

ИЗСЛЕДВАНЕ КОНСТРУКЦИЯТА НА ГАЗХОЛДЕР С ОБЕМ 5000 m³, АВАРИРАЛ В ПРОЦЕС НА ЕКСПЛОАТАЦИЯ

Димитър В. Даков¹, Любомир А. Здравков²

Научна конференция УАСГ' 2008

Ключови думи: цилиндричен стоманен газхолдер, подвижен таван, телескопична колона, поддържаща скара, мембрана, ремонт

1. УВОД

Новите технологии и материали, въведени в газовата индустрия дават възможност да се намалят съществено експлоатационните разходи, като се подобри съхранението на газовите продукти и се удължи срока на експлоатация. Същевременно, недостатъчният практически опит при изграждането и експлоатацията на нови съоръжения и подценяването на тяхната специфика в работно състояние, могат да създадат опасни рискове, както показва разглеждания от нас случай на производствена авария в ПСОВ – Кубратово през 2007 г.

2. ОБЩИ ДАННИ

Газхолдерът, предмет на настоящия доклад, първоначално е проектиран и изграден като “мокър” с обем $V = 3000 \text{ m}^3$, заедно с още един в съседство със същите размери. Конструктивните проекти на газхолдерите са руски по широко прилагана технология, сведена до типова разработка. Газхолдерите са изградени в началото на 80^{те} години от български строители и са функционирали почти 10 години.

С цел да модернизират експлоатацията при усвояването на отпадните продукти от водоочистката новите собственици на “Софийска вода” предприемат мерки за реконструирането на единия газхолдер от “мокър” в сух по немска технология. /фиг. 1./



фиг. 1 Общ изглед на реконструирания газхолдер

¹ Димитър Василев Даков, проф. д-р инж., УАСГ, катедра „МДПК“, София, бул. „Хр. Смирненски“ N1, корпус Б, ет. 7, каб. 748, e-mail: dakov_fce@uacg.bg

² Любомир Ангелов Здравков, гл. ас. д-р инж., УАСГ, катедра „МДПК“, София, бул. „Хр. Смирненски“ N1, корпус Б, ет. 7, каб. 733, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

Проектът за реконструкцията и ръководството на строителството са извършени от фирмата “Passavant-Roediger”, а изпълнението на строително-монтажните работи е от българска фирма. Обектът е предаден за експлоатация през пролетта на 2007 г. В реконструирувания вариант водната “възглавница” е отстранена и подвижната “камбана” е позиционирана стационарно в максимално повдигната положение. Долната цилиндрична част /корпус/ на стария газхолдер е усилена с вертикални пълностенни стоманени колони, разположени по външния периметър. Неподвижното закрепване на “камбаната” към долната цилиндрична част е осъществено с корав стоманен пръстен.

По новата технология за осигуряването на променливия обем на газа /метан/ се използва специален подвижен таван, който се движи вертикално, направляван от телескопичната колона, намираща се в средата на газхолдера /[фиг. 2](#)/.



фиг. 2 Подвижен таван и телескопична колона

Между подвижния таван и коравия стоманен пръстен, свързващ горната и долната част на газхолдера е монтирана гъвкава гумена мембрана, която осигурява непроницаемост на газ във външното пространство. При повдигането на подвижния таван под действие на вътрешното налягане от газа, подаван от компресорната станция, гумената мембрана излиза над коравия стоманен пръстен и започва да се опира върху поддържаща скара, която се състои от стоманени обръчи /поцинковани тръби $\varnothing 31,8 \times 2,6\text{mm}$ / и опиращи се върху тях иглолистни дъски с напречно сечение $35 \times 150 \text{ mm}$. Поддържащата скара е изградена от 15 стоманени обръчи, разположени телескопично по височина през 600 mm един от друг и 48 реда вертикално монтирани дъски през разстояние 1220 mm. /[фиг. 3](#)/



