

УДК 539.3:621.791(621.642.3+69.059.25)

Гоцуляк Є.О., д-р техн. н.,
Барвінко А.Ю., канд. техн. н.,
Шах В.В.

ВІДНОВЛЕННЯ СТІЙКОСТІ ПОТОНШЕНИХ ОБОЛОНОК ШЛЯХОМ ВСТАНОВЛЕННЯ РЕБЕР ЖОРСТКОСТІ

В Україні більшість резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів, що знаходяться в експлуатації, збудовані в 1960-х - на початку 1970-х років. Аналіз результатів обстеження технічного стану металоконструкцій резервуарів, виконаного спеціалістами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона (табл. 1), показує, що після 25 - 40 років експлуатації, їх стінка має досить значне зменшення товщини в результаті корозії, яке може досягати близько 1 мм (до 30% товщини поясу).

Таблиця 1

Товщини поясів стінок резервуарів ємністю 5 тис.м³ для зберігання нафти, що експлуатуються в системі магістральних нафтопроводів України

Номер поясу	Проектна товщина поясу, мм	Величини потоншень поясів стінок резервуарів, мм

		шень поясів стінок резервуарів, мм					
		1	2	3	4	5	6
VIII	5	0,11	0,25	0,27	1,01	0	0,97
VII	5	0,23	0,5	0,35	0,9	0,55	0,8
VI	5	0,03	0,33	0,39	0,78	0,56	0,61
V	5	0,11	0	0,43	0,79	0,47	0,38
IV	6	0	0,2	0,35	0,78	0,79	0,54
III	7	0,27	0,48	0,57	1,06	0,91	0,44
II	8	0,31	0,37	0,31	0,98	0,42	0,29
I	10	0,23	0,52	0,1	0,72	0,19	0,59
Термін експлуатації, рік		27	27	29	29	31	32

Примітка. Діаметр резервуара - 22,79 м, висота стінки - 12,0 м.

Оцінка впливу зменшення товщини циліндричної оболонки на її стійкість показує, що достатньо незначного потоншення верхніх поясів - близько 0,7 мм, для того, щоб умова її стійкості була порушена. Так на рис. 1 представлено графіки залежності відносних значень критичних навантажень (співвідношення між критичним значенням потоншеної оболонки і оболонки номінальної товщини),

визначені за формулами [7], від рівномірного потоншення стінки по всій висоті. P_{cr1} і P_{cr2} - відповідно критичне навантаження при дії паралельно твірним і нормально до бокової поверхні (нижче осьове стиснення і зовнішній тиск). Згідно представлених даних несуча здатність оболонки резервуарів ємністю 5 і 10 тис. м³ при потонненні стінки на 1,25 мм, зменшується приблизно на 30%. Це означає, що для подальшої

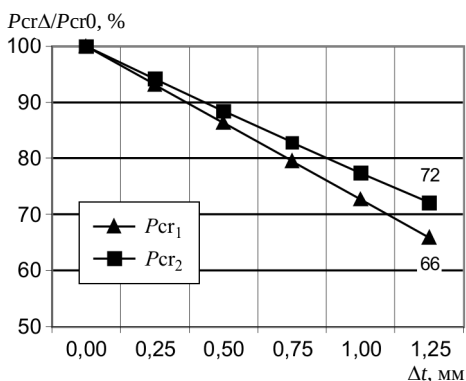


Рис. 1. Залежність відносних значень критичних навантажень від величини потоншення оболонки

експлуатації резервуара необхідно передбачати підкріплення стінки. Найбільшу актуальність питання підвищення жорсткості стінки має для резервуарів ємністю 5 і 10 тис. м³. Це обумовлено тим, що конструкція їх стінки передбачала зменшену товщину верхніх поясів – 5 і 6 мм відповідно. Для забезпечення ж стійкості стінки встановлювали додатково вертикальні ребра жорсткості довжиною 2,5 м в місцях обпирання радіальних балок покриття [1, 2]. Іншою проблемою є те, що товщини стінки назначалися без урахування мінусового допуску прокату і припуску на корозію. Основними способами підкріплення циліндричних оболонок є встановлення поздовжніх ребер жорсткості (стрингерів) та встановлення кілець жорсткості (шпангоутів). Але ефективність такого підсилення стосовно циліндричної оболонки з відношенням $R/t \approx 2000 \dots 4000$ при наявності навантаження її зосередженими силами потребує уточнення особливо з огляду оцінки запасу стійкості.

