

УДК 539.3

Гоцуляк Є.О., д-р техн. наук
Лук'янченко О.О., канд. техн. наук
Костіна О.В., канд. техн. наук
Шах В.В.

СТІЙКІСТЬ СТІНОК ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПРИ КОМБІНОВАНОМУ НАВАНТАЖЕННІ З УРАХУВАННЯМ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ ФОРМИ

Розроблена методика дослідження стійкості циліндричних оболонок з урахуванням початкових недосконалостей. Розв'язані задачі нелінійної стійкості циліндричної оболонки, недосконалості прийняті із замірів реальних конструкцій.

Для повного опису загальних закономірностей напружено деформованого стану оболонок з параметрами, що залежать від багатьох факторів, апарат лінійних диференціальних рівнянь виявляється недостатнім, остільки в його рамки не вкладаються найбільш цікаві і характерні особливості нелінійних систем. До них відносяться не лише кількісна зміна параметрів системи в просторі, пов'язана із величиною початкових недосконалостей і способу прикладання навантаження, але й якісні зміни, що приводять до виникнення критичних станів, розгалуженню нових рішень і втраті стійкої рівноваги.

Математичні методи, що дозволяють досліджувати нелінійні диференціальні рівняння, надто складні і трудомісткі для дослідження складних нелінійних систем із багатоваріантними параметрами. В тих випадках, коли властивості оболонки і діюче на неї навантаження залежать від декількох факторів, оболонка може мати велику кількість критичних станів, розмірність яких на одиницю менше числа незалежно варійованих змінних. Проблема побудови таких різноманітностей у загальному випадку надзвичайно складна, тому в теорії диференціальних рівнянь вона часто замінюється задачею пошуку лише обмеженого об'єму інформації якісного характеру, що стосується питань аналізу кількісної зміни властивостей системи при варіюванні її параметрів.

Задачі нелінійної стійкості систем, які деформуються, в ряді випадків мають особливості, що полягають у чутливості до неправильної форми, нерівномірності прикладання навантаження, недоліках в технології виготовлення та в неоднорідності фізичних характеристик матеріалів. Наявність малих недосконалостей форми оболонки може значно понизити її критичне навантаження. Вказана особливість має велике практичне значення і тому дана робота націлена на дослідження впливу

початкових прогинів. Один із підходів вивчення запропонований Койгером і заключається в застосуванні асимптотичного аналізу, заснованого на загальній теорії закритичної поведінки. В даному випадку чуттєвість до недосконалостей описується як міра початкової післякритичної поведінки і визначення першого нульового коефіцієнта в степеневій залежності параметра навантаження від амплітуди форми втрати стійкості. Метод Койтера отримав широке поширення у розрахунковій практиці, але його використання накладає жорстке обмеження на величину недосконалості і її форму. Інший метод полягає в прямому аналізі нелінійного деформування оболонки із викривленою формою серединної поверхні на основі одного із сіткових методів дискретизації розв'язувальних співвідношень. Але такий спосіб не набув поширення до останніх часів через значні витрати машинного часу.

Розвитку нових ідей у розумінні нелінійної механіки в значній мірі допомогла поява комп'ютерів. Їх використання для нелінійного аналізу оболонок зараз досягло такого рівня, що дає можливість досліджувати глобальну поведінку тонкостінних систем, включаючи питання побудови в заданій області станів траєкторії навантаження, встановлення точок втрати стійкості і т. ін.

В той же час для задач практики необхідний аналіз різних типів недосконалостей у оболонках, які характеризуються не лише наявністю загального безперервного початкового фону недосконалостей обмеженої амплітуди, але й специфічними типами прогинів із середніми й великими амплітудами, які викликані технологічними причинами: виготовленням полотниць із листового прокату, їх зварюванням, монтажем приварюванням до них дискретних ребер, що мають свої недосконалості форми і т. ін.

