



Сысоев О. Е., Добрышкин А. Ю., Нейн С. Н., Кахоров К. К.
O. Ye. Sysoyev, A. Yu. Dobryshkin, S. N. Nyain, K. K. Kahorov

**СОВРЕМЕННЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗАМКНУТЫХ И РАЗОМКНУТЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

**MODERN TESTING BENCHES FOR CONTACTLESS INVESTIGATION
OF FREE OSCILLATIONS IN CLOSED AND OPEN CYLINDRICAL SHELLS**

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – D.Sc. in Engineering, Professor, Dean of Cadastre and Civil Engineering Faculty; Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: fks@knastu.ru.

Добрышкин Артем Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Artem Yu. Dobryshkin – Senior Lecturer, Civil Engineering and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Нейн Сит Ньянг – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Nyein Sit Naing – a post-graduate student, Civil Engineering and Architecture Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Кахоров Комилджон Кахорович – аспирант кафедры «Технология Машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: comil07@mail.ru; kkahorov07@gmail.com.

Mr. Komiljon K. Kahorov – a post-graduate student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: comil07@mail.ru; kkahorov07@gmail.com.

Аннотация. При проведении экспериментальных исследований тонкостенных оболочек контактные датчики измерения свободных колебаний, температуры, деформаций и других параметров вносят значительные искажения в фиксируемую информацию. Для исключения погрешностей измерения свободных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек, возникающих от контактных датчиков, в лаборатории строительных конструкций Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета создан испытательный стенд для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек. Стенд позволяет экспериментально на небольших моделях тонкостенных замкнутых и разомкнутых оболочек с высокой достоверностью оценить воздействия температурных деформаций моделей оболочек на их свободные колебания, что позволит учитывать влияние температур на свободные колебания оболочек и точнее задавать запасы прочности при проектировании различных конструкций оболочного типа.

Summary. When conducting experimental studies of thin-walled shells using contact sensors measuring the free vibrations, temperature, strain, and other settings the scientists suffer significant distortion in the information. To eliminate measurement errors of thin cylindrical shell free vibrations arising from the contact sensors a testing bench for contactless investigation of free oscillations in closed and open cylindrical shells was created in Komsomolsk-on-Amur State Technical University laboratory of constructions. The bench allows assessing the impact of

thermal deformation of shell models on their free oscillations when experimenting using small models of thin-walled closed and open shells with high reliability. This process will take the effect of temperature on the free oscillations of the shells into account, and define safety margins in the design of various types of shell structures more precisely.

Ключевые слова: тонкостенная цилиндрическая оболочка, температурные деформации, свободные колебания.

Key words: thin-walled cylindrical shell, thermal deformation, free oscillations.

УДК 692.412

Различные тонкостенные элементы конструкций в форме замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек широко применяются при строительстве зданий, сооружений, трубопроводов, резервуаров и создании аэрокосмических объектов, которые работают при широком изменении градиента температур и других внешних воздействиях, вызывающих вынужденные колебания таких объектов. Вместе с тем в любой тонкостенной конструкции присутствуют собственные колебания. Наложения собственных и вынужденных колебаний конструкций приводят к свободным колебаниям и возможным резонансным явлениям. Искажение формы конструкции за счет температурных деформаций усложняет расчетную задачу. Часто проблема решается увеличением коэффициента запаса прочности при расчетах конструкции, что экономически нецелесообразно, приводит к значительному их удорожанию в процессе создания. Поэтому важно изучить процесс одновременного влияния деформаций формы оболочки, вызванных температурными изменениями, на свободные колебания как замкнутых, так и разомкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек.

Проведенный сопоставительный анализ известных теоретических и экспериментальных данных показал их расхождение при различных геометрических параметрах конструкций. Процесс влияния температурных деформаций и колебаний оболочки изучен не в полном объеме. Существующие теории неточно описывают колебания оболочки при различных температурных режимах. Во многих работах известных авторов (В. З. Власов, А. С. Вольмир, А. Л. Гольденвейзер, Э. И. Григолюк, П. С. Ковальчук, В. Д. Кубенко, Х. М. Муштари, В. В. Новожилов, С. П. Тимошенко, М. Amabili, L. N. Donnell, D и др. [1 – 7]) данный вопрос не рассматривается – температура оболочки при свободных колебаниях принята $t = \text{const}$, либо вообще не учитывается. Влияние локальных температурных деформаций на колебания оболочки в настоящее время изучено в недостаточном объеме. Нет полной картины, описывающей влияние локальных деформаций, вызванных изменением свойств материала вследствие перепада температур.

