

Неразрушающие испытания на устойчивость статическим методом

Рассмотрены проблемы экспериментальной отработки элементов ракетной техники с одноразовыми и дорогостоящими корпусными элементами. Для увеличения экономической эффективности наземной экспериментальной отработки предложено использовать неразрушающий метод испытания на основе связи радиальной жесткости с осевой сжимающей силой. Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить экспериментальное исследование зависимости радиальной жесткости цилиндрических оболочек от уровня сжимающей силы. На основе анализа экспериментальных данных выявлены особенности зависимости радиальной жесткости от уровня сжимающей силы, проведено сравнение фактических разрушающих нагрузок с прогнозными.

**Р.С. АБДУЛЛИН,
А.А. ИВАНОВ**

(АО «ГРЦ Макеева», Миасс;
филиал ЮУрГУ, Миасс)

В.И. КИСЕЛЕВ,
канд. техн. наук

(филиал ЮУрГУ, Миасс)
vliv52@mail.ru

Неразрушающие методы испытаний, устойчивость, критическая нагрузка, радиальная жесткость

При разработке сложных инженерных систем необходима широкомасштабная экспериментальная отработка, минимизирующая отказы при штатной эксплуатации. Из-за возрастающих требований к разрабатываемой технике стоимость экспериментальной отработки увеличивается. Это особенно актуально в отношении ракетной техники, поскольку производство одноразовых корпусных элементов требует больших финансовых затрат. Для снижения стоимости экспериментальной отработки предлагается использовать неразрушающие методы испытаний, которые с достаточной точностью позволят определять разрушающие нагрузки и, соответственно, подтвердить прочность изделия при действии рабочих нагрузок. Использование неразрушающих методов испытаний позволит уменьшить количество экспериментальных узлов, а также применять экспериментальные узлы в изделиях, что в условиях удорожания производства и повторного использования в многоразовых системах наиболее актуально. Наиболее финансово затратны испытания на устойчивость, так как разрушение экспериментальных узлов, в отличие от испытаний на прочность, происходит непредсказуемо [1–3]. В настоящее время известны три неразрушающих метода определения критических нагрузок: метод корреляции вибраций, статический метод, метод динамических масс [4].

В работе рассмотрен статический метод как наиболее легкий в реализации и не требующий больших финансовых вложений для покупки измерительного оборудования, что является важным фактором при внедрении в условиях реального производства. Для реализации метода корреляции колебаний, в отличие от статического метода, необходимо оборудование для возбуждения колебаний и их регистрации [5–7], что не всегда возможно даже в условиях научной лаборатории.

Статический метод определения критической нагрузки основан на связи радиальной жесткости оболочки с уровнем сжимающей силы. Зависимость радиальной жесткости оболочки от сжимающей силы предположительно линейна.

В работе [8] эксперимент проведен на подкрепленных оболочках, изготовленных из акрила. В эксперименте оболочки нагружались в двадцати четырех равноудаленных точках, расположенных на одном уровне (посередине оболочки), поперечной силой при различных уровнях продольных сжимающих сил. Для каждой точки определяли радиальные жесткости, измеряя значения силы и перемещения оболочки под зондом. По полученным значениям радиальной жесткости для каждой исследуемой точки строилась ее зависимость от продольной сжимающей силы, аппроксимируемая линейной функцией. Пересечение аппроксимирующей функции с нулем показывало прогнозную разрушающую нагрузку. В ходе исследования были осуществлены разрушения испытываемых образцов, что позволило достичь высокой согласованности между прогнозируемыми значениями разрушающих нагрузок и экспериментальными результатами.

Цель настоящей работы – подтверждение экспериментом возможности прогнозирования несущей способности оболочки по изменению радиальной жесткости при осевом сжатии.

В отличие от работы [8], в данной работе сопротивление оболочки определялось при различных уровнях перемещения зонда, тем самым определялся закон изменения жесткости оболочки при различных уровнях сжимающей силы. Также при испытаниях было обнаружено такое положение зонда, при котором значения радиальной жесткости не снижались, а повышались. Благодаря проведенным исследованиям возможно установить корреляцию между положением точек измерения жесткости и формой потери устойчивости.

