

## АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ГІДРОПРУЖНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ЗОВНІШНЬОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Штефан Н.І., Телестакова В.В.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Робота присвячена аналізу чисельних експериментів розрахунку гідропружних систем при імпульсному навантаженні, враховуючи можливість виникнення кавітації. Неврахування руйнування рідини призводить до значних помилок у визначенні прогинів і принципово неправдивої картини розподілу тиску в рідині.

**Ключові слова:** динаміка, гідропружні системи, ідеальна рідина, руйнівна рідина, бульбашкова рідина.

**Постановка задачі.** Дана робота є логічним продовженням статті [1], в якій на прикладі конструкції, що складається з двох співвісних циліндричних оболонок, які взаємодіють за допомогою рідини (рис. 1), ставилося питання про дослідження впливу руйнування рідини і динаміки бульбашок газу, що знаходяться в рідині (бульбашкової рідини) на деформування конструкції під дією зовнішнього імпульсного навантаження. Була проведена фізична та математична постановка цієї проблеми.

Деякі питання щодо впливу динаміки бульбашок газу, які перебувають в рідині, що полягає в спільному розв'язанні хвильового рівняння і рівняння Релея, визначені автором цієї роботи, розглянуті в [2].

Нагадаємо, що поведінку рідкого середовища було розглянуто в рамках трьох моделей: ідеально пружної, руйнівної (кавітуючої) та бульбашкової рідини [3-5]. При описі моделі ідеально пружної рідини були прийняті допущення про неруйнівність рідкого середовища і відсутність в ній ушкоджень у вигляді бульбашок газу. При цьому рух рідини вважався потенційним.

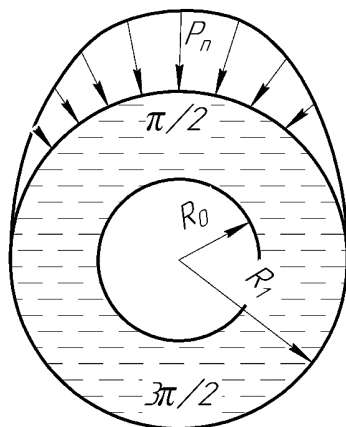


Рис. 1. Досліджувана конструкція

При розв'язанні задач гідропружності [5; 6] час здійснення кавітації, як правило, великий і можна записати вирази, які детально розглянуті в [1]. Зазвичай зруйноване в зонах кавітації рідке середовище розглядається як суцільне. Тому для неї залишається справедливим рівняння (2) з [1], записане для кавітуючої рідини.

Математичне формулювання даної задачі гідропружності полягає в використанні рівнянь руху

конструкції та рідини; контактної взаємодії рідини і конструкції (граничних умов). Для опису руху коаксіальних пружних циліндрів використані лінійні рівняння моментної теорії оболонок, записані в переміщеннях. Контактні умови на поверхні рідина-конструкція відповідають умовам непротікання і рівності тиску ідеальної рідини навантаженню, спрямованому по нормалі до конструкції.

**Виклад основного матеріалу. Аналіз результатів чисельних експериментів.** В якості апарату чисельного моделювання використаний метод кінцевих різниць. Чисельне моделювання ґрунтувалося на застосуванні рівнянь ідеально пружної рідини при визначенні границь нестационарних зон. На початку кожного кроку інтегрування середовища в зонах кавітації ставилася у відповідність ідеально пружна рідина з параметрами кавітуючої рідини. Після цього за рівнянням ідеально пружної рідини обчислювався тиск у всьому об'ємі рідини. Зони, в яких за розрахунком  $p \leq p_c$  вважалися зонами кавітації досліджуваної (реальної) рідини. Так визначалося нове положення границь кавітаційних зон. Усередині цих границь параметри визначалися за рівняннями кавітуючого середовища. Таким чином відшукувалися границі кавітації на кожному кроці інтегрування задачі.

Нагадаємо, що алгоритм розв'язання задачі взаємодії пружної конструкції з бульбашковою рідиною полягає в наступному [1]:

1. Знаходимо значення об'єму бульбашки.
2. Визначаємо потенціал швидкості з урахуванням об'єму бульбашки.
3. Обчислюємо прогини оболонок.
4. Знаходимо потенціал швидкості на границях.

Послідовність етапів 1-4 утворює обчислювальний цикл, в процесі виконання якого враховується динаміка бульбашок газу в рідині, яка взаємодіє з конструкцією.

