



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

№1, ТОМ 14 (2008) 23-30

УДК 624.014

(07)-0151-0

## **АНАЛІТИЧНЕ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГАЗГОЛЬДЕРА ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

**В.О. Попов**

*Вінницький національний технічний університет,  
вул. Войнів-інтернаціоналістів, 7, 21021, м. Вінниця, Україна.  
E-mail: xvivix@mail.ru*

*Отримана 21 січня 2008; прийнята 25 січня 2008*

**Анотація.** У статті розглянуто аналітичне та чисельне моделювання напружено-деформованого стану газгольдера високого тиску із низьколегованої сталі з використанням сучасних програмних комплексів “Lira 9.4” та “Cosmos-Works”. Методами будівельної механіки та опору матеріалів виявлено найбільш раціональну конструктивну форму та геометричні параметри газгольдера. Виконано порівняння достовірності чисельних результатів, отриманих на програмах “Lira 9.4” та “Cosmos-Works”. Доведено, що моделі, створені у обох програмах, дають занижені значення максимальних еквівалентних напружень у порівнянні з аналітичною моделлю. Чисельні результати, отримані на “Cosmos-Works”, мають в чотири рази меншу відносну похибку, аніж результати, отримані на “Lira 9.4”, у порівнянні з результатами аналітичного моделювання, тобто є більш достовірними.

**Ключові слова:** газгольдер високого тиску, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження, раціональне проектування, товстостінна сталева оболонка.

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗГОЛЬДЕРА ВЫСОКОТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**В.О. Попов**

*Вінницький національний технічний університет,  
ул. Воинов-интернационалистов, 7, 21021, г. Винница, Украина.  
E-mail: xvivix@mail.ru*

*Получена 21 января 2008; принята 25 января 2008*

**Аннотация.** В статье рассматривается аналитическое и численное моделирование напряженно-деформированного состояния газгольдера высокого давления низколегированной стали и с использованием современных программных комплексов “Lira 9.4” и “Cosmos-Works”. Методами строительной механики и сопротивления материалов выявлена наиболее рациональная конструктивная форма и геометрические параметры газгольдера. Выполнено сравнение достоверности численных результатов, полученных на программах “Lira 9.4” и “Cosmos-Works”. Доказано, что модели, созданные средствами обеих программ, дают заниженные значения эквивалентных напряжений в сравнении с аналитической моделью. Численные результаты, полученные на “Cosmos-Works”, имеют в четыре раза меньшую относительную погрешность чем результаты, полученные на “Lira 9.4”, в сравнении с результатами численного моделирования, таким образом, являются более достоверными.

**Ключевые слова:** газгольдер высокого давления, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, рациональное проектирование, толстостенная стальная оболочка.

## ANALYTICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF A DEFLECTED MODE OF HIGH PRESSURE GASHOLDER FOR AN INTELLIGENT DESIGN

V.O. Popov

Vinnitsa National Technical University,  
7, Zashitnikov-Internationalistov Str., 21021, Vinnitsa, Ukraine.  
E-mail: xvivix@mail.ru

Received 21 January, 2008; accepted 25 January, 2008

**Abstract.** There are examined analytical and numerical simulation of a high-pressure gasholder deflected mode of low-alloyed steel using the up-to-date programs Lira 9.4 and Cosmos-Works. Using the methods of structural mechanics and theory of strength of materials, the gasholder most rational structural form and geometrical parameters were revealed. Numerical results obtained by the programs Lira 9.4 and Cosmos-Works were compared to fix their reliability. It has been proved that the models created by the both programs give conservative values of the equivalent stresses in comparison with an analytical model. Numerical results obtained with the help of Cosmos-Works have four-time as little the relative error than the results obtained with the help of Lira 9.4 in comparison with the results of the numerical simulation, and thus are more reliable.

**Keywords:** high pressure gasholder, deflected mode, equivalent stresses, rational design, thick-walled steel casing.

### Вступ

Газгольдер високого тиску широко застосовують у хімічній та енергетичній промисловості. Основною задачею при їх проектуванні є забезпечення найвищих технологічних параметрів разом із високою надійністю та мінімальною матеріаломісткістю.