фиг. 3 Общ вид на поддържащата скара

3. КОНСТАТАЦИИ ОТ ОБСЛЕДВАНЕТО НА АВАРИЯТА

По сведения на лицата, ангажирани с експлоатацията, аварията в газхолдера е настъпила в нощта между 1 и 2 юли 2007 г. Непосредствено преди аварията газхолдерът е бил запълнен $60 \div 70\%$ от полезния обем. Вътрешното налягане в затворения обем е паднало бързо и подвижния таван се е сринал на дъното на газхолдера със силен трясък. При направеният оглед на газхолдера след аварията се установи, че поддържащата скара е разрушена, а гумената мембрана – пробита. /фиг. 4/

Обследването на вариралите части позволи да се направят следните констатации:

- Поддържащата скара на гумената мембрана е претърпяла цялостна трансляция в югоизточна посока като се наблюдават общи отмествания $200 \div 600$ mm.
- Осем от стоманените обръчи разположени в долния край на скарата са разкъсани. При това почти всички обръчи са разкъсани на две места, разположени в противоположни краища. Като цяло местата на разкъсване съвпадат с направлението на отместване.
- Всички разкъсвания в стоманените обръчи /тръби $\varnothing 31,8 \times 2,6$ / са в зоната на челните заваръчни шевове /фиг. 5/
- Челните заваръчни шевове, свързващи отделните сегменти на обръчите са изпълнявани на място без подложни пръстени, а тръбите са доставени горещо поцинковани.
- Значителна част от вертикално разположените дъски, намиращи се в зоната на разкъсване на обръчите, са счупени.
- Гумената мембрана е пробита на 2 места, като дължината на пробивите не надвишава 120mm.



фиг. 4 Част от разрушената поддържаща скара



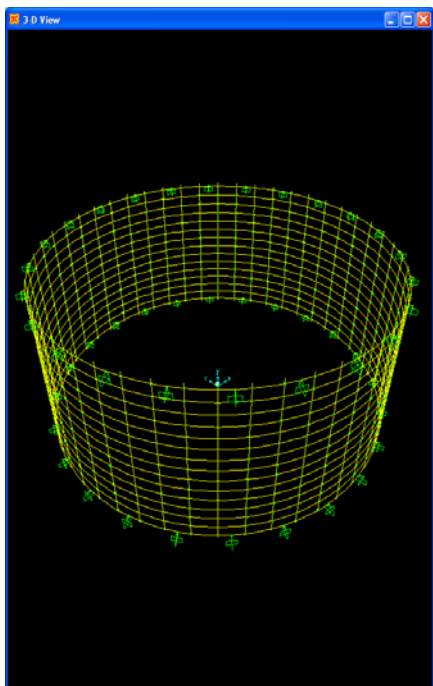
фиг. 5 Разрушен челен шев в стоманен обръч

От цялостния оглед на газхолдера след аварията се установи следното:

