

УДК 539.3

**В.А. Баженов**, д-р техн. наук**О.О. Лук'янченко**, канд. техн. наук**О.В. Костіна**, канд. техн. наук**О.В. Герашенко**, канд. техн. наук

## **ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЧАСТОТИ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ СКЛАДНОЇ ОБОЛОНКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Виконано математичне моделювання динаміки складної оболонкової конструкції при дії нерівномірно розподіленого навантаження від ваги рідини. Розрахункова дискретна динамічна модель конструкції побудована за допомогою методів скінченних елементів та можливих переміщень, які реалізовані в програмному комплексі NASTRAN. Виконано модальний аналіз навантаженої конструкції за допомогою методу Ланцоша. Оцінено вплив навантаження на власні коливання конструкції. Порівняні частоти та форми власних коливань конструкції при дії ваги рідини різного об'єму.

**Вступ.** Розвиток комп'ютерного моделювання на основі методу скінченних елементів обумовив інтенсивну розробку чисельних методів для розв'язання задач динаміки, стійкості, геометричної та фізичної нелінійності конструкцій, удосконалення скінченних елементів та програмних комплексів [1-4]. Можливість формувати модель конструкції, процеси навантаження та аналізувати поведінку конструкції мають існуючі програмні комплекси скінченноелементного аналізу: МИРАЖ, ЛІРА, SCAD, МОНОМАХ, ANSYS, Cosmos і т.п. Програмний комплекс MSC.NASTRAN [5], який застосований в роботі для дослідження динамічної поведінки складної оболонкової конструкції, відомий в сучасному світовому проектуванні будівельних об'єктів. За допомогою математичних методів теорії пружності та математичної фізики, які реалізовані в комплексі, відкриваються широкі можливості комп'ютерного моделювання різних динамічних процесів складних конструкцій. Динаміка оболонкових тонкостінних конструкцій, які є системами з нескінченим числом ступенів вільності, складна. Кількість частот власних коливань є нескінченим. Якщо відомий характер власних коливань конструкції, то можна говорити про її внутрішні властивості, які мають місце при зовнішніх динамічних впливах. Небезпечним для тонкостінних оболонкових конструкцій є поєднання статичних навантажень з різними типами динамічних навантажень. Тому важливо врахувати вплив статичного навантаження на частоти власних коливань конструкції. В роботі виконаний модальний аналіз складної оболонкової конструкції із врахуванням її напружено-деформованого стану, який отриманий за допомогою нелінійно-

го статичного розрахунку конструкції при дії навантаження, яке є нерівномірно розподіленим тиском від ваги рідини різного об'єму. Оцінено вплив навантаження на власні частоти коливань конструкції. Отримані результати дадуть змогу в подальшому дослідити поведінку складної оболонкової конструкції при різних динамічних впливах.

### **1. Розрахункова математична модель конструкції**

Складна оболонкова конструкція представляє собою систему двох циліндричних оболонок, які з'єднані трубопроводами. Внутрішня оболонка приймається висотою 5,96 м і діаметром 6,63 м, зовнішня – висотою 6,58 м і діаметром 6,96 м. Товщина стінок оболонок складає 5 мм. Обидві оболонки виготовлені зі сталі Ст.3пс.2. Труби, які з'єднують оболонки, мають довжину 0,16 м і діаметр 7,62 см. Розрахункова дискретна модель конструкції містить 2692 двомірних плоских скінчених елементів зі шістьма степенями вільності, кількість вузлів дорівнює 2575. Дві труби, що з'єднують оболонки, моделюються стержневими елементами. У вузлах нижньої кромки внутрішньої оболонки обмежені переміщення по твірній і радіусу, повороти навколо радіусу і дотичної. Вузли нижньої кромки зовнішньої оболонки жорстко закріплені.