Для исследования поведения собственных колебаний тонкостенных цилиндрических оболочек от воздействия разнообразных нагрузок при различных напряженно-деформированных состояниях на базе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета был создан испытательный стенд. Установка дает возможность проведения испытаний с использованием образцов тонких цилиндрических замкнутых и разомкнутых оболочек.

Стенд позволяет регулировать температуру воздействия на оболочку за счет блока управления температурой (БУТ) 2 (см. рис. 1 – 2), создавая локальные деформации. Сами деформации фиксируются фотоаппаратом с матрицей высокого разрешения за счет маркеров, находящихся на образце, и в дальнейшем обрабатываются методами фотограмметрии с использованием ПО [9]. Схема измерения работает следующим образом. В непосредственной близости к оболочке на специальном штативе расположены датчики регистрации колебаний 6. Они регистрируют собственные и вынужденные колебания оболочки, затем сигнал усиливается усилителем аналогового сигнала (УАС) 9 и попадает в аналого-цифровой преобразователь, встроенный в ПЭВМ 1. Вынужденные колебания (как одиночные, так и циклические) возможно создавать с помощью специального устройства вынужденных механических колебаний (УВМК) 3. Тепловизор регистрирует изменение температуры в различных областях оболочки 8. При нагревании оболочки с помощью инфракрасного излучения 7 происходят локальные деформации вследствие локального изменения

физико-механических свойств в различных областях оболочки. Датчики измерения колебаний 6 фиксируют колебания с локальными изменениями физико-механических свойств. Такие изменения образуют локальные искажения формы оболочки. Изменения деформаций фиксируются с помощью фотометок 5 и фотоаппарата 4 [8].