В соответствии с работой [4] была разработана экспериментальная установка для определения радиальной жесткости (рис. 1). На раме 1 размещается микрометр 2 с установленным на нем датчиком силы 3. Микрометр фиксируется на раме с помощью прижимного болта 4. Ориентация штока микрометра по отношению к нормали оболочки происходит за счет пластины 5, которая в двух точках опирается на раму. В случае продольного перемещения винта 6 осуществляется давление на датчик силы, закрепленный на штоке микрометра. При перемещениях штока микрометра до касания с оболочкой с помощью датчика силы фиксируются величину силы трения, при касании штока оболочки происходит нарастание силы за счет упругой силы сопротивления оболочки.

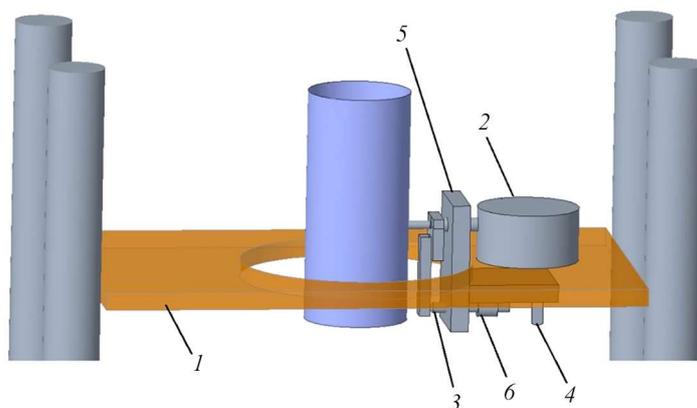


Рис. 1

Испытания оболочек проводили с использованием разрывной машины МИМ 9ЛР, оборудованной датчиком силы до 50 кН и самоустанавливающимися опорами, исключающими непараллельность торцов и создание моментного состояния. Вначале оболочка устанавливалась между торцами машины с созданием минимально возможной продольной сжимающей силы. В оболочку с шагом в 50 мкм вдавливался измерительный зонд (на глубину 300 мкм), который регистрировал поперечную силу на каждом шаге. Измерения поперечной силы от перемещений зонда проводились на каждом шаге изменения продольной сжимающей силы до разрушения. В некоторых экспериментах использование методики приводило к преждевременному разрушению образца.

В качестве образцов для экспериментальных исследований использовались алюминиевые банки со следующими геометрическими характеристиками: радиус $R = 57,5$ мм, толщина $\delta = 0,1$ мм, длина цилиндрической части $l = 130$ мм. Для экспериментальных исследований были отобраны цилиндрические оболочки, характеризующиеся незначительными начальными отклонениями от идеальной геометрии.

Было проведено четыре эксперимента. В первых двух экспериментах определялась зависимость радиальных перемещений от силы в одной точке, расположенной в произвольном положении по окружности и посередине образующей. В двух других экспериментах измерение перемещений производилось посередине образующей оболочки в трех равноудаленных точках на углу 90° . Результаты измерений и линейные аппроксимации приведены на рис. 2.