### **2. Частоти власних коливань навантаженої конструкції**

Для визначення частот і форм власних коливань навантаженої складної оболонкової конструкції спочатку було виконано її нелінійний статичний розрахунок із використанням покрокового методу Ньютона-Рафсона. Потім за допомогою методу Ланцоша виконаний модальний аналіз навантаженої конструкції. У зв'язку зі щільним розташуванням частот власних коливань оболонкових конструкцій в роботі досліджувались перші 40-к форм та частот коливань при дії ваги рідини, яка займає 1/4, 1/2, 3/4 та 4/4 частину об'єму внутрішньої оболонки. В таблицях 1-4 представлені частоти власних коливань навантаженої конструкції, кількість хвиль вздовж кіл оболонок та твірної зовнішньої оболонки.

При дії ваги палива, що складає 1/4 частину внутрішньої оболонки, частоти навантаженої конструкції мають щільно розташовані значення і лежать в діапазоні від 15,1995 Гц до 29,1655 Гц. На цих частотах спостерігаються коливання як з регулярними так і нерегулярними деформаціями внутрішньої і зовнішньої оболонок одночасно, або коливання з деформаціями лише однієї з оболонок. Мають місце локальні деформації в місцях з'єднання оболонок. На власній частоті системи 18,4430 Гц вперше відбуваються коливання з регулярними деформаціями внутрішньої оболонки, зовнішня залишається незмінною. Власна частота ненавантаженої системи, при якій спостерігаються коливання лише внутрішньої оболонки, має менше значення і складає 15,8081 Гц [4]. Тобто, власна частота системи

збільшується за рахунок навантаження. Деформований стан при коливанні навантаженої внутрішньої оболонки відрізняється тим, що вздовж кола кількість півхвиль складає 11, а це на 1 півхвилю більше порівняно з деформацією оболонки без врахування навантаження. Вздовж твірної має місце одна півхвиля як для ненавантаженої так і навантаженої внутрішньої оболонки. На більш високих частотах 29,0792 Гц та 29,1655 Гц вздовж твірної зовнішньої оболонки спостерігаються дві півхвилі.

Таблиця 1

Частоти власних коливань конструкції при заповненні рідиною 1/4 частини внутрішньої оболонки					
№	Частота, Гц	Кількість хвиль (внутр./зовн./твірна зовн.)	№	Частота, Гц	Кількість хвиль (внутр./зовн./ твірна зовн.)
1	15,1995	-/9/1	21	20,5967	12/-/1
2	15,2250	-/*/1	22	20,6084	12/*/1
3	15,2540	-/10/1	23	21,1157	-/13/1
4	15,3947	*/*/1	24	21,1935	*/12/1
5	16,3930	-/11/1	25	21,4505	7/-/1
6	16,4206	*/*/1	26	21,4893	7/*/1
7	16,4505	-/8/1	27	23,5358	13/-/1
8	16,6137	*/-/1	28	23,5445	13/*/1
9	17,2726	*/12/1	29	23,9039	-/6/1
10	17,2813	*/-/1	30	23,9657	*/6/1
11	17,2815	*/-/1	31	24,4304	-/14/1
12	17,3124	*/-/1	32	24,5001	*/14/1
13	18,4024	-/12/1	33	25,7334	6/-/1
14	18,4430	11/12/1	34	25,7900	6/*/1
15	18,4515	11/*/1	35	27,1539	14/-/1
16	18,5029	9/12/1	36	27,1622	14/*/1
17	18,6361	8/-/1	37	28,2943	-/15/1
18	18,6658	8/*/1	38	28,3357	*/15/1
19	19,2327	-/7/1	39	29,0792	-/12/2
20	19,3299	*/7/1	40	29,1655	-/*/2

\* - нерегулярні деформації; - - деформації відсутні.