Отже, для сформульованої в [1] крайової задачі гідропружності проводилися серії чисельних експериментів, після чого були проаналізовані їх результати. Для співвісних циліндричних оболонок розрахунки проводилися для зовнішньої оболонки товщиною 0,3 см і радіусом 100 см, для внутрішньої – товщиною 0,5 см і радіусом 50 см, виконаних зі сталі. Амплітуда імпульсного навантаження  $P_n$  покладалася рівною 1 і 5 МПа, тривалість якої  $\tau = 2,6 \cdot 10^{-4}$  с. Було вивчено вплив урахування можливого руйнування рідини на деформування співвісних циліндричних оболонок

при використанні в розрахунку моделей ідеально-пружної та кавітуючої рідини для  $A = 1$  МПа.

Так, зміна прогинів центральних точок зовнішньої і внутрішньої оболонок у часі з урахуванням зміщення тіла як абсолютно жорсткого, істотно відрізняється при використанні різних моделей рідини. На рис. 2 показано, що крива 1, отримана при використанні моделі кавітуючої рідини кардинально відрізняється від кривої 2, отриманої за моделлю ідеально-пружної рідини. Крива 3 відповідає випадку бульбашкової рідини. Це має місце як для зовнішньої, так і для внутрішньої оболонок.

На рис. 3 представлені зміни прогинів тих же точок оболонок в часі, але вже без урахування

зміщення тіла як абсолютно жорсткого. Тут крива 1 отримана при використанні моделі кавітації, 2 – по ідеально пружній, а 3 – бульбашкової рідини. Криві зміни тиску по стовпу рідини між оболонками наведені на рис. 3. Отримана істотна відмінність кривих 1', 2', 3', побудованих при використанні моделі руйнівної рідини від кривих 1, 2, 3, отриманих при використанні моделі ідеально-пружної рідини. Тут криві 1'', 2'', 3'' відповідають випадку бульбашкової рідини.

Для співвісних циліндричних оболонок, що взаємодіють за допомогою рідини, проведені чисельні експерименти і при амплітуді імпульсного навантаження  $A = 5$  МПа.

На рис. 4 і рис. 5 для вказаного значення  $A$  представлені зміни прогинів центральних точок оболонок у часі з урахуванням зміщення тіла як абсолютно жорсткого (рис. 4) і без урахування такого (рис. 5). Видно, що крива 1, отримана з використанням моделі ідеально-пружної рідини, крива 2, отримана за моделлю руйнівної рідини, а також крива 3, що отримана з використанням моделі бульбашкової рідини, аналогічні кривим, отриманим з використанням цих же моделей для значення амплітуди  $A = 1$  МПа. Це дає можливість зробити певні висновки. У досить широкому діапазоні значень амплітуди діючого імпульсного навантаження вплив кавітації, що виникає, на деформування оболонок суттєве, що вказує на те, що розрахунки в таких випадках необхідно проводити по моделі, що враховує явище кавітації.

Також з аналізу графіків, представлених на рис. 2, 3 та рис. 5, 6 можна зробити висновок, що при зростанні амплітуди зовнішнього навантаження збільшується вплив кавітації на величину максимального прогину оболонок. Так, при  $A = 1$  МПа для зовнішньої оболонки воно становить 20%, а для внутрішнього – 30%, а при  $A = 5$  МПа для зовнішньої – 32%, а для внутрішньої – 45%.

**Висновки з проведеного дослідження та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі.** Всі експериментальні дослідження вказують на те, що при розрахунку гідропружних систем при імпульсному навантаженні необхідно враховувати можливість виникнення кавітації. Неврахування руйнування рідини призводить до зна-