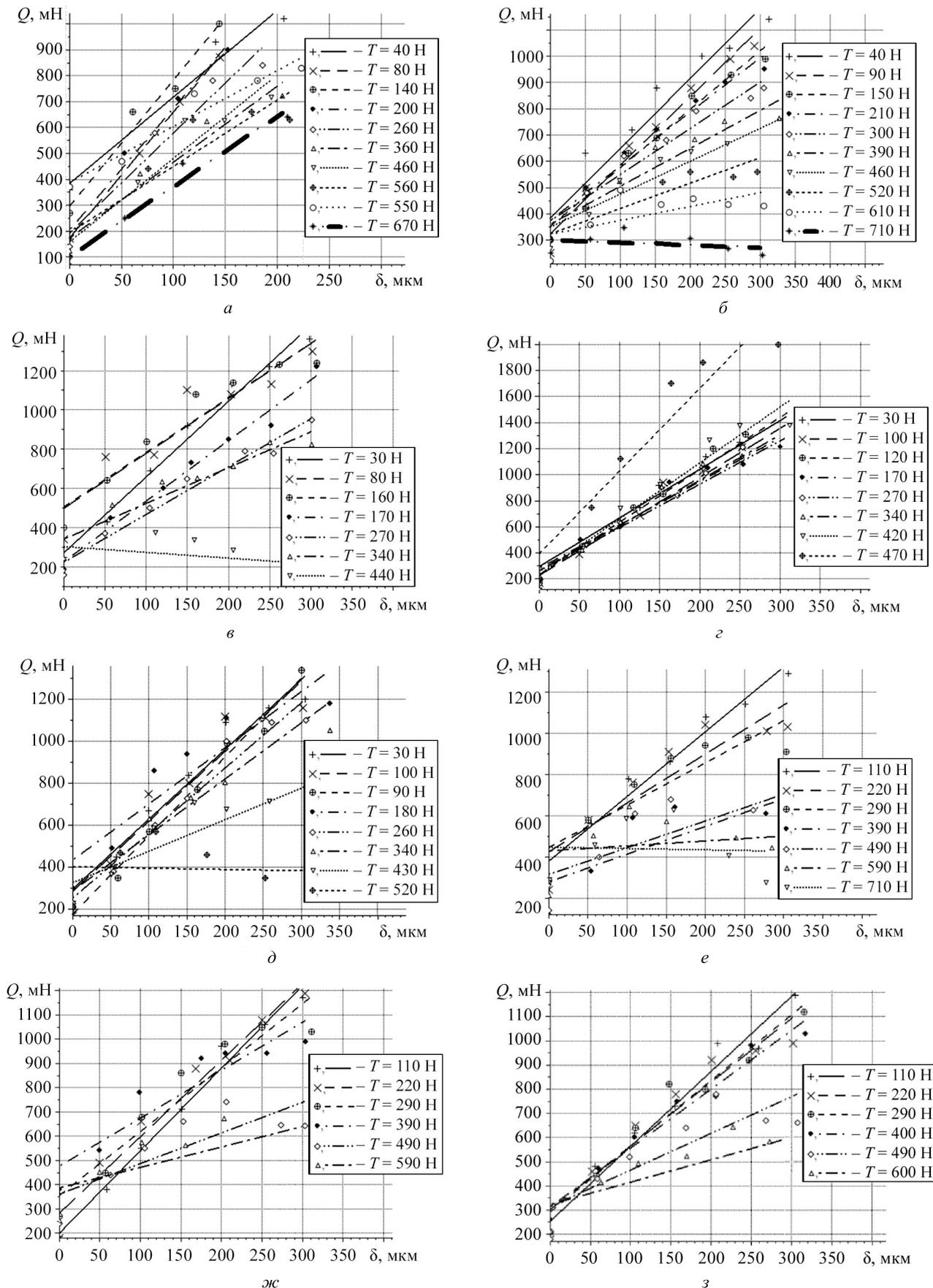


Рис. 2. Зависимость поперечной нагрузки от радиальных перемещений (точки) и линейные аппроксимации (линии) при различных уровнях сжимающих сил: а – эксперимент № 1; б – эксперимент № 2; в – эксперимент № 3 (точка 1); г – эксперимент № 3 (точка 2); д – эксперимент № 3 (точка 3); е – эксперимент № 4 (точка 1); ж – эксперимент № 4 (точка 2); з – эксперимент № 4 (точка 3)

Как видим (см. рис. 2), радиальная жесткость оболочки уменьшается при увеличивающейся продольной сжимающей силе. Локальные формы потери устойчивости, появляющиеся при измерениях, не влияли на общую несущую способность, так как сопротивление оболочки продольному сжатию продолжало увеличиваться. В соответствии с поведением точек на рис. 2 при потере локальной устойчивости зависимость радиальной силы от перемещений имеет максимум [9–11].