Таблиця 2

Частоти власних коливань конструкції при заповненні рідиною 1/2 частини внутрішньої оболонки					
№	Частота, $Gz$	Кількістьхвиль (внутр./зовн./ твірна зовн.)	№	Частота, $Gz$	Кількістьхвиль (внутр./зовн./ твірна зовн.)
1	15,1995	-/9/1	21	21,1157	-/13/1
2	15,2249	-*/1	22	21,1976	*/13/1
3	15,2540	-/10/1	23	22,6373	12/-/1
4	15,3964	*/*/1	24	22,6528	12*/1
5	16,3930	-/11/1	25	22,6788	7/-/1
6	16,4206	*/*/1	26	22,7078	7*/1
7	16,4505	-/8/1	27	23,9039	-/6/1
8	16,6216	*/*/1	28	23,9655	*/6/1
9	18,4024	-/12/1	29	24,4304	-/14/1
10	18,4839	*/12/1	30	24,5005	*/14/1
11	19,2179	9/-/1	31	25,3802	13/-/1
12	19,2213	9*/1	32	25,3978	13*/1
13	19,2327	-/7/1	33	26,6356	6/-/1
14	19,3227	*/7/1	34	26,6840	6*/1
15	19,4154	10*/1	35	28,2943	-/15/1
16	19,4458	10*/1	36	28,3352	*/15/1
17	20,2388	8/-/1	37	28,7867	14/-/1
18	20,2590	8*/1	38	28,7952	14*/1
19	20,6134	11/-/1	39	29,0323	-/12/2
20	20,6296	11*/1	40	29,1641	-/*/2

Власні частоти навантаженої конструкції при дії ваги палива, що складає 1/2 частину внутрішньої оболонки, також мають щільно розташовані значення і лежать в діапазоні від 15,1995  $Gz$  до 29,1641  $Gz$ . Коливання спостерігаються одночасно як з регулярними так і з нерегулярними деформаціями внутрішньої і зовнішньої оболонок, або з деформаціями лише однієї з оболонок. Локальні деформації стінок оболонок спостерігаються в місцях їх з'єднання. На власній частоті системи 19,2179  $Gz$  вперше деформується лише внутрішня оболонка, зовнішня залишається незмінною. Власна частота системи збільшується за рахунок навантаження. 9 півхвиль спостерігаються вздовж кола, вздовж твірної – одна півхвиля.

Таблиця 3

Частоти власних коливань конструкції при заповненні рідиною 3/4 частини внутрішньої оболонки					
№	Частота, Гц	Кількість хвиль (внутр./зовн./ твірна зовн.)	№	Частота, Гц	Кількість хвиль (внутр./зовн./твірна зовн.)
1	15,1995	-/9/1	21	25,4051	9/-/1
2	15,2250	-/*/1	22	25,1248	9/*/1
3	15,2540	-/10/1	23	25,9799	10/-/1
4	15,3977	*/*/1	24	25,9999	10/*/1
5	16,3930	-/11/1	25	26,2297	7/-/1
6	16,4206	-/*/1	26	26,2527	7/*/1
7	16,4505	-/8/1	27	27,4052	11/-/1
8	16,6249	-/*/1	28	27,4265	11/*/1
9	18,4024	-/12/1	29	28,2943	*/15/1
10	18,4873	*/12/1	30	28,3350	*/15/1
11	19,2327	-/7/1	31	29,0099	6/*/1
12	19,3255	-/*/1	32	29,0510	6/*/1
13	21,1157	-/13/1	33	29,0792	-/12/2
14	21,1939	*/13/1	34	29,1616	*/*/1
15	23,9039	-/6/1	35	29,2941	*/12/1
16	23,9617	*/6/1	36	29,3109	12/*/2
17	24,4304	-/14/1	37	29,3670	*/13/1
18	24,4953	*/14/1	38	29,5336	*/*/1
19	25,0497	8/-/1	39	30,1204	-/11/2
20	25,0655	8/*/1	40	30,2727	*/*/1

При дії ваги палива, що складає 3/4 частину внутрішньої оболонки, частоти навантаженої конструкції щільно розташовані в діапазоні від 15,1995 Гц до 30,2727 Гц. Власні коливання відбуваються з регулярними і нерегулярними деформаціями окремо внутрішньої і зовнішньої оболонок. В місцях кріплення патрубків спостерігаються локальні деформації стінок оболонок. Внутрішня оболонка вперше деформується на частоті 25,0497 Гц. Бачимо, що власна частота системи надалі збільшується за рахунок збільшення навантаження. Вздовж кола мають місце 8 півхвиль, вздовж твірної - 1 півхвиля.