Для вибору конструктивної схеми підсилення методом скінчених елементів досліджували стійкість циліндричної стінки резервуара ємністю 5 тис.м³ (табл. 1) під дією стискаючих вздовж твірної зосереджених зусиль, що діють в місцях обпирання радіальних балок щитової покрівлі (крок 3,0 м), при установці кілець і поздовжніх ребер жорсткості (рис. 2). Результати розрахунку порівнювали з випадком рівномірного навантаження стінки вздовж твірної (рис. 2,а,б). Циліндричну оболонку описували плоскими прямокутними скінченими елементами розмірами 0,5х0,5м, ребра жорсткості – скінченими елементами балочного типу. Задачу стійкості вирішували в лінійній постановці.

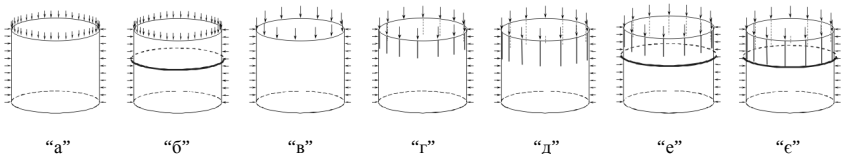


Рис. 2. Схеми моделей оболонок

Ефективність підсилення поздовжніми ребрами досліджувалась за схемами “г” і “д”. Схема “г” відповідає довжині ребер 2,5м, “д” - довжині 4,5м, тобто висоті ділянки всіх тонких поясів. Для оцінки підсилення кільцевим ребром сумісно із існуючими короткими і подовженими ребрами прийняті схеми “е” і “є”.

Слід звернути увагу на те, що стінка має нерівномірний характер потоншення по поясам див. таблицю 1. Тому при визначенні критичних значень навантажень, приймалися такі варіанти потоншення: двох

верхніх поясів - VII-VIII; усіх тонких поясів - V-VIII; усіх поясів - I-VIII; чотирьох нижніх поясів - I-IV.

Як прийнято у практиці проектування, оптимальна висота встановлення кільцевого ребра на резервуарі ємністю 5 тис. м³ висотою 12,0 м визначалась із умови рівності стійкості верхньої і нижньої оболонки під дією зовнішнього тиску. При цьому припускали, що кільце утворює жорсткий диск. На рис. 3 представлені графіки стійкості для кожної із частин оболонки, висоти яких приймалися у залежності від висоти встановлення кільцевого ребра. Значення критичних навантажень від дії

зовнішнього тиску визначались за формулами [7]. Точка перетину кривих яка відповідає висоті встановлення кільця $H = 7,5$ м (рис. 2), вказує на рівності стійкості обох частин. З метою перевірки зазначеного вище припущення,