Нагрузки потери устойчивости (локальные и общие) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер эксперимента	Нагрузка локальной потери устойчивости, Н	Нагрузка общей потери устойчивости, Н
1	600	670
2	-	780
3	440, 520	660
4	710	710

Радиальные жесткости определяли с помощью линейной аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Радиальные жесткости для различных точек при действии продольного сжимающего усилия приведены на рис. 2:

- эксперимент № 1: $T = 40$ Н, $k = 2,59$ мН/мкм; $T = 80$ Н, $k = 4,86$ мН/мкм; $T = 140$ Н, $k = 4,87$ мН/мкм; $T = 200$ Н, $k = 4,71$ мН/мкм; $T = 260$ Н, $k = 3,86$ мН/мкм; $T = 360$ Н, $k = 2,93$ мН/мкм; $T = 460$ Н, $k = 3,22$ мН/мкм; $T = 560$ Н, $k = 2,56$ мН/мкм; $T = 550$ Н, $k = 2,16$ мН/мкм; $T = 670$ Н, $k = 2,72$ мН/мкм;

- эксперимент № 2: $T = 40$ Н, $k = 2,65$ мН/мкм; $T = 90$ Н, $k = 2,61$ мН/мкм; $T = 150$ Н, $k = 2,23$ мН/мкм; $T = 210$ Н, $k = 2,06$ мН/мкм; $T = 300$ Н, $k = 1,76$ мН/мкм; $T = 390$ Н, $k = 1,45$ мН/мкм; $T = 460$ Н, $k = 1,25$ мН/мкм; $T = 520$ Н, $k = 0,97$ мН/мкм; $T = 610$ Н, $k = 0,53$ мН/мкм; $T = 710$ Н, $k = -0,09$ мН/мкм;

- эксперимент № 3 (точка 1): $T = 30$ Н, $k = 3,87$ мН/мкм; $T = 80$ Н, $k = 2,8$ мН/мкм; $T = 160$ Н, $k = 2,78$ мН/мкм; $T = 170$ Н, $k = 3,09$ мН/мкм; $T = 270$ Н, $k = 2,44$ мН/мкм; $T = 340$ Н, $k = 1,82$ мН/мкм; $T = 440$ Н, $k = -0,29$ мН/мкм;

- эксперимент № 3 (точка 2): $T = 30$ Н, $k = 3,73$ мН/мкм; $T = 100$ Н, $k = 3,76$ мН/мкм; $T = 120$ Н, $k = 4,02$ мН/мкм; $T = 170$ Н, $k = 3,33$ мН/мкм; $T = 270$ Н, $k = 3,33$ мН/мкм; $T = 340$ Н, $k = 3,47$ мН/мкм; $T = 420$ Н, $k = 4,28$ мН/мкм; $T = 470$ Н, $k = 6,35$ мН/мкм;

- эксперимент № 3 (точка 3): $T = 30$ Н, $k = 3,33$ мН/мкм; $T = 100$ Н, $k = 3,33$ мН/мкм; $T = 90$ Н, $k = 3,75$ мН/мкм; $T = 180$ Н, $k = 2,68$ мН/мкм; $T = 260$ Н, $k = 3,1$ мН/мкм; $T = 340$ Н, $k = 2,67$ мН/мкм; $T = 430$ Н, $k = 1,5$ мН/мкм; $T = 520$ Н, $k = -0,06$ мН/мкм;

- эксперимент № 4 (точка 1): $T = 110$ Н, $k = 3,14$ мН/мкм; $T = 220$ Н, $k = 2,37$ мН/мкм; $T = 290$ Н, $k = 2,05$ мН/мкм; $T = 390$ Н, $k = 1,34$ мН/мкм; $T = 490$ Н, $k = 1,3$ мН/мкм; $T = 590$ Н, $k = 0,24$ мН/мкм; $T = 710$ Н, $k = -0,06$ мН/мкм;

- эксперимент № 4 (точка 2): $T = 110$ Н, $k = 3,41$ мН/мкм; $T = 220$ Н, $k = 3,16$ мН/мкм; $T = 290$ Н, $k = 2,64$ мН/мкм; $T = 400$ Н, $k = 1,98$ мН/мкм; $T = 490$ Н, $k = 1,26$ мН/мкм; $T = 590$ Н, $k = 0,84$ мН/мкм;

- эксперимент № 4 (точка 3): $T = 110$ Н, $k = 3,10$ мН/мкм; $T = 220$ Н, $k = 2,64$ мН/мкм; $T = 290$ Н, $k = 2,72$ мН/мкм; $T = 400$ Н, $k = 2,44$ мН/мкм; $T = 490$ Н, $k = 1,52$ мН/мкм; $T = 600$ Н, $k = 0,93$ мН/мкм.