В основу даної роботи покладено практичні задачі дослідження особливостей поведінки на різних стадіях навантаження з врахуванням фактичної геометрії таких тонкостінних конструкцій як стінки нафтоналивних резервуарів. Вказані оболонки мають великі геометричні розміри (діаметр до 60 м і висоту до 18 м і більше), тому натурні випробування на стійкість практично неможливі. Всі обмеження знімаються завдяки можливостям сучасних програмних комплексів, що дозволяють побудувати моделі по фактичній геометрії, задати відповідні граничні умови, прикласти різноманітні навантаження та отримати задовільні результати для практики.

Початкові недосконалості оболонок є фактичними відхиленнями твірних стінок резервуарів від вертикалі, які отримані в результаті польових досліджень, тобто є відхиленнями поверхні від ідеальної.

Відхилення дані для точок перетину твірних із горизонтальними границями поясів оболонки.

Розрахункові моделі оболонок створені в скінченноелементному програмному комплексі із використанням сплайн-кривих, що будуються по вихідним точкам твірних оболонок в циліндричній системі координат. Для цього вихідні відхилення твірних додаються до відповідних координат ідеальної поверхні і по зміненим координатам будуються сплайн-криві, а потім сплайнові поверхні. На основі моделі оболонки із недосконалою геометрією будується трикутна скінченноелементна сітка, при цьому кількість вузлів моделі набагато перевищує кількість вихідних точок твірних оболонок. В результаті формується нейтральний файл, що містить геометрію оболонки і блок з координатами вузлів скінченноелементної моделі в декартовій системі координат.

Значення відхилень малі у порівнянні із розмірами оболонки до того ж у обчислювальному комплексі не передбачений масштабний множник для їх візуалізації. Тому виникла необхідність створити програму, що дозволяє вводити масштабний множник для візуалізації відхилень твірних оболонок. Для візуалізації фактичних недосконалостей оболонки створена спеціальна програма, що дозволяє радіальні відхилення усіх точок твірних оболонок представляти у визначеному масштабі і перетворювати їх у відхилення вузлів скінченноелементної моделі в декартовій системі координат. Програма написана на мові ФОРТРАН99 і орієнтована на скінченноелементний комплекс. В результаті створений новий нейтральний файл із оновленим блоком координат вузлів моделі оболонки з урахуванням обраного масштабу відхилень.

Запропонований підхід реалізований на прикладі дослідження стійкості чотирьох резервуарів об'ємом 20000 кубічних метрів із розмірами $R_{cp}=19.98$ м, $H=17.9$ м, та товщиною стінки 15-7мм. Стінки мають специфічні відхилення від ідеальної циліндричної форми, що виникли в результаті виготовлення способом рулонування, під час транспортування та монтажу рулонів. Крім того початкові відхилення могли набути нових форм за період експлуатації, під час аварій, гідроударів, ремонтів тощо. Отже оболонки з наведеними вище параметрами мають змінну товщину стінки по висоті і мають реальні початкові недосконалості, отримані з результатів теодолітної зйомки.

Основні задачі дослідження полягали у визначенні критичних значень осьового стиснення та бокового тиску окремо для кожного навантаження та при їх сумісній дії для оболонки, що має недосконалості форми, відслідкувати процес втрати стійкості оболонки на різних етапах. Далі наведені результати на прикладі оболонки резервуара РВС №6С.

На рис. 1 а, б представлена отримана скінченноелементна модель оболонки резервуара в різних площинах, як приклад візуалізації фактичних недосконалостей моделі.

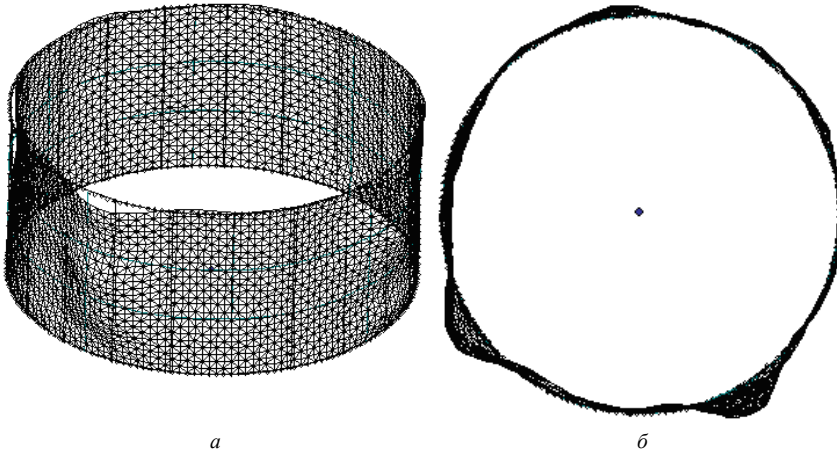


Рис. 1. Скінченноелементна модель оболонки, що побудована на основі фактичної геометрії стінок резервуарів: а) вид збоку; б) вид зверху