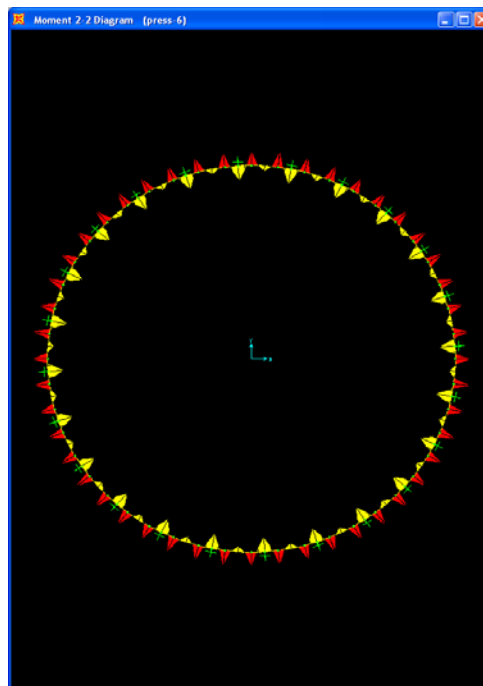
- Наблюдава се видимо отклонение на оста на телескопичната колона от вертикалата.
- По повърхнината на средната /подвижната/ част от телескопичната колона има ясно видима надлъжна линия с дължина повече от 3,0 m, която свидетелства за високо ниво на триене в ролковия механизъм, разположен в основата на горната част на телескопичната колона.
- Баластът от тротоарни плочи, разположен върху стоманения кръг на подвижния таван, е частично разместен.
- Налице е обща деформация на горната част на корпуса на газхолдера спрямо теоретичната линия на вертикалната цилиндрична повърхнина, но трудно може да се оцени дали е в резултат на аварията или това са производствени дефекти при изготвянето.
- В определени участъци от покрива има значителни вибрации /при възбуждане от подскок на човек/, което свидетелства за ненадеждна връзка на някои от радиалните покривни ребра с централния пръстен на купола.
- Някои от обтяжките, стабилизиращи горната част на телескопичната колона към горния опорен пръстен на корпуса, не са добре натегнати.
- В купола на газхолдера се наблюдава видимо хлътване на стоманената обшивка в една зона и издуване в срещуположната зона.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНОТО МОДЕЛИРАНЕ

За да се получат достатъчно надеждни теоретични данни за деформираното и напрегнатото състояние на поддържащата скара при различни състояния на натоварване е изготвен пространствен изчислителен модел с програмния продукт SAP 2000. /фиг. 6/. При изчислителното моделиране е търсено подходящо съответствие с реалната конструкция. Така например, за най-горния и най-долния стоманен обръч е възприето неподвижно ставно опирание през 15° , а останалите междинни пръстени са без външни опори, но са свързани помежду си чрез елементи с огъвна коравина, които са разположени вертикално в кръг през $7,5^{\circ}$. Тези вертикални елементи съответстват на иглолистните дъски в поддържащата скара.



фиг. 6 Изчислителен модел



фиг. 7 Диаграма на огъващите моменти в най-долния пръстен от натоварване от свръхналягане

Пространственият изчислителен модел дава възможност да се отчете скаровата връзка между хоризонталните стоманени елементи /обръчи/ и вертикалните дървени елементи /водачи/. В резултат на скаровата връзка, при въздействието на вътрешното налягане на газа, предавано

посредством гумената мембрана, в обръчите се пораждат не само осови сили /както е прието в проекта на фирмата "Passavant-Roediger"/, а са налице и огъващи моменти.

При численото моделиране е взето под внимание и температурното въздействие в съответствие с EN1991 - част 5. Трябва да се има предвид, че температурните ефекти от климатични температурни въздействия са от съществено значение за изцяло открити неизолирани стоманени съоръжения, какъвто е разглеждания случай. Освен това върху поддържащата скара се упражнява и технологично температурно въздействие от температурата на съхранявания газ /35⁰/. При направеното теоретично изследване са взети също така под внимание ефектите от слънчевата радиация и неравномерното разпределение на температурата.

Температурните деформации и възникналите в резултат на това температурни напрежения зависят от геометрията и граничните условия на разглежданата конструкция и от физичните свойства на използвания материал. Точното определяне на ефектите от температурни въздействия е сложна задача, за която са необходими коректни данни за температурата на въздуха, слънчевата радиация, топлинното излъчване през нощта и др. В настоящото теоретично изследване температурното въздействие е взето под внимание в следните комбинации:

- Нагряване на външната повърхност на газхолдера с 40⁰С и нагрята поддържаща скара.
- Неравномерно нагряване на определен сектор от външната повърхност с обхват 90⁰, като допълнителната температура от неравномерното нагряване е приета 15⁰.
- Равномерно нагряване на поддържащата скара с 35⁰ /експлоатационна температура/ като нагряването се извършва последователно върху първия обръч, втория обръч и т.н.