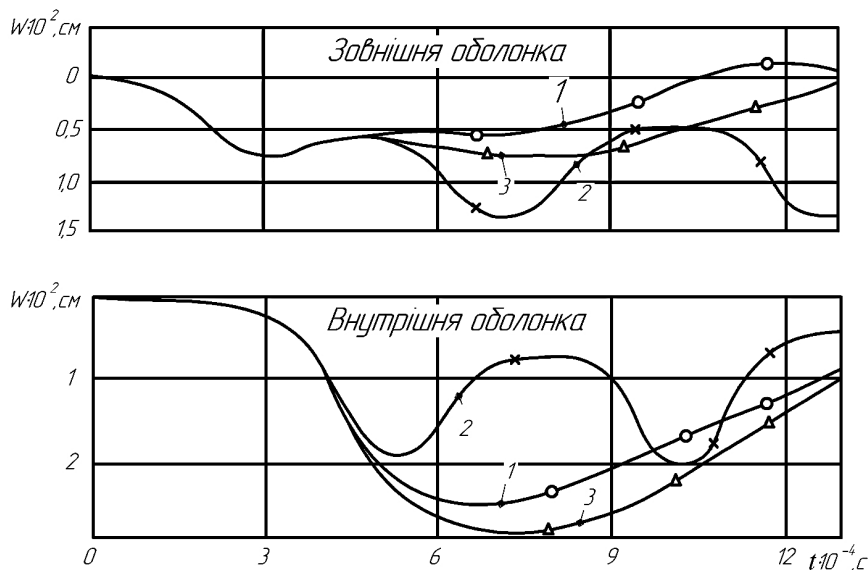


Рис. 2. Прогини центральних точок зовнішньої і внутрішньої оболонок

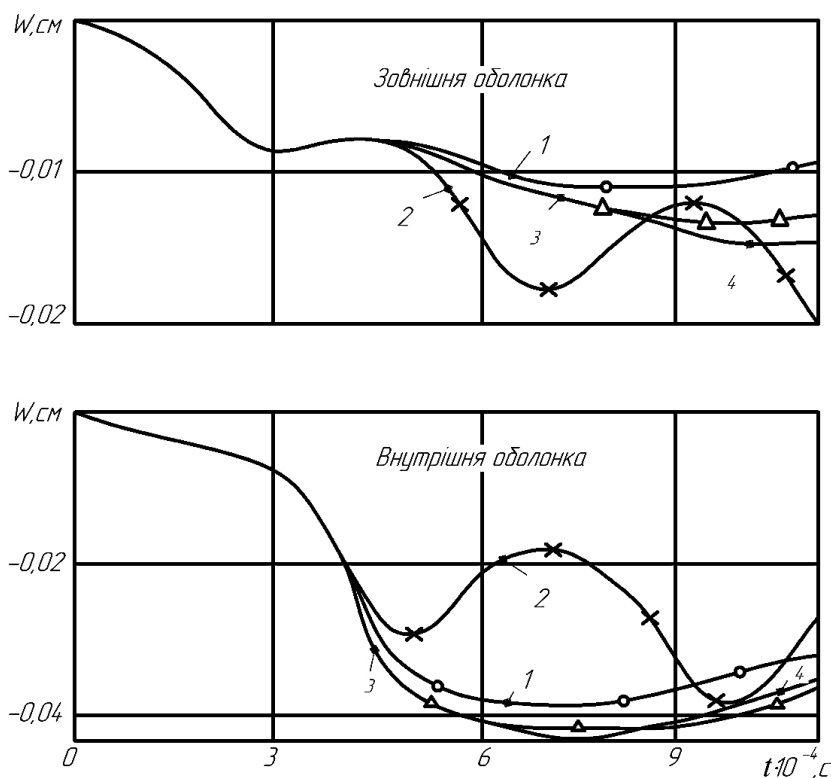


Рис. 3. Прогини центральних точок оболонок точок оболонок без урахування зміщення тіла як абсолютно жорсткого

чних помилок у визначенні прогинів і принципово неправдивої картини розподілу тиску в рідині.

Подальше дослідження сформульованої математичної постановки задачі [1] з динаміки нестационарної взаємодії конструкції, яка складається

з двох коаксіальних циліндрів з бульбашковою рідиною, полягає у вивченні впливу динаміки бульбашок газу, які перебувають в рідині, що зводиться до спільного розв'язання хвильового рівняння і рівняння Релея. Це знайде своє відображення в подальших публікаціях.