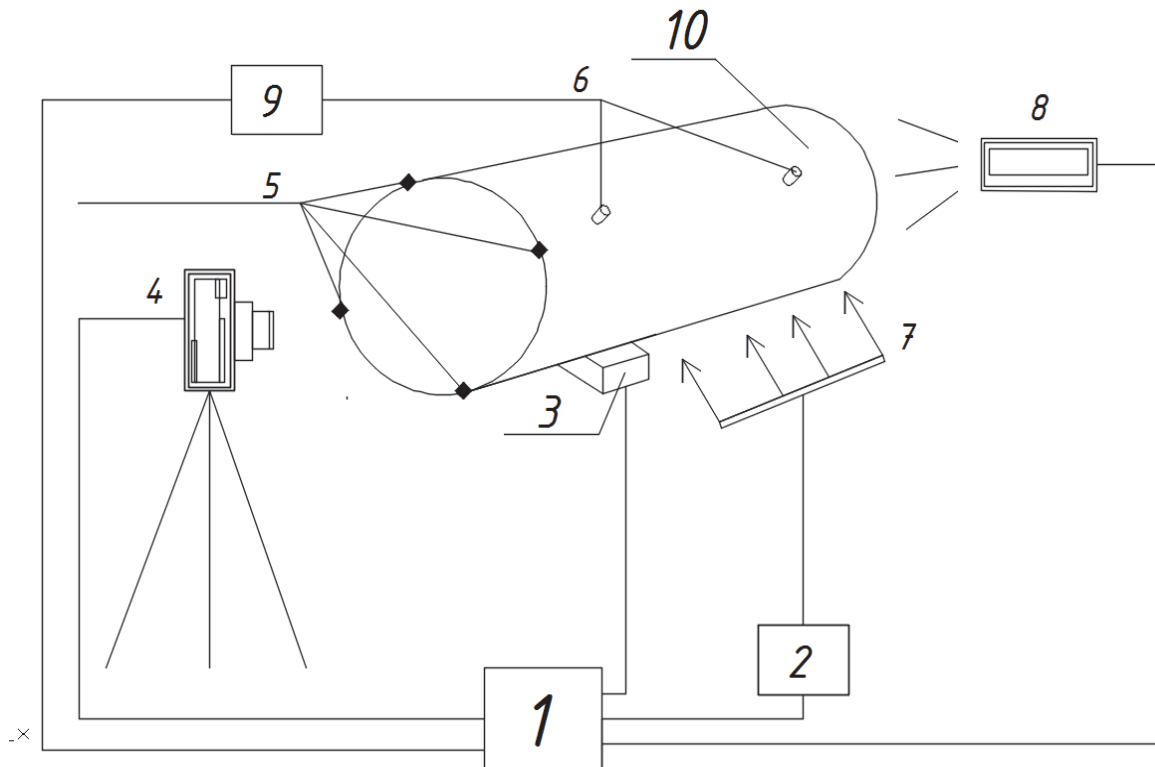


Рис. 1. Схема испытательного стенда для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых тонкостенных цилиндрических оболочек: 1 – ПЭВМ; 2 – БУТ; 3 – УВМК; 4 – фотоаппарат; 5 – маркеры перемещений; 6 – бесконтактные датчики измерения колебаний; 7 – источник инфракрасного излучения; 8 – тепловизор; 9 – УАС; 10 – разомкнутая тонкостенная цилиндрическая оболочка

Для определения искажения формы оболочки применен современный способ фиксации деформаций в различный момент времени – бесконтактный метод оценки деформаций конструкций в любой момент времени. Перед началом испытаний в определённых местах оболочки размещаются специальные фиксаторы – метки, размеры которых зависят от размера исследуемого образца и необходимой точности измерения (см. рис. 3). Поле меток располагается в зависимости от необходимости мест измерения деформаций.

Установленная рядом с образцом масштабная линейка позволяет определить масштаб. Для проведения фотофиксаций перед исследуемой плоскостью опытного образца на штативе устанавливался цифровой фотоаппарат.

В процессе колебаний, а также деформаций, вызванных изменениями физико-механических свойств вследствие изменения температурного режима, расстояние между метками (количество пикселей) изменялось, что позволяло находить деформации оболочки. Данный метод измерения деформаций конструкций позволяет получать опытные данные в динамике вплоть до вхождения оболочки в резонанс. Наличие большого поля меток не требуется. Измерение деформаций с помощью фотограмметрии носит проверочный характер. О достоверности данной методики исследований можно судить исходя из достоверности полученных результатов при исследовании раз-

личных образцов. Специально разработанное ПО PhotoDim2D [9] позволяет очень точно обрабатывать результаты.