Дослідження оболонки під дією бокового тиску базується на використанні процедури обчислювального комплексу розв'язання нелінійної задачі статики. Будуються криві навантаження недосконалої оболонки резервуара для двох точок, в яких на різних стадіях навантаження спостерігаються максимальні переміщення та визначається значення коефіцієнта критичного навантаження. Таким чином, недосконала оболонка резервуара втрачає стійкість при $\beta_{кр}=0.744$ (рис. 2).

На рис. 3 показані форми деформування оболонки резервуара на різних стадіях навантаження. Максимальні еквівалентні напруження із зовнішньої сторони оболонки (Plate Top VonMises Stress) при боковому тиску $q=0.05q_{кр}^0$ і $q=0.45q_{кр}^0$ спостерігаються в 3558 елементі і становлять 0.685МПа і 6.531МПа відповідно; при $q=0.744q_{кр}^0$ - в 3555 елементі і становлять 40.894МПа; при $q_{кр}=0.744q_{кр}^0$ - в 2722 елементі і становлять 65.658МПа. Максимальні еквівалентні напруження, що виникли при дії бокового тиску на оболонку резервуара, значно нижче розрахункового опору сталі $R_y=240$ МПа.

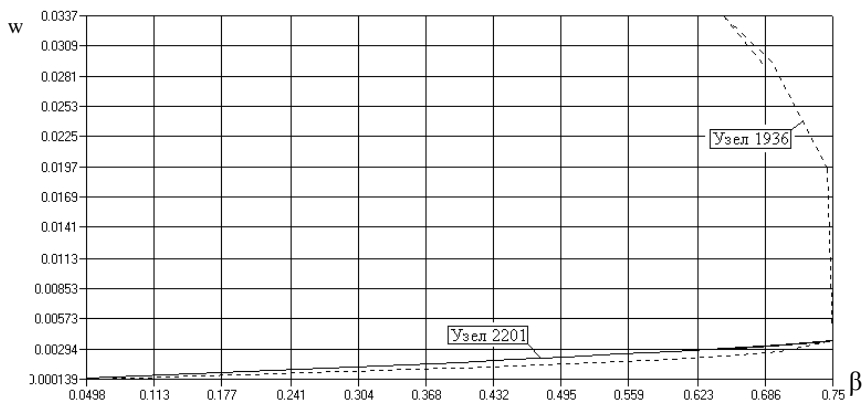
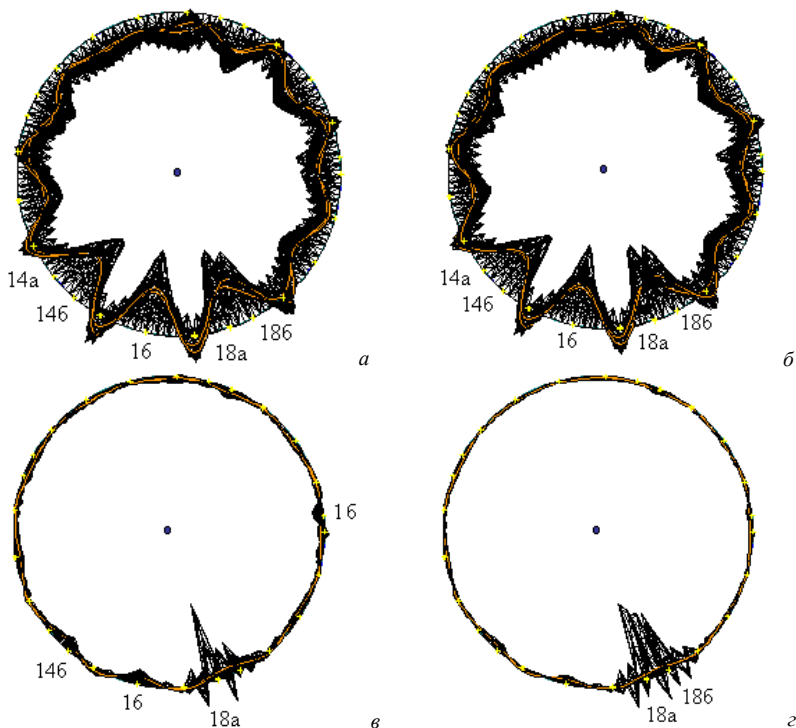