Таблиця 4

Частоти власних коливань конструкції при повному заповненні рідиною внутрішньої оболонки					
№	Частота, Гц	Кількість хвиль (внутр./зовн./ твірна вн.)	№	Частота, Гц	Кількість хвиль (внутр./зовн./ твірна вн.)
1	15,1995	-/9/1	21	29,0793	-/24/2
2	15,2250	-*/1	22	29,1663	-*/2
3	15,2540	-/10/1	23	29,3670	-/27/2
4	15,3995	*/*/1	24	30,8376	-*/2
5	16,3930	-/11/1	25	30,8529	-/23/2
6	16,4206	-*/1	26	30,8613	*/*/2
7	16,4505	-/8/1	27	30,8376	7/-/1
8	16,6278	-*/1	28	30,8529	7*/1
9	18,4023	-/12/1	29	30,8613	-/28/2
10	18,4886	*/12/1	30	31,0184	-*/2
11	19,2327	-/7/1	31	31,1892	8/5/1
12	19,3275	-*/1	32	31,2373	/0/0/
13	21,1157	-/13/1	33	31,2625	8/-/1
14	21,1957	*/*/1	34	31,3060	8*/1
15	23,9038	-/6/1	35	32,0916	6*/1
16	23,9647	*/6/1	36	32,1282	6*/1
17	24,4304	-/14/1	37	32,6022	-/0/2
18	24,5006	-/14/1	38	32,6732	-*/1
19	28,2943	-/15/1	39	32,6884	-*/1
20	28,3352	*/15/1	40	32,7911	*/*/1

При повному заповненні паливом внутрішньої оболонки частоти навантаженої конструкції щільно розташовані в діапазоні від 15,1995 Гц до 32,7911 Гц. Мають місце коливання з регулярними і нерегулярними деформаціями внутрішньої і зовнішньої оболонок одночасно. Також спостерігаються деформації лише однієї з оболонок. Локальні деформації бачимо в місцях з'єднання оболонок. Внутрішня оболонка вперше деформується на частоті 30,8376 Гц. Власна частота системи знов збільшується за рахунок збільшення ваги рідини. На цій частоті вздовж кола мають місце 7 півхвиль, вздовж твірної - 1 півхвиля.

На рис. 1 представлені графіки, які показують зростання частот власних коливань оболонкової конструкції при дії ваги рідини, яка займає різний об'єм внутрішньої оболонки.

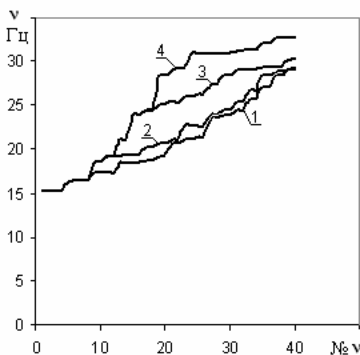


Рис. 1 Частоти власних коливань навантаженої складної конструкції (при заповненні рідиною 1 – 1/4, 2 – 1/2, 3 – 3/4, 4- 4/4 об'єму внутрішньої оболонки)

В табл. 4 наведені частоти власних коливань конструкції при дії різної ваги рідини, при яких вперше спостерігається деформація стінок внутрішньої оболонки або зовнішньої.