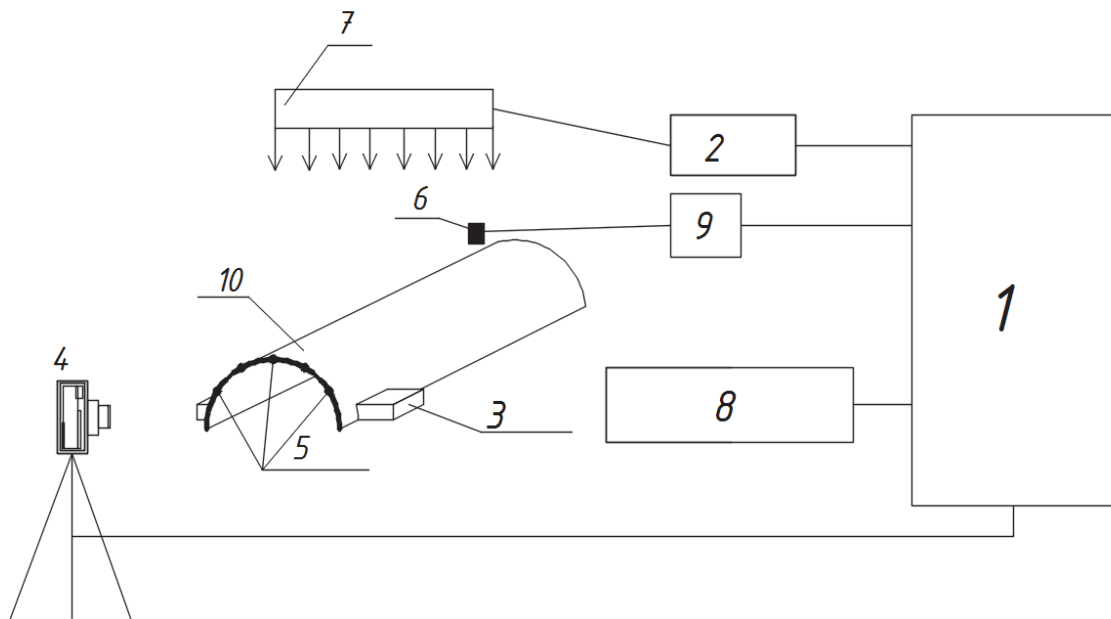


Рис. 2. Схема испытательного стенда для бесконтактного исследования свободных колебаний разомкнутых цилиндрических оболочек: 1 – ПЭВМ; 2 – БУТ; 3 – УВМК; 4 – фотоаппарат; 5 – маркеры перемещений; 6 – бесконтактные датчики измерения колебаний; 7 – источник инфракрасного излучения; 8 – тепловизор; 9 – УАС; 10 – разомкнутая тонкостенная цилиндрическая оболочка

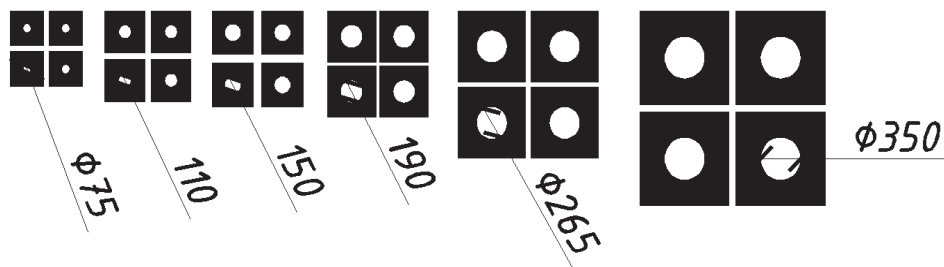


Рис. 3. Фотометки

Полученная экспериментальная информация будет высокоточной и достоверной, так как все измерения (температуры, свободных колебаний, деформационные искажения образца), полученные дистанционным образом, позволяют исключить влияние измерительных приборов на результаты измерения. В дальнейшем результаты экспериментов обрабатываются с использованием метода конечных элементов.

В процессе экспериментов возникают напряженно-деформированные состояния тонкостенной оболочки, которые можно описать с помощью тензора напряжений. Колебания оболочки существенно влияют на НДС любой точки оболочки.

При этом мы рассматриваем поведение бесконечно малого объема материального тела, на которые разбито все тело.

Внутренние напряжения в каждой точке будут равны

$$\sigma_{\text{общ}} = \sigma_{\text{кол}} + \sigma_{\text{темп}},$$

где $\sigma_{\text{кол}}$ – напряжения, возникающие от действия колебаний оболочки; $\sigma_{\text{темп}}$ – напряжения, возникшие в результате изменения температурного режима и как следствие физико-механических свойств.

Перейдем к рассмотрению внутренних усилий, возникающих в оболочке. Выделим из оболочки (см. рис. 4) элементарную призму, проведя два осевых сечения под углом $d\theta$, и две центральные цилиндрические поверхности радиусов r и $r + dr$. Выделенный элемент подвергается действию следующих сил: равно распределённая внешней нагрузки $pr d\theta dr$, перпендикулярная к срединной плоскости оболочки; в сечении поверхностью радиуса $r + dr$ поперечные силы, соответственно равные: $Qrd\theta$ и $Qrd\theta + d(Qrd\theta)$. Как известно, любая плоскость осевого сечения является плоскостью симметрии, поперечные силы в которых стремятся к нулю. Из этого следует, что на призму действует пространственная система сил и изгибающих моментов.