Рис. 2. Криві навантаження боковим тиском недосконалої оболонки резервуара

Рис. 3. Деформування недосконалої оболонки від бокового тиску на різних стадіях навантаження а) $q = 0.05q_{кр}^0$; б) $q = 0.45q_{кр}^0$; в) $q = 0.744q_{кр}^0$; г) $q_{кр} = -0.684q_{кр}^0$

Нижче наведені результати дослідження стійкості недосконалої оболонки резервуара при осьовому стисненні. Використовуючи процедуру розв'язання нелінійної задачі статички обчислювального комплексу скінченноелементного аналізу, будуються криві навантаження недосконалої оболонки резервуара для трьох точок, в яких на різних стадіях навантаження спостерігаються максимальні переміщення і визначається значення коефіцієнта критичного навантаження. Таким чином, недосконала оболонка резервуара втрачає стійкість при $\beta_{кр}=0.350$ (рис. 4).

На рис. 5 показані форми деформування оболонки резервуара на різних стадіях навантаження осьовим навантаженням. Максимальні еквівалентні напруження із зовнішньої сторони оболонки (Plate Top VonMises Stress) при осьовому стисненні $P=0.05P_{кр}^0$ і $P=0.35P_{кр}^0$ спостерігаються в елементі 5680 і відповідно становлять 3.144МПа та 22.384МПа; при $P=0.426P_{кр}^0$ і $P_{кр} =0.386P_{кр}^0$ - в елементі 4028 та відповідно становлять 151.647МПа і 139.736МПа. Максимальні еквівалентні напруження, що виникають при дії осьового стиснення на різних стадіях навантаження, нижче розрахункового опору сталі $R_y=240$ МПа.

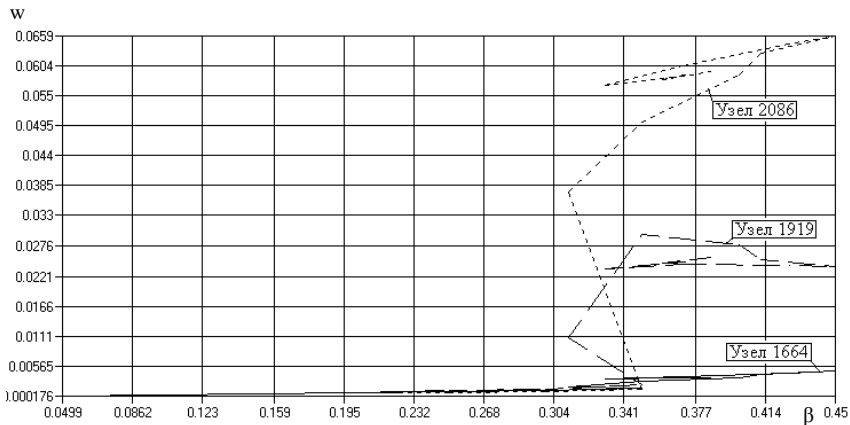


Рис. 4. Криві навантаження осьовим стисненням недосконалої оболонки резервуара

Дослідження стійкості циліндричних оболонок при комбінованій дії осьового стиснення і бокового тиску має особливий інтерес, так як подібне сполучення навантаження характерне для резервуарних конструкцій.