Пошукам методів розрахунку та питанню раціонального проектування газгольдерів високого тиску приділяли і приділяють увагу такі відомі вчені, як М.В. Кирпічов, І.А. Тищенко, М.І. Гальперін, А.М. Плановський, П.Г. Романков. [2 – 4, 8 – 10, 17].

На сьогодні однією з найбільш важливих проблем є енергозбереження та акумуляція енергії. Одним з її видів є перетворення енергії у внутрішню енергію стиснутого газу. Теоретичні та експериментальні дослідження довели, що максимальний коефіцієнт корисної дії таких акумулюючих установок досягається при високих тисках (у 5...10 МПа), водночас постає проблема у створенні раціональних конструк-

тивних форм резервуарів для зберігання газу високого тиску.

Тому важливим і актуальним є пошук нових раціональних конструктивних рішень газгольдерів високого тиску.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Згідно з [4, с. 124] до газгольдерів високого тиску належать апарати, що працюють під тиском вище 5 – 10 МПа. Високий тиск визначає найбільш раціональну конструкцію апаратів: їх прийнято виготовляти якомога меншого діаметру для зменшення товщини стінки та периметра ущільнювача на кришці. Технологічний об'єм газгольдерів збільшують за рахунок їх великої довжини, що іноді досягає 20 – 25 м.

Провівши аналіз сучасних конструктивних рішень металевих суцільних та шваруватих газгольдерів за джерелами [4, 8, 10] та нормативами [5, 6, 13 – 15], можна зробити висновок, що серед сучасних сферичних та циліндричних

газгольдерів найбільш раціональними з точки зору технологічності виготовлення є циліндричні газгольдери із еліптичним дном (рис. 1,а).

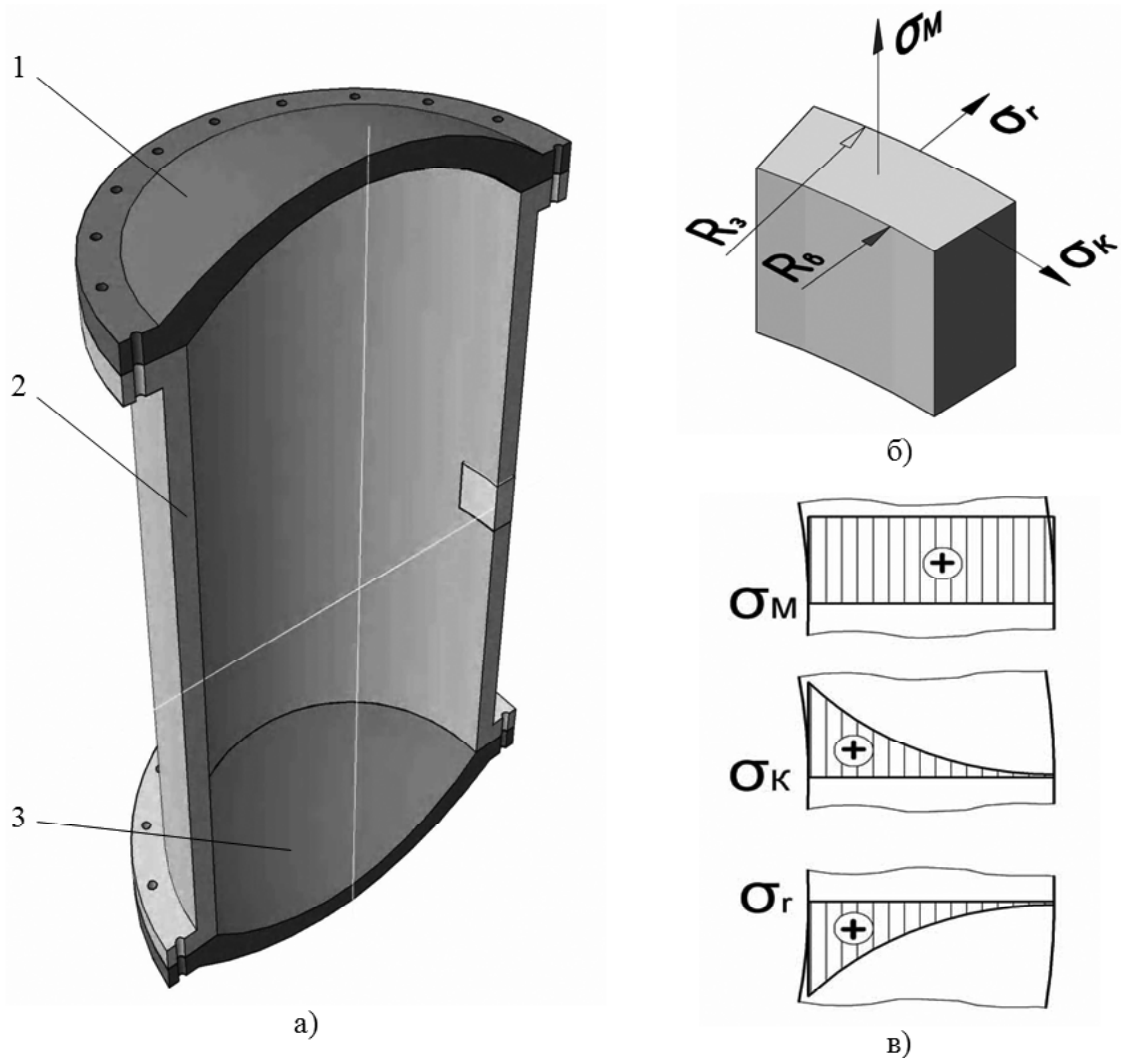
Аналитичний та чисельний розрахунок газгольдерів високого тиску має складність, пов'язану з тим, що товщина стінки у них значна і не можна нехтувати нерівномірністю розподілу напружень у стінках даних конструкцій у радіальному напрямку. Розглянемо основні чисельні співвідношення для визначення напружено-деформованого стану газгольдера, що знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p$ . Стінка газгольдера високого тиску являє собою