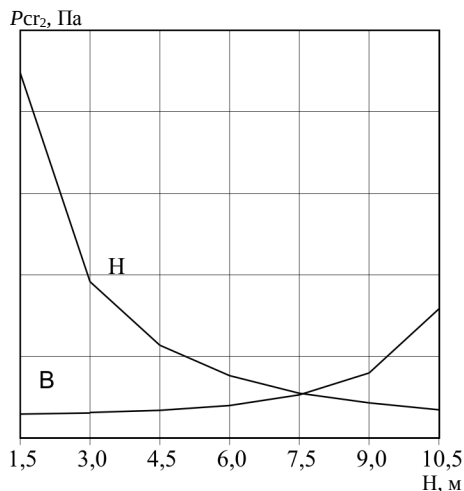


Рис. 3. До визначення оптимальної висоти встановлення кільця жорсткості

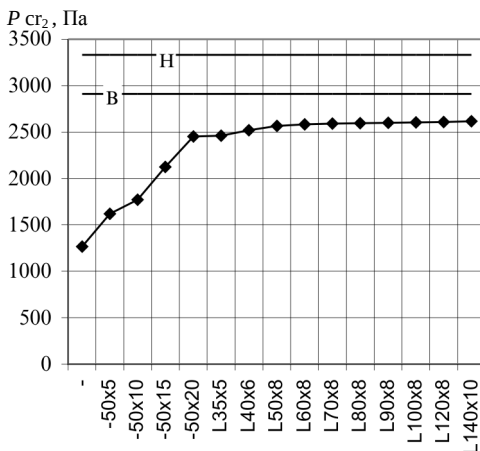


Рис. 4. Стійкість підсиленої

досліджувалась стійкість скінченноелементної моделі оболонки при дії зовнішнього рівномірного тиску в залежності від жорсткості кільцевого ребра рис. 4. Верхні горизонтальні лінії "В" і "Н" відповідають критичному значенню навантаження, визначеному окремо для обох частин оболонки, нижня крива – для підкріпленої оболонки. Оболонка підкріплювалась жорстко з'єднаним із нею кільцевим ребром, що

знаходилося на відстані 120мм від зовнішньої поверхні стінки до осі. Жорсткість кільця змінювалась шляхом встановлення кутиків різного номеру прокату і смуг прямокутного перерізу. Згідно отриманих даних, досягнути ефекту повного розбиття навіть при значних жорсткостях кільця складно і не є раціональним, так як вже при незначній жорсткості кільця критичне навантаження P_{cr2} збільшується вдвічі. В разі підсилення стінки резервуарів зміною 2 і 5 тис. м³ достатньо встановлення кільця жорсткості 3600 моментом інерції $I = 106 \text{ см}^4$ (кутик L90x8) і, як видно, подальше збільшення жорсткості не призводить до якісних змін (рис. 4).

Під час експлуатації стінка резервуарів працює при двосторонньому навантаженні - вздовж твірної (власна вага, снігове навантаження і вакуум) та зовнішньому тиску (вітрове навантаження і вакуум). Тому при визначенні ефективного підсилення потоншеної оболонки, було досліджено її стійкість при дії кожного навантаження окремо, а також при одночасній дії обох навантажень.

Результатом впливу різних варіантів потоншення поясів на стійкість оболонок для різних випадків підсилення (рис. 2) при окремій дії кожного навантаження, приведені на графіках рис. 5 і 6 (а-є - схеми моделей оболонок згідно рис. 2 I-VIII, I-IV, V-VIII, VII-VIII - номери потоншених поясів. Буквами вказано схеми моделей згідно рис. 2, римськими цифрами - номери потоншених поясів. Графіки рис. 5 розділяються на дві групи, нижні - схеми а, г, д (без кільця жорсткості), верхні - б, е, є (підсилені кільцем з кутика L90x8).

Рис. 5. Залежність значення критичного бокового тиску від величини потоншення оболонки

Аналіз результатів виконаних досліджень показує, що оболонки підсилені кільцем жорсткості із потоншенням поясів на 1,25мм (верхні