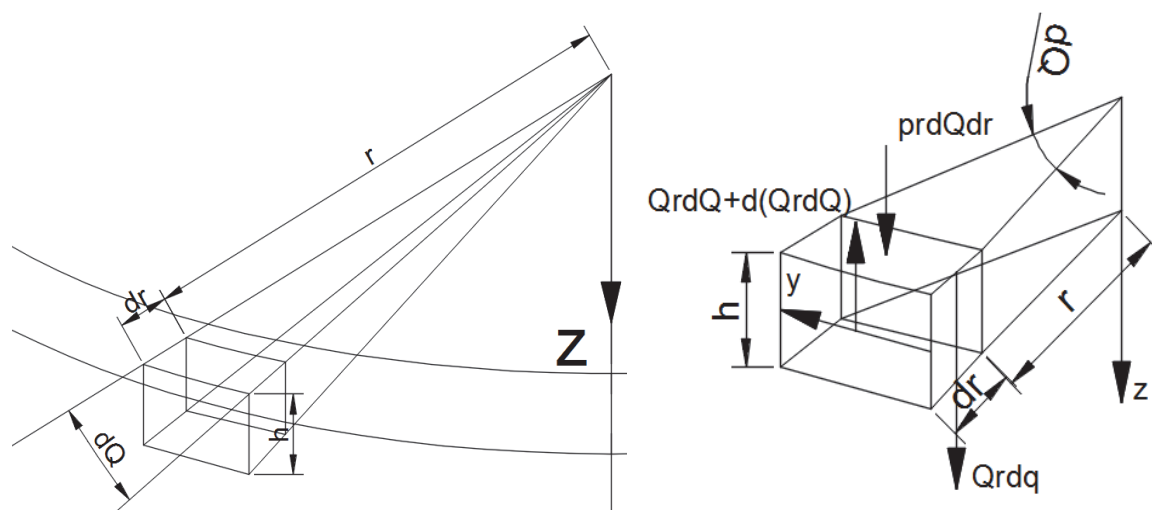


Рис. 4. Элемент оболочки

Если спроецировать все силы на ось симметрии Z , получаем

$$\sum Z = pr d\theta dr + Qrd\theta - [Qrd\theta + d(Qrd\theta)] = 0,$$

либо

$$d(Qrd\theta) = pr d\theta dr.$$

Постоянная величина $d\theta$ сокращается при дифференцировании. Тогда

$$\frac{d(Qr)}{dr} = pr.$$

$$d(Qrd\theta) = pr d\theta dr.$$

Повторно выносим постоянную величину $d\theta$ за знак дифференцирования, и она сокращается. Тогда

$$\frac{d(Qr)}{dr} = pr.$$

Из уравнения равновесия оболочки, находим поперечную силу Q .

А относительное удлинение примет вид

$$\varepsilon_r = \frac{d\varphi}{dr} z. \quad (1)$$

В точке K относительное удлинение волокна оболочки примет вид

$$\varepsilon_\theta = \frac{2\pi(r + z\varphi) - 2\pi r}{2\pi r},$$

или

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varphi}{r} z. \quad (2)$$

Зависимость между углом поворота и прогибом сечения будет выражена формулой

$$\theta(x) = \frac{dw(x)}{dx},$$

где $w(x), \theta(x)$ – прогиб оси оболочки в точке с координатой x и угол поворота поперечного сечения соответственно.

Рассмотрим задачу физических напряжений оболочки. Из закона для плоского напряженного состояния в любой точке оболочки при $z = \text{const}$ (см. рис. 5) нормальные напряжения σ_r и σ_θ будут выражены следующим образом:

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta), \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r). \quad (4)$$

Слияние. Подставив в (3) и (4) выражения относительных деформаций (1) и (2), получим

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right);$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\varphi}{r} + \mu \frac{d\varphi}{dr} \right).$$