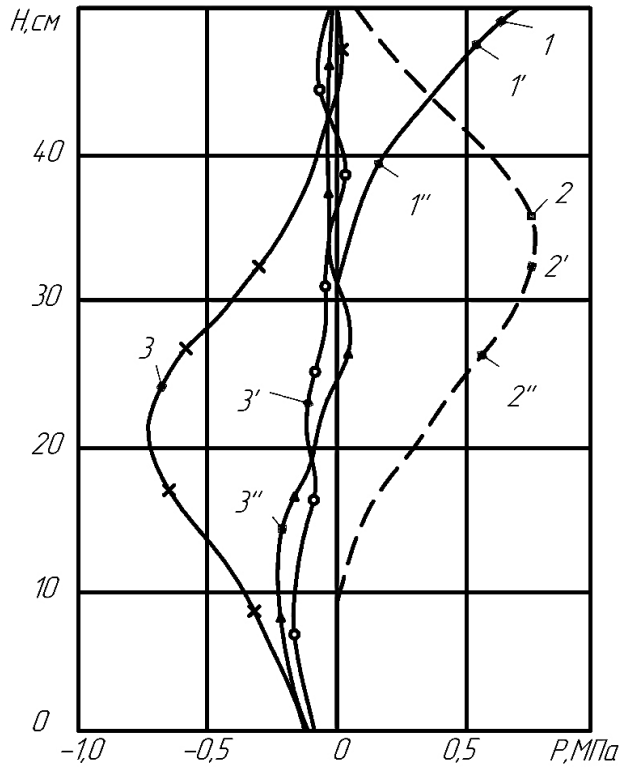


Рис. 4. Зміна тиску по рідині між оболонками

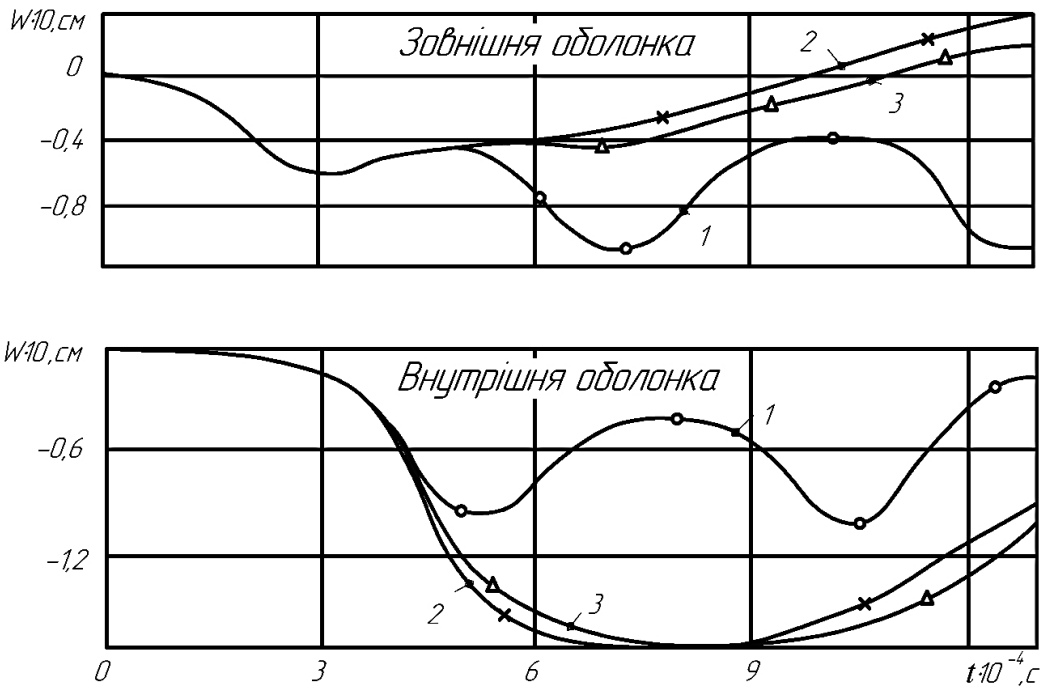


Рис. 5. Зміна прогинів центральних точок оболонок з урахуванням абсолютної жорсткості тіла