Някои от резултатите от численото моделиране са дадени в таблиците по-долу:

Пръстен	Нормативни усилия в пръстените от температурни товари, kN и kNm									
	преместване от $\Delta t = 40^{\circ}\text{C}$		преместв. от $\Delta t = 35^{\circ}\text{C} + 15$		$\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ - по 2 пръстена		$\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ - по 4 пръстена		$\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ - по 6 пръстена	
	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M
8	0	0	0	0	-0,001	0	0,02247	-0,000211	-0,477	0,0052
7	-0,000368	0	-0,000502	0	0,00548	0	-0,07996	0,001072	1,1203	-0,0132
6	0,001636	-0,000225	0,00079	-0,000178	0,0226	0,000169	-0,4771	0,0051	-0,934	-0,0568
5	0,00395	-0,000674	-0,00472	-0,00028	-0,845	0,0012	1,1156	-0,0135	0,2964	-0,0709
4	-0,0211	-0,0019	-0,017	-0,00095	-0,486	0,0044	-0,9428	-0,0558	0,0557	-0,0677
3	-0,15	-0,0065	-0,182	-0,0023	1,205	-0,0168	0,3904	-0,0693	0,0763	-0,0659
2	0,3669	-0,0219	0,446	-0,0273	-0,779	-0,0673	0,2397	-0,0792	0,1629	-0,0784
1 - дъска	4,551	0,0603	5,663	0,0222	-1,732	-0,0745	-2,074	-0,0702	-2,054	-0,0704
1 - опора	4,551	-0,2236	5,643	-0,2775	0,021	-0,0468	-2,124	0,0157	-2,108	0,016

Пръстен	Нормативни усилия в пръстените от свръхналягане, kN и kNm					
	p_0 - по 2 пръстена		p_0 - по 4 пръстена		p_0 - по 6 пръстена	
	N	M	N	M	N	M
8	0	0	-0,029	0,000328	0,174	-0,019
7	0	0	-0,469	0,0052	8,743	-0,0974
6	-0,03	0,00044	0,172	-0,002	17,312	-0,1929
5	-0,469	0,0049	8,744	-0,0971	17,958	-0,2003
4	0,205	-0,0033	17,345	-0,1942	17,545	-0,1944
3	8,735	-0,0941	17,985	-0,2034	17,492	-0,1979
2	16,722	-0,197	16,908	-0,1988	16,876	-0,1985
1 - дъска	16,215	-0,2127	15,796	-0,2072	15,82	-0,2076
1 - опора	16,181	0,2541	15,764	0,2475	15,787	0,2479

Мах. нормативни усилия в дъските	
Натоварване	M, kNm
преместв. от $\Delta t = 40^{\circ}\text{C}$	0,0098
прем. от $\Delta t = 35^{\circ}\text{C} + 15$	0,0118
$\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ - 2 пръстена	0,0444
$\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ - 4 пръстена	0,0434
$\Delta t = 35^{\circ}\text{C}$ - 6 пръстена	0,0248
p_0 - 2 пръстена	0,1529
p_0 - 4 пръстена	0,1528
p_0 - 6 пръстена	0,1528

5. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО И ОСНОВНИ ИЗВОДИ

Известно е, че за да се установят точните причини /или причина/ за настъпването на дадена авария трябва да бъдат анализирани внимателно всички съществени факти и обстоятелства, които създават такава потенциална опасност. В общия случай това са:

- Качеството на вложените материали;
- Якостта на изпълнените челни заваръчни шевове;
- Невярно или неточно изчисление;
- Лошо или неудачно конструиране;
- Лошо или неточно монтиране;
- Неправилна експлоатация;
- Прекомерно натоварване в изключителни обстоятелства.

От направената проверка за качеството на вложената стомана за авариралите стоманени обръчи се установи, че нейната якост и химически състав отговарят на заложената в проекта стомана S235. Размерите на използваните тръби $\varnothing 31,8 \times 6$ също отговарят на стандартните изисквания.