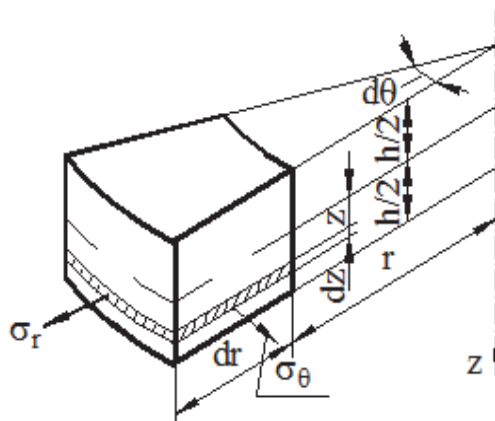


Рис. 5. Плоскость элемента оболочки

Из полученных выражений следует, что напряжения σ_r и σ_θ изменяются в оболочке линейно. Перейдем к рассмотрению изгибающих моментов, действующих в оболочке:

$$M_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz;$$

$$M_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta z dz.$$

Проинтегрировав, получим

$$M_r = D \left(\frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right);$$

$$M_\theta = D \left(\frac{\varphi}{r} + \mu \frac{d\varphi}{dr} \right).$$

Формулы для напряжений будут иметь вид

$$\sigma_r = \frac{M_r}{h^3/12} z \text{ и } \sigma_\theta = \frac{M_\theta}{h^3/12} z.$$

Максимальные напряжения возникают у поверхности оболочки при $z = \pm h/2$

$$(\sigma_r)_{\max} = \pm \frac{6M_r}{h^2}; (\sigma_\theta)_{\max} = \pm \frac{6M_\theta}{h^2}.$$

Далее перейдем к рассмотрению дифференциального уравнения второго порядка относительно функции φ

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} - \frac{\varphi}{r^2} = -\frac{Q}{D}.$$

Это уравнение так же будет иметь вид

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\varphi) \right] = -\frac{Q}{D}.$$

Проинтегрировав, получим

$$\varphi = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{Dr} \int [r \int Q dr] dr.$$

По причине сложности задачи нахождение постоянных C_1 и C_2 может быть осложнено. Но в данном случае нахождение переменных не составляет труда.

Интегрированием выражения функции угла поворота нормали получаем выражение функции прогиба

$$w = -\int \varphi dr + C_3.$$

Постоянная интегрирования C_3 определяется из граничных условий для прогиба.

Таким образом, созданный испытательный стенд для бесконтактного исследования свободных колебаний замкнутых и разомкнутых цилиндрических оболочек позволяет экспериментально на небольших моделях тонкостенных замкнутых и разомкнутых оболочек с высокой достоверностью оценить воздействия температурных деформаций моделей на их свободные колебания, что позволит учитывать влияние температур на свободные колебания оболочек и точнее задавать запасы прочности при разработке проектов различных конструкций оболочечного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов, В. З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике / В. З. Власов. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.



2. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В. Д. Кубенко, П. С. Ковальчук, Т. С. Краснопольская. – Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.
3. Сысоев, О. Е. Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. – 2016. – № III-1(27). – С. 110-117.
4. Yu, Jin. Экспериментальное исследование эффекта влияния присоединенной массы на собственные частоты колебаний разомкнутой оболочки / Jin Yu, O. E. Сысоев, А. Ю. Добрышкин // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 20-21 апреля 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2016. – С. 241-246.
5. Добрышкин, А. Ю. Влияние отсоединенной массы на параболические строительные конструкции / А. Ю. Добрышкин, Ху Яфэнг, О. Е. Сысоев // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 26-27 ноября 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – С. 91-96.
6. Серёгин, С. В. Свободные колебания тонкой круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием / С. В. Серёгин, О. Е. Сысоев // Тезисы докладов 2-й Междунар. конф. «Живучесть и конструкционное материаловедение» (SSMS-2014, 21-23 октября 2014 г.) Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН. – М. – С. 66.
7. Антуфьев, Б. А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций: моногр. / Б. А. Антуфьев. – М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
8. Патент на полезную модель (РОСПАТЕНТ). Устройство для возбуждения механических колебаний / Серёгин С. В., Сысоев О. Е. – № 2014130510; зарег. 26.02.2015; приоритет от 22.06.2014. – 7 с.
9. Программное обеспечение для дистанционного измерения перемещений «Photodim 2D v 1.0» / В. А. Дзюба, А. В. Меньков, А. Л. Ковалев, О. Е. Сысоев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011.617204, 2011.