Модальний аналіз складної оболонкової конструкції показав, що при дії розподіленого навантаження на внутрішню оболонку конструкції, власна частота збільшується у 1,17-1,95 разів відповідно зі збільшенням ваги рідини. Це свідчить про те, що навантаження збільшує жорсткість системи, а при параметричних коливаннях може їх стабілізувати. Коливання констру-

кції, при яких вперше спостерігається деформація лише зовнішньої оболонки, відбуваються при дії різних об'ємів рідини на однаковій частоті 15,1995 Гц. Ця частота більше у 1,08 разів за частоту ненавантаженої конструкції.

Таблиця 4

Об'єм внутрішньої оболонки, що заповнений рідиною	Частоти власних коливань навантаженої конструкції, на якій вперше спостерігаються деформації оболонок	
	внутрішньої	зовнішньої
0	15,8081	14,0568
1/4	18,4430	15,1995
1/2	19,2179	15,1995
3/4	25,0497	15,1995
4/4	30,8376	15,1995

На рис. 2 представлені форми коливань складної оболонкової конструкції на частотах, що наведені в табл. 4.

Колівання складної конструкції з нерегулярними та локальними деформаціями зовнішньої оболонки, які відповідають 2-ій формі власних коливань конструкції при заповненні рідиною 1/2 об'єму внутрішньої оболонки, представлені на рис. 3.

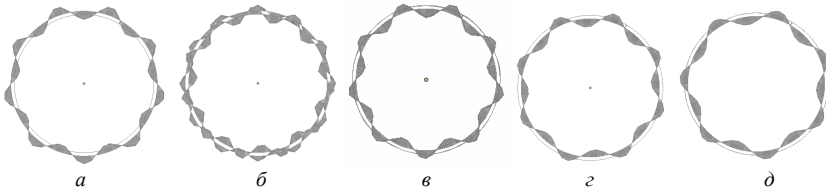


Рис. 2. Форми власних коливань складної оболонкової конструкції *a* - 15,1995 Гц; *б* - 18,4430 Гц; *в* - 19,2179 Гц; *г* - 25,0497 Гц; *д* - 30,8376 Гц

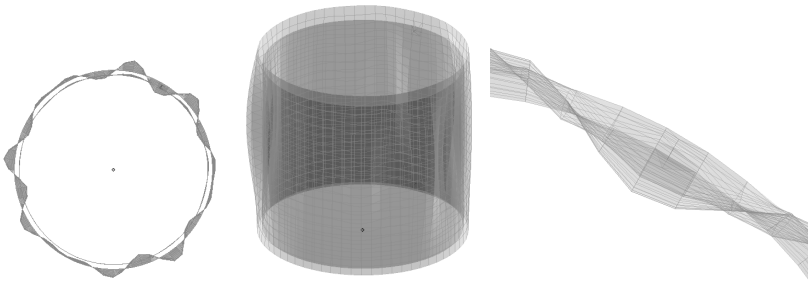


Рис. 3

На рис. 4 представлена 10-а форма власних коливань конструкції з нерегулярними деформаціями внутрішньої оболонки при заповненні рідиною 1/4 об'єму внутрішньої оболонки.

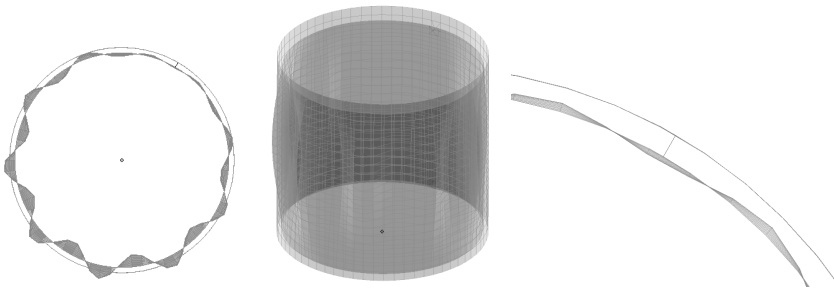


Рис. 4

На рис. 5 показана 40-а форма власних коливань конструкції при заповненні рідиною 3/4 об'єму внутрішньої оболонки з регулярними деформаціями зовнішньої оболонки і двома півхвилями вздовж твірної.