Комбіноване навантаження задається у вигляді $[\alpha P_{кр}^0; (1-\alpha)q_{кр}^0]$, де α - безрозмірний коефіцієнт, який приймає значення від 0 до 1 з кроком 0.1;

$P_{кр}^0$ і $q_{кр}^0$ - критичні значення осьового стиснення і бокового тиску відповідно при їх окремії дії на досконалу оболонку резервуара.

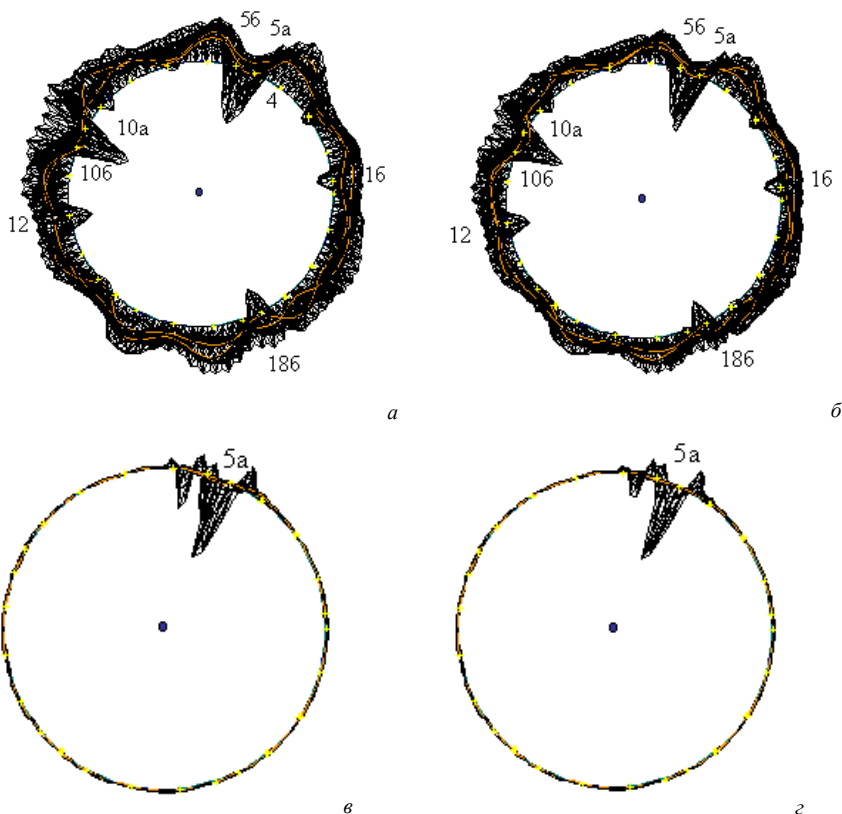


Рис. 5 Форми деформування недосконалої оболонки від дії осьового стиснення

а) $P=0.05P_{кр}^0$; б) $P=0.35P_{кр}^0$; в) $P=0.426P_{кр}^0$; г) $P_{кр}=0.386P_{кр}^0$

В результаті розв'язання нелінійної задачі статки визначається коефіцієнт критичного комбінованого навантаження $\beta_{кр}^0$, що дозволяє визначати критичні значення осьового стиснення і бокового тиску при їх сумісній дії на досконалу і недосконалу оболонку по формулі:

$$P_{кр}^0 = \beta_{кр}^0 \alpha P_{кр}^0, \quad q_{кр}^0 = \beta_{кр}^0 (1 - \alpha) q_{кр}^0.$$

Значення коефіцієнта критичного навантаження $\beta_{кр}^0$ було визначено при трьох сполученнях навантажень $\beta_{кр}^0 [0.3P_{кр}^0; 0.7q_{кр}^0]$, $\beta_{кр}^0 [0.5P_{кр}^0; 0.5q_{кр}^0]$, $\beta_{кр}^0 [0.8P_{кр}^0; 0.2q_{кр}^0]$.