Представленные результаты аппроксимации использованы для прогнозирования разрушающей нагрузки (рис. 3).

В табл. 2 приведены прогнозируемые и фактические критические нагрузки.

Все образцы демонстрировали сходные значения несущей способности. Потеря локальной устойчивости, фиксируемая в ходе измерений, приводила к незначительным отклонениям в величине критической нагрузки общей потери устойчивости конструкции.

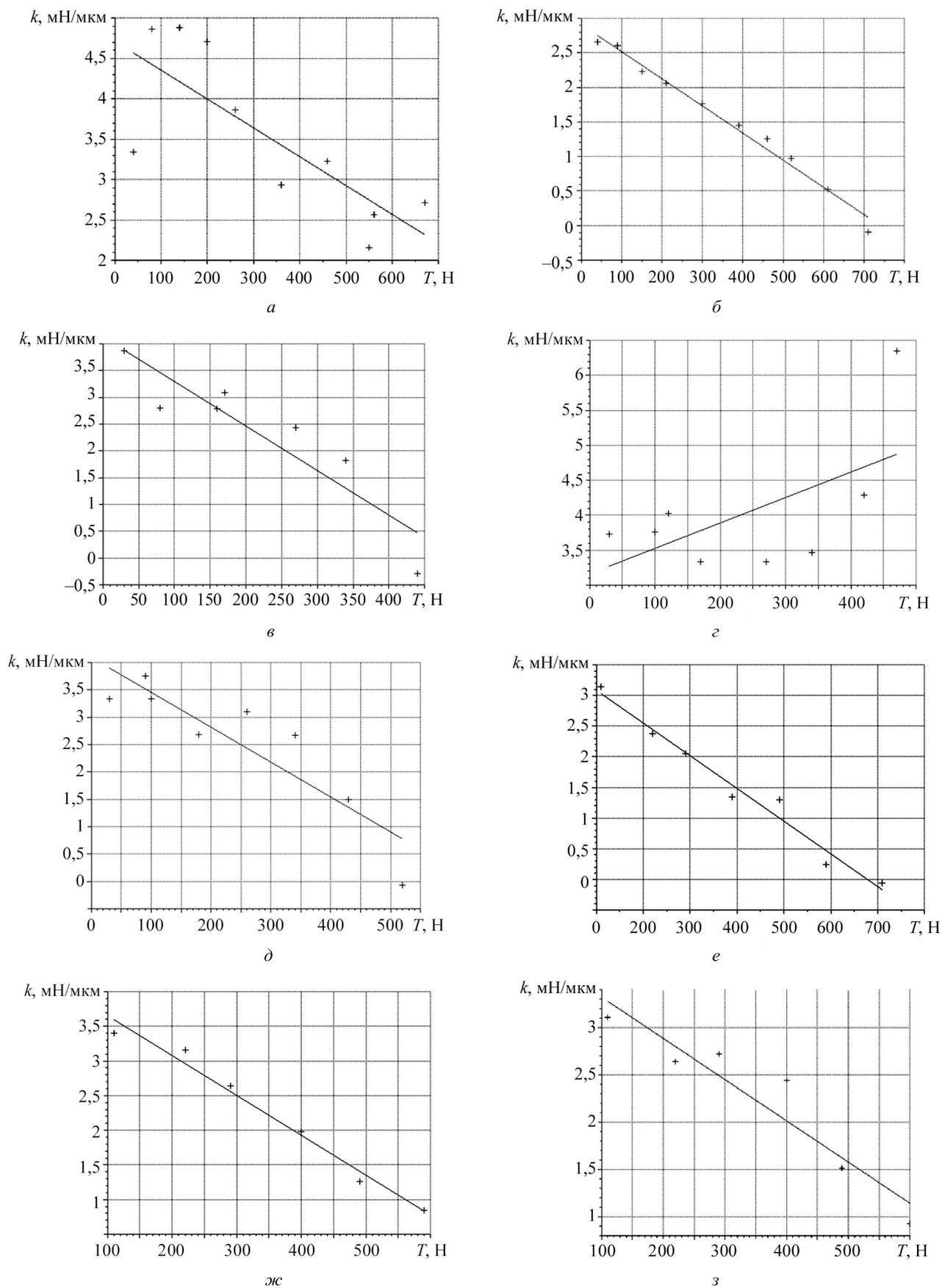


Рис. 3. Результаты аппроксимации экспериментов линейной функцией: *a* – эксперимент № 1 ($T_{кр} = 1319$ Н); *б* – эксперимент № 2 ($T_{кр} = 740$ Н); *в* – эксперимент № 3 (точка 1) ($T_{кр} = 496$ Н); *г* – эксперимент № 3 (точка 2) ($T_{кр} = 870$ Н); *д* – эксперимент № 3 (точка 3) ($T_{кр} = 641$ Н); *е* – эксперимент № 4 (точка 1) ($T_{кр} = 678$ Н); *ж* – эксперимент № 4 (точка 2) ($T_{кр} = 735$ Н); *з* – эксперимент № 4 (точка 3) ($T_{кр} = 863$ Н)

Таблица 2

Номер эксперимента	Локальная устойчивость, Н			Общая устойчивость, Н	Прогноз, Н			Точность прогноза, %		
	Точка 1	Точка 2	Точка 3		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 1	Точка 2	Точка 3
1	600	–	–	670	1455	-	-	117	-	-
2	-	-	-	780	740	-	-	5,1	-	-
3	440	-	520	660	496	-870	641	12,7*	-	23,3*
4	710	-	-	710	678	734	863	4,5	-	-
								2,9		
								4,5		

Примечание: * – погрешности, определенные по нагрузкам локальной устойчивости.

Фактический коэффициент устойчивости варьировался в диапазоне 0,15...0,18. Разница между экспериментальными и прогнозными значениями в эксперименте № 1, равная 117 %, обусловлена недочетами в установке, которые были устранены в последующих экспериментах. В частности, недостаток заключался в наличии значительного люфта винта, осуществляющего давление на датчик силы, что вызывало случайные смещения и колебания измеряемых показаний. Отклонения между экспериментальными и предсказанными значениями несущей способности для остальных опытов находились в приемлемых пределах. Прогнозное значение для второй точки эксперимента № 3 является отрицательным, что свидетельствует о повышении радиальной жесткости в процессе увеличения продольного сжатия в исследуемой области. Такое увеличение радиальной жесткости может быть обусловлено расположением данной точки в зоне формирования вершины ромба, что соответствует несимметричной форме потери устойчивости. Это впоследствии подтверждено на разрушенном образце. Для эксперимента № 3 оценка погрешности прогнозирования общей несущей способности оболочки выполнена по максимальному значению, однако выделение локальной потери устойчивости от общей требует дальнейших исследований.

В процессе выполнения работы были построены зависимости поперечной силы от радиальных перемещений датчика при увеличивающейся продольной сжимающей силе. Полученные зависимости были аппроксимированы линейной функцией с целью получения величины радиальной жесткости оболочки в зависимости от уровня сжимающей силы. Были построены зависимости величин радиальных жесткостей от уровня продольной сжимающей силы. Видно, что на графиках (рис. 3, б–з), за исключением рис. 3, а, зависимость радиальной жесткости от продольной сжимающей силы линейна. По полученным зависимостям была спрогнозирована несущая способность каждого образца. Прогнозы для трех из четырех образцов продемонстрировали высокий уровень сходимости. Однако при многоточечном нагружении выявлены точки, в которых прогнозируемая несущая способность приближается как к локальной потере устойчивости, так и к общей. В дальнейшем планируется проведение исследований локальной устойчивости и ее воздействия на зависимость радиальной жесткости от продольной силы в других точках.

При исследовании зависимости радиальной жесткости от продольной сжимающей силы была выявлена зависимость прогнозной несущей способности оболочки от положения точек, в которых производилось измерение жесткости. Необходимо исследовать как можно большее количество точек и установить корреляцию их положения с начальными несовершенствами формы и разнотолщиной.