класичну товстостінну оболонку, а її одиничний напружений кінцевий елемент зображений на рис. 1,б.

Кільцеві та осьові напруження – розтягувальні, а радіальні – стискальні. Осьові, рівномірно розподілені по товщині стінки напруження, обчислюємо за аналітичним співвідношенням (1):

$$\sigma_M = p \cdot R_3^2 / (R_3^2 - R_6^2). \quad (1)$$

Радіальні напруження досягають найбільшого значення на внутрішній стінці  $\sigma_r^{\max} = -p$ ,



**Рис. 1.** Газгольдер високого тиску: а – аксонометрична схема перерізу газгольдера, де 1 – кришка, 2 – стінки, 3 – дно; б – одиничний фрагмент товстостінної стінки газгольдера високого тиску, де  $R_3$  – радіус кривизни зовнішньої поверхні циліндричної частини газгольдера,  $R_6$  – радіус кривизни зовнішньої поверхні циліндричної частини газгольдера; в – розподіл напружень  $\sigma_M$ ,  $\sigma_K$ ,  $\sigma_r$ .

а на зовнішній стінці  $\sigma_r^{\min} = 0$ . Кільцеві напруження досягають свого найбільшого значення на внутрішній стінці:

$$\sigma_K^{\max} = p \cdot (R_3^2 + R_6^2) / (R_3^2 - R_6^2). \quad (2)$$

На зовнішній стінці кільцеві напруження при цьому мінімальні:

$$\sigma_K^{\min} = p \cdot R_6^2 / (R_3^2 - R_6^2). \quad (3)$$

В діючих на даний момент нормах [4, 5] спрощений розрахунок товщини суцільної стінки  $s$  та зовнішній діаметр  $D_6$  циліндричного газгольдера визначають за наступними співвідношеннями:

$$s = 0,5 \cdot D_6 \cdot (\beta - 1), \quad (4)$$

$$D_3 = \beta \cdot D_6 \cdot (\beta - 1), \quad (5)$$

де  $\beta = D_3 / D_6$  – коефіцієнт товстостінності, що визначають за співвідношенням:  $\ln(\beta) = -p / ([\sigma] \cdot \varphi)$ , в свою чергу,  $\varphi = 0,85 \dots 1,0$  – коефіцієнт міцності, що залежить від матеріалу та типу конструкції апарату;  $[\sigma] = R_y / n_m$ , де  $R_y$  – розрахунковий опір сталі,  $n_m = 1,5$  – коефіцієнт запасу міцності.

З попередніх виразів можна зробити висновок, що чим більше внутрішній діаметр, тим більша товщина стінки обичайки газгольдера.