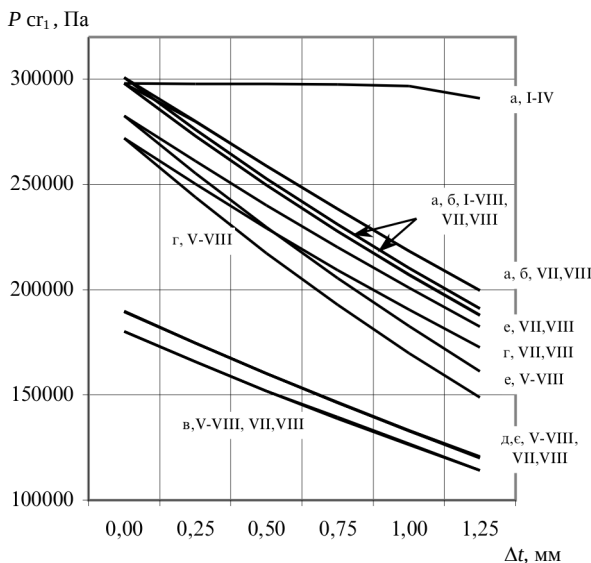


Рис. 6. Залежність значення критичного осьового тиску від величини потоншення оболонки

криві) мають значення критичного зовнішнього тиску, що відповідають оболонкам із проектними товщинами стінок без підсилення (нижні криві). Вплив поздовжніх ребер жорсткості на величину критичного бокового тиску є не значним (див. схеми б, I-VIII, V-VIII і схеми е, е, V-VIII, VII-VIII). Тому при зовнішньому тиску найефективнішим підсиленням для стінки резервуара ємністю 5 тис.м³ слід прийняти підсилення кільцем жорсткості встановленим на висоті 7,5м.

При розгляді стійкості оболонок при дії осьового навантаження (графіки рис. 6) спостерігається зменшення критичного навантаження в разі прикладання зусиль зосереджено (див.схеми в, V-VIII, VII-VIII і а, б I-VIII, VII-VIII). З'ясувалось, що підсилення тонких поясів оболонок шляхом подовження поздовжніх ребер із обпиранням їх на більш товсті пояси або кільце приводить до зменшення критичного осьового навантаження, яке по своєму значенню майже не відрізняється від значення критичного навантаження не підкріпленої оболонки (див. схеми "д", "е" і "в").

Найбільше критичне осьове навантаження мають оболонки завантажені рівномірно (схеми а, б, I-VIII, VII, VIII). Існуюче підкріплення поздовжніми ребрами довжиною 2,5м, практично компенсує негативний вплив зосередженості навантаження (для порівняння схеми “в” і “г”, “е”). Верхня крива рис. 6, підтверджує те, що стійкість оболонки і при осьовому навантаженні визначається при потоншенні нижніх поясів до 1мм стійкістю верхніх поясів. Отже для підсилення стінок резервуарів ємністю 2 і 5 тис.м³ при дії осьового нерівномірного навантаження стінок виправдовують себе поздовжні ребра довжиною 2,5м.

Було також перевірено такий підхід, за яким стійкість оболонки перемінної товщини при зовнішньому тиску визначається із приведенням товщини оболонки до середньої [2]. Для цього досліджувалася стійкість оболонки із потоншенням нижніх (схема а, I-IV), верхніх (схема а, V-VIII) і всіх поясів (схема а, I-VIII). Як видно із приведених даних, стійкість стінки визначається переважно стійкістю верхніх тонких поясів. В разі визначення критичного навантаження для стінки за зазначеним підходом при потоншених нижніх поясах воно визначається із деяким запасом. Результати досліджень стійкості циліндричної оболонки резервуара при дії довільного навантаження представлені на рис. 7. По вертикалі відкладали величини осьового навантаження, по горизонталі - зовнішнього тиску. Заштрихований прямокутник описує область можливих навантажень - осьового і зовнішнього. За межами кривих на графіку (праворуч) оболонка знаходиться у нестійкому стані. Відстані від т. А до кривих визначають запас стійкості. При потоншенні оболонок на 1,25 мм, як вказувалось вище, стійкість зменшується до 30%. Відповідно криві на графіку опускаються вниз і попадають у заштриховану зону. Останнє означає, що оболонки навіть при незначному потоншенні не відповідають проектній стійкості.