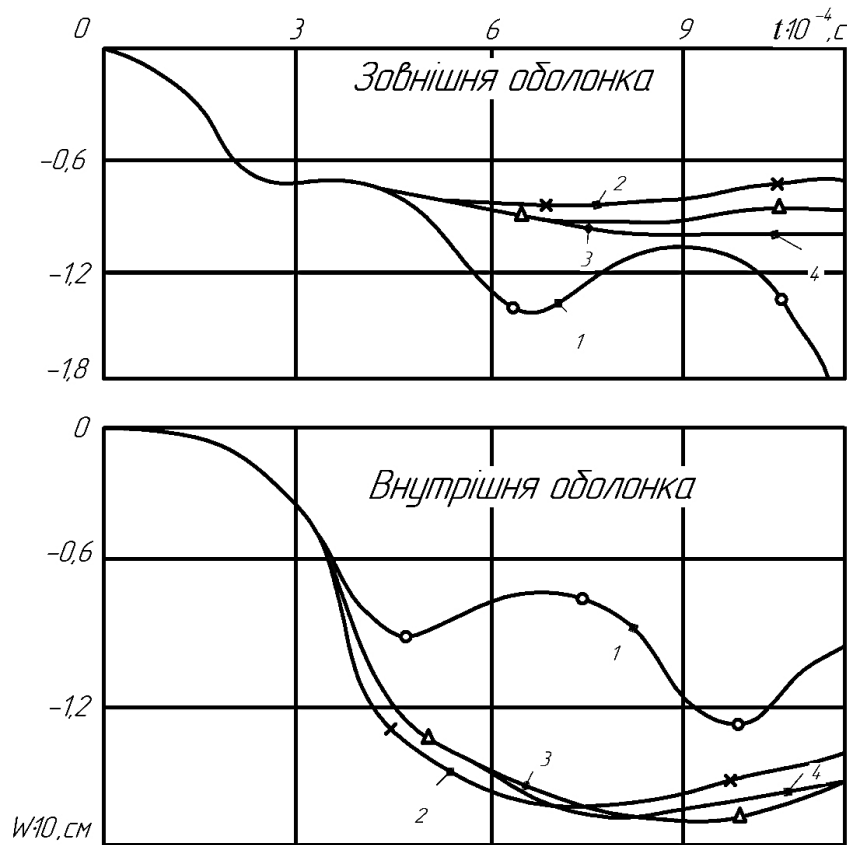


Рис. 6. Зміна прогинів центральних точок оболонок без урахування абсолютної жорсткості тіла (1 – ідеально-пружна рідина, 2 – руйнівна, 3 та 4 – бульбашкова)

### Список літератури:

1. Штефан Н.І., Телестакова В.В. // Динаміка співвісних циліндричних оболонок, заповнених бульбашковою рідиною / «Молодий вчений», 2018, №1(53), с. 578-580. Url: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2018/1/136.pdf>.
2. Штефан Н.І. // Исследование динамического поведения пузырька газа, находящегося в жидкости // 82 международная научно-техническая конференция, Беларусь, БГТУ, Минск, 2018.
3. Галиев Ш.У. Нелинейные волны различной физико-механической природы в ограниченной сплошной среде // Пробл. прочности. 1985. № 12. С. 3-14.
4. Галиев Ш.У. Кавитационные резонансные колебания жидкости в деформируемых трубопроводах и резервуарах. К., 1983. 63 с. (АН УССР. Ин-т пробл. прочност, 23-83).
5. Jones A.V. Cavitation effects in LMFBR containment loading-sensitivity study // Proc. 6th SMIRT conf. Paris, 2015. P. 127-149.
6. Галиев Ш.У. Динамика гидроупругопластических систем. К., 1981, 276 с.

**Штефан Н.І., Телестакова В.В.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГИДРОУПРУГОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВНЕШНЕМ НАГРУЖЕНИИ

### Аннотация

Работа посвящена анализу численных экспериментов расчета гидроупругих систем при импульсном нагружении. При этом рассматривается случай возможного возникновения кавитации. Показано, что неучет разрушения жидкости (возникновение кавитации) приводит к значительным ошибкам в определении деформаций соосных цилиндрических оболочек, между которыми находится жидкость. Также показано, что принципиально неправдивой в таком случае будет и картина распределения давления в жидкости.

**Ключевые слова:** динамика, гидроупругие системы, численные эксперименты, разрушаемая жидкость, пузырьковая жидкость.

**Shtefan N.I., Telestakova V.V.**

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## **ANALYSIS OF NUMERICAL EXPERIMENTS TO THE INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF THE HYDRAELASTIC SYSTEM UNDER IMPULSIVE EXTERNAL LOADING**

### **Summary**

The paper is devoted to the analysis of numerical experiments for the calculation of hydroelastic systems under pulsed loading. In this case, the case of possible occurrence of cavitation is considered. It is shown that ignoring the destruction of the liquid (the occurrence of cavitation) leads to significant errors in determining the deformation of coaxial cylindrical membranes, between which is the liquid. It is also shown that the principle of the falsehood in this case will be the pattern of pressure distribution in the liquid.

**Keywords:** dynamics, hydroelastic systems, numerical experiments, destructive liquid, bubble liquid.