Товщину дна призначаємо за співвідношенням (6):

$$s_d = p \cdot R / (2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot p), \quad (6)$$

де  $R$  – радіус кривизни дна в вершині.

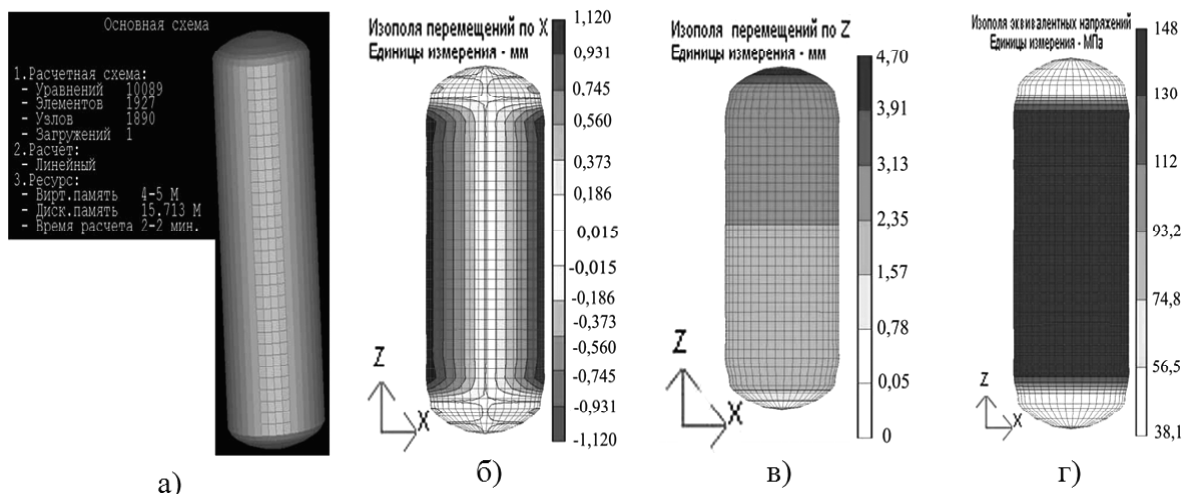
На даний момент для кінцево-елементного моделювання напружено-деформованого стану газгольдерів застосовують програмні комплекси, серед яких на Україні найбільш відомим є “Lira 9.4”, а за кордоном “Cosmos-Works” [1, 12, 18].

### Постановка проблеми

Виходячи з попередніх міркувань, необхідно на прикладі конкретного газгольдера шляхом аналізу аналітичної моделі та моделей, створених методом кінцевих елементів різними програмами, підібрати найбільш раціональні конструктивні співвідношення сталевого газгольдера.

### Основна частина

Виконаємо аналітичне моделювання та підбір найбільш раціональних геометричних параметрів газгольдера робочим об’ємом  $55 \dots 60 \text{ м}^3$ , що знаходиться під дією внутрішнього тиску  $p = 5 \text{ МПа}$ , методами класичної будівельної механіки та опору матеріалів, на основі теорії товстих оболонок у статичній постановці, без врахування всіх інших силових факторів.



**Рис. 2.** Чисельне моделювання газгольдера на програмі “Lira 9.4”: а – модель у розрахунковому процесорі, б – деформація по  $Ox$ , в – деформації по  $Oz$ , г – еквівалентні напруження за енергетичною теорією Губера-Хенкі-Місеса.

Згідно з [3 – 7, 13 – 17] найбільш раціональною є конструкція газгольдера циліндричної форми, тобто такої, як на рис. 1,а) (внутрішній діаметр  $D_g = 2,95 \text{ м}$ , висота циліндричної частини  $H = 8 \text{ м}$ ) із еліптичним дном (висота напівеліпса  $r_g$  за [3] призначається близько 15...25%  $D_g$ , тобто  $r_g = 2,95 \cdot (0,15...0,25) = (0,44...0,74) \text{ м} = 0,5 \text{ м}$ , при цьому радіус кривизни  $R = 4,5 \text{ м}$ . Робочий об'єм при цьому буде дорівнювати  $V_g \approx 58,7 \text{ м}^3$ . Попередньо, згідно з рекомендаціями [3 – 5, 13 – 15], призначаємо стінку газгольдера із низьколегованої сталі 09Г2С ( $[\sigma] = 300/1,5 = 200 \text{ МПа}$ ). Робочу температуру  $t = 20^\circ \text{C}$  будемо вважати незмінною.

