

УДК 530.9

**ПРИВЕДЕНИЕ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК
В СООТВЕТСТВИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ**

© 2011 г.

В.В. Пикуль

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

pikulv@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Открыт специфический закон деформирования оболочек в процессе потери устойчивости; построена теория устойчивости оболочек с произвольной анизотропией упругих свойств материала, которая полностью соответствует экспериментальным данным; в рамках построенной теории предложен способ учета неупругих свойств материала оболочки.

Ключевые слова: устойчивость, теория устойчивости оболочек, цилиндрические оболочки, сферические оболочки, критическое давление, специфический закон деформирования оболочки в процессе потери устойчивости.

**Фундаментальная проблема
теории устойчивости оболочек**

Проблема приведения теории устойчивости оболочек в соответствие с экспериментальными данными в полной мере проявилась сто лет тому назад, после появления первых теоретических (1908 г., Lorenz R.) и экспериментальных (1908 г., Lilly W.E., Mallock A.) исследований устойчивости цилиндрических оболочек при осевом сжатии. За прошедшие сто лет установлено, что основной причиной расхождения теории с экспериментом является необычайно высокая чувствительность оболочки к несовершенствам формы поверхности [1]. Однако механизм влияния несовершенств формы поверхности на процесс потери устойчивости был понят только в 2006 году [2].

**Физическая сущность
потери устойчивости оболочек**

Из физики твердого тела известно, что стабильность формы твердого тела обеспечивается внутренними связями между его атомными частями. Выявлено пять классов внутренних связей твердого тела. Все они имеют общую природу: электростатическое притяжение и отталкивание [3]. Прочность внутренних связей определяется соотношением электростатических сил притяжения и отталкивания. При увеличении доли отталкивающих сил внутренние связи ослабевают вплоть до перехода вещества твердого тела в новое агрегатное состояние – в жидкость. Отсюда становится ясным, что потеря устойчивости

тонкостенных конструкций происходит тогда, когда их внутренние связи под внешним воздействием утрачивают способность удерживать исходную форму равновесия.

При осевом сжатии вследствие эффекта Пуассона цилиндрическая оболочка растягивается в окружном направлении. В критическом состоянии внутренние связи тела оболочки утрачивают способность удерживать первоначальную форму равновесия, вследствие чего растянутые круговые элементы под воздействием сил упругости устремляются в нейтральное положение и вместе с внешними сжимающими силами производят работу по деформированию оболочки в момент потери устойчивости. Таким образом, процесс потери устойчивости оболочки сопровождается высвобождением внутренней энергии упругих деформаций растяжения круговых элементов оболочки. Учет высвобождаемой внутренней энергии деформаций растяжения приводит теорию устойчивости цилиндрических оболочек при осевом сжатии в полное соответствие с экспериментом [2].

**Влияние формы поверхности оболочки
на процесс потери устойчивости**

Кадры скоростной киносъемки указывают на существенное влияние формы поверхности оболочки на процесс потери устойчивости [1]. При достижении критического осевого давления на круговой цилиндрической форме оболочки появляются продольные гофры, в средней части которых зарождаются мелкие вмятины. Эти вмятины постепенно распространяются по поверхности

оболочки, увеличиваясь в размерах, и в момент полной потери устойчивости приобретают глобальные размеры. Процесс потери устойчивости цилиндрической оболочки носит явно выраженный статический характер. Совсем иначе ведут себя сферические оболочки при всестороннем давлении. При достижении критической величины внешнего давления они сразу теряют устойчивость с образованием глобальных выпучин и вмятин, т.е. процесс потери устойчивости сферической оболочки происходит динамически.