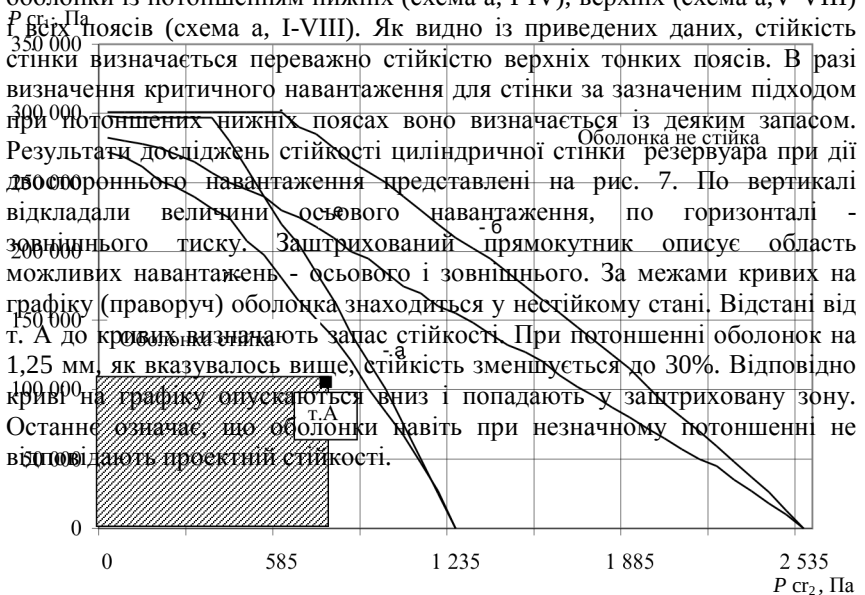


Рис. 7. Границі стійкості оболонок

Підсилення тільки вертикальними ребрами жорсткості циліндричної оболонки, що навантажена зосередженими силами (рис. 7,г), є недостатнім і для забезпечення стійкості необхідно додатково встановлювати кільце жорсткості (рис. 7,е). При цьому треба враховувати, що несуча спроможність підкріпленої оболонки в разі зосередженого навантаження буде нижчою ніж в разі її рівномірного навантаження (рис. 7, б, е).

Висновки.

1. При зосередженому прикладанні осьового навантаження несуча здатність циліндричної оболонки менша ніж при рівномірно розподіленому на 30%, що необхідно враховувати при розрахунку стінки резервуарів на стійкість.

2. Встановлення коротких поздовжніх ребер (2,5м) на верхніх поясах компенсує негативний вплив зосередженого осьового навантаження. При збільшенні довжини ребер несуча здатність оболонки зменшується.

3. Підкріплення стінки резервуарів шляхом установки кільця у поєднанні із існуючими поздовжніми ребрами жорсткості дозволяє відновити проектну стійкість оболонки.

1. *Гречаноская О.И.* Расчет и экспериментальная проверка устойчивости корпусов стальных резервуаров // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1963. - №12 – С.17-28.
2. *Лессиг Е.Н.* Листовые металлические конструкции. - М.: Издательство литературы по строительству 1970. – 487с.
3. *Сафарян М.К.* Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – 200с.
4. *Сафарян М.К., Иванцов О.М.* Проектирование и сооружение стальных резервуаров для нефтепродуктов. - М.: Гостоптехиздат, 1961. – 328с.
5. *Вольмир А.С.* Устойчивость упругих систем. - М.: Физматгиз, 1963. – 880с.
6. *Березин В.Л., Шутов В.Е.* Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов. -М.: Недра, 1973. - 200с.
7. Строительные нормы и правила. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. –96с.
8. Строительные нормы и правила. СНиП 2.09.03-85. Сооружение промышленных предприятий / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56с.
9. Ведомственные строительные нормы Украины. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов с давлением насыщенных паров не выше 93,3 кПа. Госкомнефтегаз. - Киев, 1994. – 98с.

Матеріал надійшов до редакції 03.09.04.