При цьому найбільші кільцеві напруження досягають свого максимуму на внутрішній стінці. За формулою (4) її товщина буде залежати від параметру  $\beta$ , який визначаємо за співвідношенням

$$\ln \beta = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ Па}}{200 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,95} = 0,027,$$

де  $\varphi = 0,95$  – коефіцієнт послаблення, що вводиться для низьколегованих сталей. Звідси  $\beta = e^{0,027} = 1,028$ ,  $D_3 = \beta \cdot D_g = 1,028 \cdot 2,95 = 3,034 \text{ м}$ . Таким чином, мінімально можлива товщина

стілки циліндричного залізобетонного газгольдера становить  $s = (3,084 - 2,95) / 2 = 0,067 \text{ м} = 67 \text{ мм}$ . Товщина дна при цьому за співвідношенням (6) буде  $s_d = 5 \cdot 10^6 \cdot 4,5 / (2 \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,5 \cdot 200 \cdot 10^6) = 81 \text{ мм}$ .

Виходячи із сучасного стану ринку листових матеріалів та технологічних міркувань, вибираємо конструктивну товщину сталевий обичайки  $s = 45 \text{ мм}$  та дна  $s_d = 130 \text{ мм}$ .

Таким чином, еліптичне дно в даному конструктивному виконанні набагато (в ~ 2,9 рази) товще за обичайку.

Максимальні еквівалентні напруження в обичайці при тискові 5 МПа складуться:

$$\sigma_{\max} = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ Па}}{\ln(0,045 \text{ м} / 0,5 \text{ м} \cdot 3 + 1)} = 169,2 \text{ МПа}.$$

Максимальні еквівалентні напруження в дні при такому тискові складуться:

$$\sigma_{\max}^d = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot (4,5 + 0,13/2) \text{ м}}{2 \cdot 0,130 \text{ м}} = 89,4 \text{ МПа}.$$

Максимальне лінійне видовження газгольдера по осі Oz за умови фіксації однієї з його вершин, враховуючи видовження обичайки та