Таким чином, для чотирьох резервуарів визначені граничні значення напружено-деформованих станів і побудовані діаграми стійкості, встановлені діапазони навантажень, в яких реалізуються умови забезпечення загальної стійкості при дії комбінованого навантаження від сумісної дії бокового тиску і осьового стиснення. В результаті отримані області стійкості оболонки, що обмежені кривими стану рівноваги і осями координат. Визначені крайні границі областей стійкості недосконалих оболонок резервуарів, які порівнюються з границями областей можливих комбінацій бокового тиску і вертикального навантаження (рис. 6 та 7).

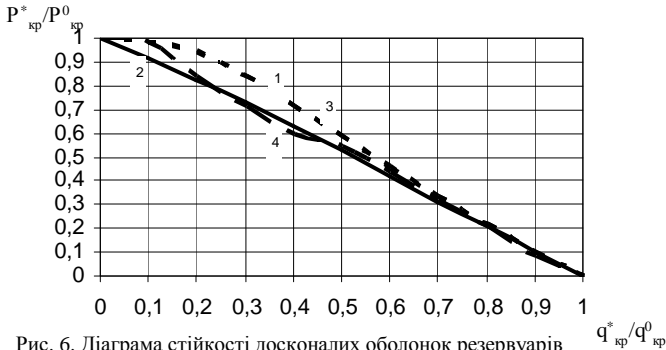


Рис. 6. Діаграма стійкості досконалих оболонок резервуарів при дії комбінованого навантаження
1-РВС №2; 2-РВС №6А; 3-РВС №1, 4-РВС №6С

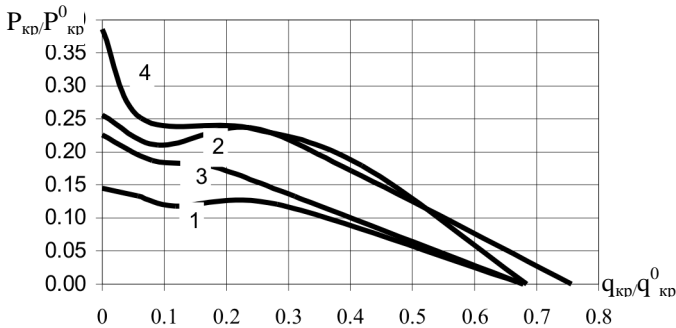


Рис. 7. Діаграма стійкості недосконалих оболонок резервуарів при дії комбінованого навантаження
1-РВС №2; 2-РВС №6А; 3-РВС №1, 4-РВС №6С

Для перевірки надійності отриманих результатів (рис. 7), можна використовувати теоретичні формули [2] та формули для практичних розрахунків [14]. $\sigma_{cr1}=cEt/r$, $\sigma_{cr2}=KE(r/l)(t/r)^{3/2}$ - критичне напруження в

оболонці від дії рівномірного стиснення паралельно твірним і відповідно при зовнішньому рівномірному тиску; де r – радіус оболонки; t – товщина оболонки; l – висота оболонки; c і K - коефіцієнти.

Відмінність між теоретичними і практичними формулами полягає лише у коефіцієнтах c і K , що відповідно дорівнюють $c_T=0.05$, $K_T=0.92$ і $c_n=0.06$ і $K_n=0.55$. Стівідношення між цими коефіцієнтами визначають стівідношення між критичними напруженнями, а отже і критичними навантаженнями. $c_T/c_n=0.1$ і $K_T/K_n=0.6$, згідно рис. 7 $P_{кр}/P_{кр}^0=0.148$ та $q_{кр}/q_{кр}^0=0.68$ (крива 1), що підтверджує надійність отриманих результатів.

Слід відмітити, що задані недосконалості значно перевищують початковий фон. Тому при їх відсутності поведінка конструкції визначається характером і типом початкового фону і потребує трудомістких загальноприйнятих методів аналізу. Зокрема, при наявності специфічних недосконалостей із значними відхиленнями від ідеальної поверхні (характерно для стінок резервуарів), вплив початкового фону може бути послаблено і навіть подавлено, що спрощує поставлену задачу. Таким чином, виділення специфічних зон, що потребують окремої уваги дозволяє в деяких випадках знехтувати наявністю фону із обмеженою величиною прогинів. Такий підхід підкріплений теоретичними і експериментальними передумовами [10-12]. В такому випадку процес втрати стійкості може бути представлений наступним чином. Починається він із поступового розвитку докритичних деформацій по всій поверхні оболонки, які порівняно менші ніж зони із найбільшими відхиленнями. Перша докритична фаза досить стійка і тривала у часі. Початкові прогини можуть не лише залишатися без змін, а й трансформуватися у нові форми або може відбуватися процес злиття із утворенням геометрично більших недосконалостей. Ці зони і визначають в першу чергу несучу здатність оболонки. У закритичній стадії максимальні деформації відбуваються у вказаних зонах. Вищенаведені особливості деформування оболонок на різних етапах вичерпування несучої здатності можна відслідкувати за рис. 2-5.