Наблюдаемые различия в процессах потери устойчивости цилиндрических и сферических оболочек находят объяснение в теории поверхностей. Из теории поверхностей известно, что только поверхности нулевой и отрицательной гауссовой кривизны допускают бесконечно малые изгибания. При положительной гауссовой кривизне бесконечно малые изгибания поверхности не возможны [4]. Этим объясняются наблюдаемые в экспериментах характеры потери устойчивости оболочек различной гауссовой кривизны. У цилиндрической оболочки, вследствие возможности бесконечно малых изгибаний ее поверхности, бифуркация исходного положения равновесия происходит плавно. У сферической оболочки переход из исходного положения равновесия в смежное бесконечно близкое равновесное положение возможен только скачком. Отсюда статический и динамический характеры потери устойчивости цилиндрических и сферических оболочек. Это объяснение хорошо согласуется с воздействием на оболочку локальной нагрузки. У оболочек нулевой и отрицательной гауссовой кривизны локальная нагрузка вызывает распространение полей возмущения перемещений вдоль асимптотических линий, а у оболочек положительной гауссовой кривизны область возмущения поля перемещений локальна [5].

Гипотеза, отражающая специфический закон деформирования оболочек в процессе потери устойчивости

В процессе исследований устойчивости оболочек была выдвинута гипотеза [6], которую представим в уточненной форме, не затрагивая ее основных положений:

В критическом состоянии внутренние связи тела оболочки утрачивают способность удерживать исходную форму равновесия, вследствие чего происходит высвобождение внутренней энергии деформаций растяжения и сдвига, приобретенных оболочкой при ее деформировании внешними силами: у оболочек нулевой и отрицательной га-

уссовой кривизны высвобождение внутренней энергии происходит статически, а у оболочек положительной гауссовой кривизны – динамически. У изотропных и ортотропных оболочек высвобождается внутренняя энергия растяжения, ортогонального к сжатым элементам направления. У анизотропных оболочек к внутренней энергии растяжения добавляется внутренняя энергия деформации сдвига.

На основе гипотезы [6] с помощью критерия устойчивости Эйлера построена общая теория устойчивости оболочек с произвольной анизотропией упругих свойств материала. Решены задачи потери устойчивости цилиндрических и конических оболочек при осевом, боковом и всестороннем давлении и сферической оболочки при всестороннем давлении [6]. Получена формула для расчета анизотропной цилиндрической оболочки при действии кручения, осевого, бокового и всестороннего давлений [7]. Расчетные формулы, полученные на основе представленной теории, находятся в полном соответствии с известными экспериментальными данными. Это означает, что в сформулированной здесь гипотезе отражен специфический закон деформирования оболочек в процессе потери устойчивой формы равновесия.

Заключение

При исследованиях по приведению теории устойчивости в соответствие с экспериментом получены следующие основные результаты: открыт специфический закон деформирования оболочек в процессе потери устойчивости; построена теория устойчивости оболочек с произвольной анизотропией упругих свойств материала, которая полностью соответствует экспериментальным данным; в рамках построенной теории предложен способ учета неупругих свойств материала оболочки [6].

Список литературы

1. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. М.: Наука, 1978. 360 с.
2. Пикуль В.В. К теории устойчивости оболочек // Докл. РАН, 2007. Т. 416, №3. С. 341–343.
3. Твердое тело. Физика: Большой энциклопедический словарь. 4-е изд. / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. С. 734–738.
4. Ефимов Н.В. Качественные вопросы теории деформаций поверхностей // Успехи мат. наук. 1948. Т. 3. Вып. 2. С. 47–158.
5. Филин А.П. Элементы теории оболочек. Л.: Стройиздат, 1987. 384 с.
6. Пикуль В.В. Механика оболочек. Владивосток:

Дальнаука, 2009. 536 с.

7. Пикуль В.В. К расчету устойчивости анизотропной цилиндрической оболочки прочного корпуса под-

водного аппарата // Вестник Дальневосточного государственного технического университета: Электрон. периодич. изд. 2009. №2. С. 98–105.

CORRELATING THE SHELL STABILITY THEORY WITH EXPERIMENT

V.V. Pikul'

A specific law of shell deformation in the process of the loss-of-stability has been disclosed. The stability theory, which perfectly corresponds to the experimental data has been constructed for shells with a random anisotropy of material Melastic properties. A method for accounting for nonelastic properties of the shell material has been proposed in the frame of the constructed theory.

Keywords: stability, shell stability theory, cylindrical shells, spherical shells, critical pressure, specific law of shell deformation in process of stability loss.