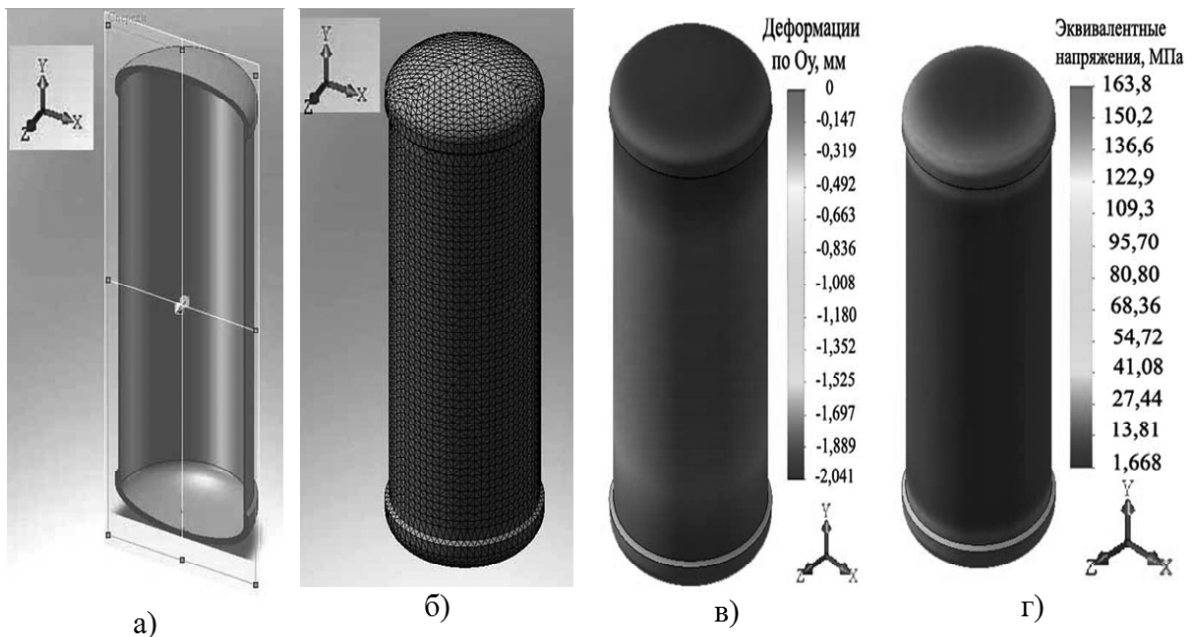


Рис. 3. Чисельне моделювання газгольдера на програмі “Cosmos-Works”: а – модель у розрахунковому процесорі, б – деформації по Oх, в – деформації по Oy, г – еквівалентні напруження за енергетичною теорією міцності.

спучення купола дна та кришки, складає  $z_{\max} = 2,42$  мм (обчислено за [С. 471 – 545, 16]).

Після наближених аналітичних підрахунків виконаємо чисельне моделювання даного газгольдера на програмних комплексах “Lira 9.4” та “Cosmos-Works” за геометричними співвідношеннями, підібраними при аналітичному підрахунку. Результати чисельного розрахунку на програмі “Lira 9.4” приведено на рис. 2.

З рис. 2, г можна побачити, що за кінцево-елементним моделюванням на програмному комплексі “Lira 9.4” потовщене еліптичне дно є недонапруженим, а напруження в ньому наближаються до еквівалентних напружень в “тонкій” обичайці при  $s_D = 70$  мм, тобто при значеннях товщини достатньо близьких до обчислених теоретично (81 мм).

Чисельні розрахунки на “Cosmos-Works” (~ 17 тис. об’ємних тетрадричних кінцевих елементів).

Зведені результати розрахунку методами класичної будівельної механіки та результати моделювання газгольдера на вищезгаданих програмних комплексах показані у табл. 1.

Аналізуючи ізополя еквівалентних напружень, а також деформації моделей по осі Oz (рис. 2, рис.3, табл. 1), можна зробити наступні висновки.

1. Еквівалентні напруження за “Cosmos-Works” чисельним моделюванням найближчі до теоретичних. Похибка при цьому складає усього 3,2%, у той час як моделювання на “Lira 9.4” дало відхилення 12,6%, причому не у бік запасу міцності.
2. Лінійне видовження газгольдера по осі Oz за “Cosmos-Works” також ближче до теоре-

тичних (відносна похибка 15,7%) у порівнянні із 94% за “Lira 9.4”.

3. Чисельні результати отримані за обома кінцево-елементними моделями, дають відхилення у порівнянні з результатами за аналітичною моделлю, причому не у бік запасу міцності, що свідчить про необхідність введення відповідних додаткових коефіцієнтів запасу міцності, що враховують дані похибки.

Подальший пошук оптимізацій (підбір діаметру обичайки, висоти еліпса) призвів до наступних результатів: внутрішній діаметр газгольдера  $D_g \approx 1,6$  м, висота дна  $r_g = 0,4$  м. За критерій оптимальності вибрано мінімальність напружень у небезпечних перерізах. Висота обичайки складає  $H = 28$  м, що перетворює газгольдер у занадто громіздкий. Економія металу, що досягається внаслідок менших напружень у небезпечних перерізах, при цьому нівелюється нераціональною формою.

## Висновки

Аналізуючи результати аналітичних та чисельних досліджень на програмних комплексах “Lira 9.4” та “Cosmos-Works” напружено-деформованого стану газгольдера, можна зробити такі висновки.

1. Набув подальшого розвитку метод аналізу напружено-деформованого стану товстостінних газгольдерів.
2. Розроблено аналітичну та дві чисельні моделі газгольдера із внутрішнім робочим тиском 5МПа, робочим об’ємом, з їх допомогою виконано підбір основних геометричних співвідношень для раціоналізації конструкції.

Таблиця 1. Зведені результати моделювання газгольдера робочим об’ємом  $V \approx 58,7$  м<sup>3</sup>.