Дървесината, вложена за изготвяне на дъските е с ниски якостни показатели и видими дефекти. В проекта не е предписан определен клас дървесина и няма изчисления за дървените елементи, но нашата проверка показва, че теоретичните напрежения от огъване под действие на газовото налягане остават по-ниски от якостта на вложената дървесина.

Експерименталната проверка за якостта на заваръчните шевове показва, че тя е приблизително 70% от якостта на основния метал. Същевременно, изчислителната носимоспособност на един челен заваръчен шев в стоманен обръч е по-голяма от съответното максимално изчислително усилие, определено в проекта.

Основната причина за относително ниската якост на челните заваръчни съединения е технологична, заложена в проектното решение. Предвидено е да се заваряват челно на място поцинковани стоманени тръби при това без да се предпише конструктивен детайл за изпълнението на този шев. Известно е, че цинковото покритие силно влошава качеството на заваряване и снижава якостта на заваръчния шев.

При реконструкцията на газхолдера за превръщането му от “мокър” в “сух” са допуснати редица дефекти, които влошават неговото общо състояние – налице са несъвпадения на ребрата от купола с вертикалните стойки, липсват заваръчни шевове в централния и опорния пръстен, значително отклонения от цилиндричната форма на скарата и др.

Неправилната експлоатация на газхолдера и прекомерното му натоварване са малко вероятни причини за аварията поради наличието на система в устройството, подаващо вътрешното налягане, която блокира при по-висока стойност на същото.

Сравнението на резултатите от численото моделиране на поддържащата скара с изчисленията в реализирания проект показва следното:

1. Нормалните напрежения в стоманените обръчи, получени в реализирания проект по формулата на “котела” са значително по-ниски от тези, определени в пространствения изчислителен модел;
2. Приетото напречно сечение на стоманените обръчи $/\varnothing 31,8 \times 2,6/$ е недостатъчно, за да осигури необходимата им изчислителна носимоспособност на същите;

Анализът на получените резултати от изследването показва, че не може да се посочи единствена причина за аварията на поддържащата скара в газхолдера. Налице са комплекс от фактори, действащи в неблагоприятна посока, които са създали условия за нейното настъпване. Основните причини, довели до аварията, са следните:

- Неотчетени допълнителни напрежения в стоманените обръчи – от местно огъване, температурни въздействия и др.
- Занижена носимоспособност на монтажните челни заваръчни шевове, свързващи отделните сегменти в обръчите.
- Отклонения от проектното положение на телескопичната стойка и поддържащата скара.
- Недостатъчна коравина на закрепване на телескопичната колона към покрива на газхолдера.

- Въз основа на направения анализ бяха направени следните главни препоръки:
- Да се изготви проект за ремонт и усиляване на газхолдера след пълен статико-динамически анализ на цялата носеща конструкция;
- Да се извърши препроектиране на поддържащата скара като се вземат под внимание резултатите от настоящото изследване;
- Да се изгради автоматизирана система за контрол, управление и анализ на параметрите на газоподаване /количество на подаван газ, налягане, ниво на запълване/ с използване на датчици във взривоопасна среда.

INVESTIGATION OF STRUCTURE OF GASHOLDER WITH 5000 m³ CAPACITY, DAMAGED DURING EXPLOITATION

Dimitar V. Dakov, Lyubomir A. Zdravkov

***Key words:** cylindrical steel gasholder, moving sealing, telescopic column, supporting grating, membrane, repair works*

***Abstract:** Cylindrical steel gasholder with initial capacity of 3000 m³ is in service from 80th years of 20 century. After 10 years exploitation it has been reconstructed from “wet” to “dry” type and the capacity is increased to 5000 m³.*

A few weeks after reconstruction, filled with gas to 60 ÷ 70 % of working volume gasholder, stops to work. It has been listen loud thunder and internal sealing stepped on the bottom. During inspection has been established that supporting grating is damaged, membrane is punctured and bricks on moving sealing are dislocated. Additional exploitation was impossible.