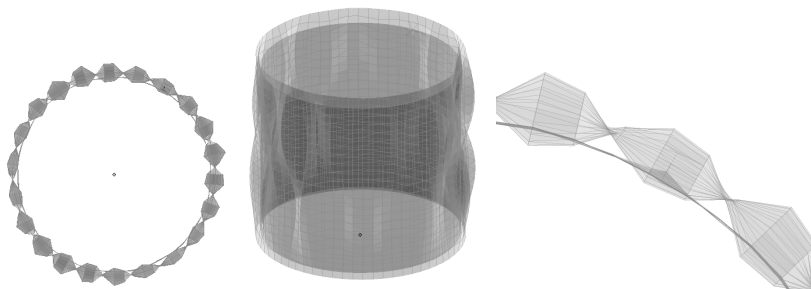


Рис. 5

Результати модальних аналізів системи з'єднаних оболонок без урахування [4] та з урахуванням навантаження показали, що власні частоти та форми коливань відрізняються. Має місце збільшення частот власних коливань конструкції за рахунок збільшення навантаження від ваги рідини на внутрішню оболонку конструкції. Коливання в обох випадках відбувається як з регулярними так і нерегулярними деформаціями оболонок. Часто спостерігаються локальні деформації стінок обох оболонок в місцях кріплення труб.

**Висновок.** Вплив навантаження на частоти та форми власних коливань складної оболонкової конструкції суттєвий і повинен бути врахований при дослідженні поведінки даної конструкції при дії різних динамічних навантажень.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Дехтярюк Є.С., Ворона Ю.В.* Динаміка споруд. – К.: ПАТ Віпол, 2012. – 342 с.
2. *Гоцуляк Є.О., Лук'янченко О.О., Костіна О.В., Гаран І.Г.* Побудова геометрично нелінійних МСЕ моделей для тонких оболонок довільної форми та методи їх розрахунку// Theoretical Foundation of Civil Engineering: – Міжнар. наук. журнал. – Дніпр.: ПДАБА, 2010. – С.107-114.
3. *Дехтярюк Є.С., Лук'янченко О.О., Шах В.В.* Оцінка рівня конструкційної безпеки нафтоналівного резервуара// Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – Вип.86. – К.: КНУБА, 2010. – С. 22–29.
4. *Киричук О.А., Лук'янченко О.О.* Динамічний аналіз системи двох з'єднаних оболонок// Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – Вип.90. – К.:КНУБА, 2012. – С. 40–46.
5. *Шимкович Д.Г.* Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.

*Стаття надійшла до редакції 27.05.2013 р.*

*Баженов В.А., Лукьянченко О.А., Костина Е.В., Геращенко О.В.*

**ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СЛОЖНОЙ  
ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Выполнено математическое моделирование динамики сложной оболочечной конструкции при действии неравномерно распределенной нагрузки от веса жидкости. Расчетная дискретная динамическая модель конструкции построена с помощью методов конечных элементов и возможных перемещений, которые реализованы в программном комплексе NASTRAN. Выполнен модальный анализ нагруженной конструкции с помощью метода Ланцоша. Оценено влияние нагрузки на собственные колебания оболочечной конструкции. Сравнены частоты и формы собственных колебаний конструкции при действии веса жидкости разного объема.

*Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Kostina E.V., Gerashchenko O.V.*

**IMPACT LOADS FREQUENCY OF NATURAL OSCILLATIONS OF COMPLEX SHELL  
STRUCTURES**

The mathematical modeling of the dynamics of complex shell structure under the action of uniformly distributed load on the weight of the liquid. Estimated discrete dynamical model of the design is built using finite element methods and possible displacements that are implemented in the software package NASTRAN. Modal analysis loaded structure using the Lanczos method is performed. The effect of pressure on the natural oscillations of a complex shell structure is assessed. The frequency and form of natural oscillations of structures under the weight of liquid in various capacities are compared.