Результати аналітичного моделювання		Результати чисельного моделювання на “Lira 9.4”		Результати чисельного моделювання на “Cosmos-Works”	
Максимальні еквівалентні напруження $\sigma_{\max}$ , МПа	Максимальні деформації по Oz, мм	Максимальні еквівалентні напруження $\sigma_{\max}$ , МПа	Максимальні деформації по Oz, мм	Максимальні еквівалентні напруження $\sigma_{\max}$ , МПа	Максимальні деформації по Oz, мм
169,2 у обичайці	2,42	148,0 у обичайці	4,70	163,8 у обичайці	2,04
89,4 у дні		38,1 у дні		68,4 у дні	

3. Виконано верифікацію програмних комплексів та “Lira 9.4” вищезгаданого газгольдера, доведено, що “Cosmos-Works” дає більш коректні результати, у порівнянні з отриманими аналітично.

## Література

1. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 728 с.
3. Балан Т.А., Раздорожная О.В. Расчет анизотропных слоистых оболочек методом конечных элементов // Проблемы прочности. – №7 – 1985. – С. 103 – 108.
4. Генкин А.Э. Оборудование химических заводов: Учеб. Пособие для техникумов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 280 с.
5. ГОСТ 14249-80. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Введ. 01.07.1980. – М, Издательство стандартов, 1980. – 32 с.
6. ГОСТ 14249-80. Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность. Введ. 01.01.1983. – М, Издательство стандартов, 1983. – 41 с.
7. ДБН В.1.2.-2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Введ. з 1 січня 2007 р. на заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10). К.: Мінбуд України, 2006. – 71 с.
8. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Нелинейный расчет железобетонных плит методом конечных элементов // Научно-технические проблемы современного железобетона. Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій Міністерства регіонального розвитку та будівництва. – Вип. 67 – Київ, НДІБК, 2007. – С. 183 – 194.
9. Металлические конструкции. В 3 т. Т.1. Элементы стальных конструкций. Учебное пособие для вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др.: Под ред. Горева В.В. – М.: Высшая школа, 1997. – 527 с.
10. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2. Под ред. П.Н. Учаева. – 3-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.
11. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1975. – 705 с.
12. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций Лира версия 9.0. Руководство пользователя. Книга 1. Основные теоретические и расчетные положения. Некоторые рекомендации. НИИ АСС. – Киев, – 2002. – 147 с.
13. СНиП III-18-75. Строительные нормы и правила. Металлические конструкции / Госстрой СССР. – Взамен главы СНиП III-8.5-62\*; Введ. 01.01.77 – М.: Стройиздат, 1975. – 70 с.
14. СНиП II-23-81\*. Строительные нормы и правила. Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – Взамен СНиП II-В.3-72; СНиП II-И.9-62; СН 376-67 Введ. 01.01.82. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
15. СНиП 2.09.03-85. Строительные нормы и правила. Сооружения промышленных предприятий. Нормы проектирования / Госстрой СССР. Взамен СНиП II-91-77, СН 302-65, СН 471-75. Введ. 01.01.87. (с изменениями от 8 июля 1988 г.) – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 96 с.
16. Сопротивление материалов. Под общ. ред. Писаренко Г.С. – 5 изд. перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.
17. Строительная механика: Учебник для вузов / Ю.И. Бутенко, Н.А. Засядько, С.Н. Кан и др.; Под ред. Ю.И. Бутенко. – К.: Вища школа, 1989. – 479 с.
18. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – Санкт-Петербург: Издательство “БХВ-Петербург”, 2006. – 799 с.

**Попов Володимир Олексійович** є старшим викладачем кафедри «Промислове та цивільне будівництво» Вінницького національного технічного університету. Наукові інтереси: стійкість рівноваги висотних споруд, раціональні високоточні роз'ємні з'єднання, контейнери для утилізації радіоактивних відходів, газгольдери та інші металеві ємності для зберігання та утилізації рідких та газоподібних речовин.

**Попов Владимир Алексеевич** является старшим преподавателем кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Винницкого национального технического университета. Научные интересы: устойчивость равновесия высотных сооружений, рациональные высокоточные разъемные соединения, контейнеры для утилизации радиоактивных отходов, газгольдеры и другие металлические емкости для хранения и утилизации жидких и газообразных веществ.

**Popov Vladimir Olexiyovych** is a senior lecturer of the department of industrial and civil engineering at Vinnitsa State Technical University. His research interests include stability of equilibrium, rational precision sectional connectors, containers to utilize radio-active waste, gasholders and other metallic tanks to store and utilize liquid and gaseous substances.