На основі проведеного дослідження можна зробити висновок про забезпечення загальної стійкості стінок циліндричних оболонок та уточнити допустимі величини відхилень твірних від вертикалі. Розроблена методика, яка реалізована в алгоритмі та сучасному програмному комплексі у вигляді надбудови, дає можливість задавати реально вимірні недосконалості середньої поверхні оболонки, отримувати результати задовільні для практичних цілей і може бути запропонована для оцінки стійкості оболонок циліндричних резервуарів та пропонування заходів з підвищення їх стійкості.

1. *Арбош И.* Влияние начальных прогибов на устойчивость оболочек // Тонкостенные оболочечные конструкции. – М.: Машиностроение, 1980. – С.222-259.
2. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984с.
3. *Тимошенко С.П.* Устойчивость стержней, пластин и оболочек – М.: Наука, 1971. – 807с.
4. *Доннелл Л.Г., Ван К.* Влияние неправильностей в форме на устойчивость стержней и тонкостенных цилиндров при осевом сжатии // Механика. Сб. перев. и обз. иностр. период. лит.-ры. – 1951. – №408, С.91 – 107.
5. *Койтер В.Т.* Устойчивость и закритическое поведение упругих систем // Механика: Сб. перев. иностр. статей. – 1960. – №5, С.99 – 110.
6. *Гоцуляк Е.А., Прусов Д.Э., Аранчий Н.Е.* Об устойчивости геометрически несовершенных оболочек общего вида // Прикладная механика: Междунар. науч. журнал. – 2000. – Т.36. – № 11. – С. 82–87.
7. *Гоцуляк Е.А., Аранчий Н.Е., Костина Е.В.* Криволинейный конечный элемент в теории тонких оболочек произвольной конфигурации // Сборник трудов Международного симпозиума по проблемам тонкостенных пространственных систем.-Грузия, Тбилиси, 4-5 июля, 2001.-С.58-64.
8. *Є.О.Гоцуляк, А.Ю.Барвінко* Определение величины допустимых отклонений геометрической формы вставок при замене совмещенного в одну линию вертикального монтажного соединения стенки на соединение с разбежкой вертикальных сварных швов по поясам // Автомат. сварка–2003, №3.– С.36-40.
9. *Є.О.Гоцуляк, А.Ю.Барвінко, В.В.Шах* Стійкість стінок вертикальних сталевих резервуарів, підкріплених ребрами жорсткості // Металлические конструкции. Взгляд в прошлое и будущее. Сборник докладов. Ч.1. Изд-во “Сталь”, 2004 – С. 444-450.
10. *Гавриленко Г.Д., Ситник А.С.* Устойчивость ребристых оболочек с локальными вмятинами // Прик. механика. – 1985 . – 21, №11. – С.128-130.
11. *Гавриленко Г.Д.* Устойчивость и несущая способность гладких и ребристых оболочек с локальными вмятинами // Прик. механика. – 2004 . – 40, №9. – С.35-64.
12. *Гавриленко Г.Д.* Численный и аналитический подходы к исследованию несущей способности несовершенных оболочек // Прик. механика. – 2003. – 39, №9. – С.44-62.
13. *Гоцуляк Е.А., Заблоцкий С.В.* К исследованию устойчивости оболочек с несовершенствами // Прик. механика. – 1990 . – 26, №4. – С.49-55.
14. Строительные нормы и правила. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. –96с.

Надійшло до редакції 29.11.2006 р.