УДК 534.12:621.642.2

Н. Е. НАУМЕНКО, М. Б. СОБОЛЕВСКАЯ, С. А. СИРОТА, А. Д. НИКОЛАЕВ, И. Д. БАШЛИЙ

НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ БАКЕ

Баки, частично заполненные жидкостью, являются неотъемлемой составной частью многих современных объектов транспортного машиностроения, авиационной и ракетно-космической техники. При движении таких объектов интенсивные внешние воздействия приводят к появлению колебаний жидкости, сопровождающихся различными нелинейными эффектами, которые оказывают существенное влияние на динамику конструкций. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и конечно-элементного моделирования пространственных колебаний свободной поверхности жидкости в горизонтально расположенном цилиндрическом баке при гармоническом возбуждении конструкции бака. Цель исследований – определение закономерностей нелинейного поведения жидкости. Для экспериментального определения собственных пространственных колебаний свободной поверхности жидкости в баке использован метод свободных колебаний. Математическое моделирование проведено с помощью метода конечных элементов. Определены собственные частоты и формы доминирующих тонов (поперечных и продольных) колебаний свободной поверхности жидкости в зависимости от уровня заполнения бака. При немалых амплитудах колебаний свободной поверхности жидкости исследованы явления, связанные с проявлением нелинейных свойств системы “конструкция бака – жидкость”: ограничение амплитуд колебаний свободной поверхности жидкости; асимметрия профиля волны и разрывы сплошности жидкой среды, находящейся во взаимодействии со стенками полости; круговые колебательные движения. Установлено, что полученные путем математического моделирования собственные частоты и формы колебаний свободной поверхности жидкости удовлетворительно согласуются с данными проведенных экспериментов. Показано, что математическое моделирование пространственных колебаний позволяет определить причины возникновения сложных форм колебаний свободной поверхности жидкости.

Ключевые слова: *свободная поверхность жидкости, цилиндрический бак, пространственные колебания, нелинейный эффект, собственная частота, экспериментальные исследования, математическое моделирование, метод конечных элементов.*

1. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания / *В. В. Пилипенко*. – Киев : Наукова думка, 1989. – 316 с.
2. Динамика жидкостных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракетносителей / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довготько, Ю. Е. Григорьев, И. К. Манько, О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2001. – № 2. – С. 11 – 37.
3. *Науменко Н. Е.* Построение математической модели гидроупругого взаимодействия жидкости с упругим трубопроводом / *Н. Е. Науменко, Л. П. Котелина, С. И. Филиппюк* // Динамика и управление движением механических систем : Сб. науч. тр. – Киев : Наукова думка, 1992. – С. 3 – 9.
4. *Науменко Н. Е.* Исследование переходных режимов в трубопроводе при кавитационном течении закрученного потока жидкости / *Н. Е. Науменко* // Гидрогозодинамика энергетических установок : Сб. науч. тр. – Киев : Наукова думка, 1982. – С. 109 – 115.
5. *Пилипенко В. В.* Расчетно-экспериментальный метод определения податливости и размеров кавитационной полости в закрученном потоке жидкости в круглой трубе / *В. В. Пилипенко* // Космические исследования на Украине. – 1982. – № 3. – С. 19 – 26.
6. *Богомаз Г. И.* Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / *Г. И. Богомаз*. – Киев : Наукова думка, 2004. – 224 с.
7. *Богомаз Г. И.* Колебания жидкости в баках. Методы и результаты экспериментальных исследований / *Г. И. Богомаз, С. А. Сирота*. – Днепропетровск : Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2002. – 306 с.
8. *Микишев Г. Н.* Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / *Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович*. – М. : Машиностроение, 1971. – 564 с.
9. *Abramson H. N.* Dynamic behavior of liquids in moving containers / *H. N. Abramson*. – Washington, 1966. – 467 p. – (NASA; SP-106).
10. *Луковский И. А.* Математические модели нелинейной динамики твердых тел с жидкостью / *И. А. Луковский*. – К. : Наукова думка, 2010. – 407 с.
11. *Timokha A. A* multimodal method for liquid sloshing in a two-dimensional circular tank / *A. Timokha* // J. Fluid Mechanics. – 2010. – Vol. 665. – P. 457 – 479.
12. Развитие сложных пространственных колебательных движений жидкости в цилиндрическом баке при резонансном возбуждении системы “конструкция бака – жидкость” / *Г. И. Богомаз, С. А. Сирота, И. Д. Блоха, А. Д. Николаев* // Техническая механика. – 2007. – № 1. – С. 81 – 89.
13. *Ли К.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / *К. Ли*. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 560 с.

14. Численное моделирование свободных пространственных колебаний жидкости в емкостях сложной конфигурации / *И. Д. Блоха, Г. И. Богомаз, А. Д. Николаев, С. А. Сирота* // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 5. – С. 75 – 80.