Обнаружено, что зависимость поперечной силы от радиальных перемещений приобретает все более выраженную нелинейность при увеличении уровня продольного сжатия. При приближении осевой сжимающей силы к критическому значению на графике зависимости поперечной силы от радиальных перемещений наблюдается наличие максимума, что свидетельствует о смене знака жесткости. Такое изменение знака жесткости оболочки указывает на ее локальную потерю устойчивости в рассматриваемой точке измерения. Дальнейшие исследования смогут показать необходимость нагружения оболочки до и после точки смены знака жесткости для прогнозирования общей несущей способности. На данный момент при измерениях, проведенных в работе [8], не учитывали этой особенности и не регламентировали пределов измерений.

Значения жесткости в отдельных точках оболочки могут как уменьшаться, так и возрастать. Значения жесткости возрастают в тех точках, которые совпадают с положительной пучностью, реализовавшейся в эксперименте формы потери устойчивости. Увеличение значений жесткости в эксперименте наблюдается редко, так как не у каждой оболочки заранее определено угловое положение возможной

формы потери устойчивости и, соответственно, угловое положение положительных пучностей. Положение пучностей в осевом направлении, напротив, связано с удалением от торцов оболочки, их расположение поддается расчетному прогнозированию и может быть подтверждено дальнейшими экспериментальными исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтиева Л.У., Тазюков Ф.Х. Об устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 1. С. 85–88.
2. Железнов Л.П., Кабанов В.В., Бойко Д.В. Нелинейное деформирование и устойчивость дискретно подкрепленных эллиптических цилиндрических композитных оболочек при кручении и внутреннем давлении // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 2. С. 27–34.
3. Железнов Л.П. Нелинейное деформирование и устойчивость композитной цилиндрической оболочки при комбинированном нагружении крутящим и изгибающим моментами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 44–50.
4. Singer J., Arboez J., Weller T. Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures: Shells, Built-Up Structures, Composites and Additional Topics. John Wiley & Sons, Inc., 2002. Vol. 2. 1732 p.
5. Arbelo M.A. et al. Experimental and Numerical Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells Using a Vibration Correlation Technique // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 94. P. 273–279.
6. Franzoni F. et al. Vibration Correlation Technique for Predicting the Buckling Load of Imperfection-Sensitive Isotropic Cylindrical Shells: An Analytical and Numerical Verification // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 140. P. 236–247.
7. Franzoni F. et al. Assessing the Axial Buckling Load of a Pressurized Orthotropic Cylindrical Shell through Vibration Correlation Technique // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 137. P. 353–366.
8. Horton W.H., Nassar E.M., Singhal M.K. Determination of the Critical Loads of Shells by Nondestructive Methods // Experimental Mechanics. 1977. Vol. 17. № 4. P. 154–160.
9. Haigui Fan. Critical Buckling Load Prediction of Axially Compressed Cylindrical Shell Based on Non-Destructive Probing Method // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 139. P. 91–104.
10. Yadav K.K., Gerasimidis S. Probing the Buckling of Axially Compressed Thin Stiffened Cylindrical Shells: Stability Landscape and Nondestructive Prediction [Electronical Resource]. URL: https://cloud.aisc.org/SSRC/2023/Yadav_et_al_SSRC_2023.pdf (дата обращения: 10.01.2025).
11. Abbasi A., Yan D., Reis P.M. Probing the Buckling of Pressurized Spherical Shells // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2021. Vol. 155. Article № 104545.

Поступила в редакцию 10.02.25

После доработки 25.03.25

Принята к публикации 23.04.25

Non-Destructive Buckling Experiments by Static Method

R.S. ABDULLIN^{1,2}, A.A. IVANOV^{1,2}, AND V.I. KISELEV²

¹ OAO V.P. Makeev State Rocket Center, Miass

² Miass Branch of the South Ural State University, Miass

The paper considers the problems of experimental development of rocket technology elements with disposable and expensive housing elements. To improve the cost-effectiveness of ground-based experimental testing, a non-destructive testing method based on the relationship between radial stiffness and axial compressive force is proposed. An experimental test bench was developed to study the dependence of cylindrical shells radial stiffness on the level of compressive force. Based on the analysis of experimental data, the characteristics of the relationship between radial stiffness and compressive force level were identified, and a comparison was made between actual failure loads and predicted ones.

Non-destructive testing, buckling, critical load, radial stiffness