos – fundamentals of theory, behavior, and design. 836 p.
COSMOS/M. User's Guide. 2002. 1289 p.
- Doerich, C. J.; Rotter, M. 2008. Behavior of Cylindrical Steel Shells Supported on Local Brackets, *J. Struct. Engrg.* 134: (8) 1269–1277.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:8(1269)
- Prabu, B.; Raviprakash, A. V.; Rathinam, N. 2010 Parametric study on buckling behaviour of thin stainless steel cylindrical shells for circular dent dimensional variations under uniform axial compression, *International Journal of Engineering, Science and Technology* 2(4): 134–149.
- Ягофаров, Х. 1980. *Гибкие бункера*. Москва: Стройиздат, 170 с.

THE ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF SUSPENDED FLEXIBLE STEEL BUNKERS

E. Gudonis

Abstract

The article analyzes present flexible steel bunkers and those with the bounded bending tightness behavior of symmetrical and asymmetrical load. The paper presents stress distribution of two variations in structures and focuses on a comparative analysis of the contour of their stress and deformation. The design principles of bunkers having bounded bending tightness are discussed by the author.

Keywords: suspended flexible steel bunker, inert and mobile contours, finite bending stiffness sheet.