$$Э = 100{,}3 - 2690\,D + 2950 d_{шл} + 6{,}2 \cdot 10^{-5} P_{пит} + $$
$$+ 29 \cdot 10^{4}\, D d_{шл} - 82{,}5 \cdot 10^{4} d_{шл}^{2}. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8): $D, d_{шл}$ - *м*; $P_{пит}$ - *Па*.

Учитывая, что производительность по сливу единичных микроциклонов с $D \le 50$ мм, незначительна, с целью обработки необходимого объёма исходной суспензии их рекомендуется компоновать в батареи или мультициклоны, имеющие общее питание, разгрузку слива и шлама. Они получили широкое распространение в горнорудной, угледобывающей, химической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей, пищевой и микробиологической промышленности, а также в машиностроении [2,3]. По мере повышения технологических требований к разделяемым продуктам разрабатываются новые конструкции аппаратов, в которых сочетается комбинированное воздействие на исходную суспензию центробежного, электрического, электромагнитного, ультразвукового и других полей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шестов Р.Н. Гидроциклоны.-Л.: Машиностроение, 1967. - 80с.
2. Найденко В.В. Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах. Горький: Волго-Вятское кн. издательство, - 1976. - 287с.
3. Исследование и промышленное применение гидроциклонов: Тезисы докладов первого симпозиума. Горький - 1981. - 300с.

УДК 543.3: 621.532

Громыко О.В., Санюкевич Ф.М.

РАСЧЁТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦИКЛОННЫХ АППАРАТОВ

Для снижения массы циклонных аппаратов в конструкциях мультициклонов используют тонкие цилиндроконические оболочки. При работе с агрессивными средами их выполняют из химически стойких материалов: композитов, пластмасс. На пути подобного совершенствования конструкции встаёт проблема исследования динамических характеристик, так как частоты собственных колебаний оболочечной части системы снижаются и могут совпадать с частотами возмущающих воздействий, т.е. входить в зону резонанса. В результате амплитуды колебаний значительно увеличиваются, что существенно сказывается не только на эффективности работы самих аппаратов, но и на динамической прочности всей конструкции.

Исследование собственных колебаний оболочек циклонов проводили на базе уравнений теории оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига [1]. Для замкнутых в окружном направлении оболочек основные соотношения могут быть записаны для каждой n-й гармоники разложений факторов напряжённо-деформированного состояния в тригонометрические ряды Фурье по окружной координате.

Уравнения движения элемента оболочки в векторно-матричной форме имеют вид [2]:

$$[L_1]\{q_1\} + [L_2]\{q_2\} = \{p\}, \quad (1)$$

где $[L_1], [L_2]$ - операторные матрицы размерностью 5*5; $\{q_1\} = (T_1 T_{12} N_1 M_1 M_{12})^T$, $\{q_2\} = (T_{21} T_2 N_2 M_{21} M_2)^T$ - векторы внутренних сил и моментов; $\{p\} = (p_1 p_2 p_3 p_4 p_5)^T$ - вектор внешних нагрузок.

В задачах динамики при отсутствии внешних сил в соответствии с принципом Даламбера

$$\{p\} = -[\bar{m}]\frac{\partial}{\partial t^2}\{\delta\}, \quad (2)$$

где $[\bar{m}]$ - матрица инверционных характеристик размерностью 5*5; $\{\delta\} = (uvw\varsigma_1\varsigma_2)^T$ - вектор смещений точек средней поверхности оболочки.

Связь компонент векторов $\{q_1\}$ и $\{q_2\}$ с компонентами векторов деформированного состояния $\{l_1\} = (\varepsilon_1\omega_1\gamma_1 x_1\tau_1)^T$ и $\{l_2\} = (\varepsilon_2\omega_2\gamma_2 x_2\tau_2)^T$ записывается в форме физических соотношений.

$$\{q_1\} = [B_1]\{l_1\} + [B_2]\{l_2\},$$
$$\{q_2\} = [B_3]\{l_1\} + [B_4]\{l_2\}, \quad (3)$$

где $[B_i]$ ($i=1,\ldots,4$) – матрицы жесткостей размерности 5*5.

Для обеспечения замкнутости системы уравнений добавим геометрические соотношения, описывающие дифференциальную связь деформаций с компонентами вектора $\{\delta\}$:

$$\{l_1\} = [L_3]\{\delta\}, \{l_2\} = [L_4]\{\delta\} \quad (4)$$

где $[L_3], [L_4]$ - операторные матрицы размерностью 5*5.

Решение отыщем в форме периодических функций

$$\{\delta\} = \{\bar{\delta}\}e^{j\omega t}, \quad (5)$$

где ω - круговая частота собственных колебаний; $\{\bar{\delta}\}$ - амплитудное значение вектора $\{\delta\}$; $j = \sqrt{-1}$.

Последовательно исключая векторы $\{q_1\}$ и $\{q_2\}$ из соотношений (1)…(5), получаем обыкновенное дифференциальное матричное уравнение колебаний

$$[A_1]\frac{d^2}{dx^2}\{\bar{\delta}\} + [A_2]\frac{d}{dx}\{\bar{\delta}\} + [A_3]\{\bar{\delta}\} = , \quad (6)$$
$$= \omega^2[\bar{m}]\{\bar{\delta}\}$$

где x – меридиональная координата оболочки.

Дополняя систему дифференциальных уравнений (6) граничными условиями [2], получаем краевую задачу на собственные значения. Решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка вдоль меридиональной координаты x осуществлялось методом конечных разностей

Санюкевич Федор Михайлович. *Доцент каф. “Машиноведения” Брестского государственного технического университета.*
Громыко О.В.
БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.

[3].

В результате получена разрешающая система однородных алгебраических уравнений

$$([K]-\omega^2[M])\{\Delta\}=0\,, \qquad (7)$$

где *[K], [M]* - глобальные матрицы жёсткости и масс оболочки, записанные для случая n волн в окружном направлении; *{Δ}* – глобальный вектор амплитуд смещений точек срединной поверхности оболочки.

Нетревиальное решение системы уравнений (7) может быть получено в том, и только в том случае, когда

$$D = det([\ K\ ]-\omega^2[\ M\ ])=0\,. \qquad (8)$$

Поиск соответствующих соотношению (8) собственных частот ω осуществлялся путём фиксации моментов смены знака определителя D [4]. Для каждой из найденных частот ω_i по соотношению (7) вычислялись собственные формы колебаний.

Оболочка циклонного аппарата включает две области, отличающиеся своей геометрией: цилиндрическую и коническую. Исследовались собственные колебания цилиндрической и конической областей при закреплении конструкции за зону их сопряжения.

В первом расчётном случае рассматривалась цилиндрическая консольно закреплённая оболочка (рисунок 1), относительная толщина которой $h/R=0{,}01$, а относительная длина $L/R=2{,}23$. Расчёт проведён для трёх тонов собственных колебаний при числе волн в окружном направлении n от 0 до 8. Результаты исследования в безразмерной форме сведены в таблицу 1. Как показал анализ, собственные частоты реальных оболочек циклонных аппаратов могут принимать малые значения, соизмеримые с частотами возмущающих периодически изменяющихся воздействий. При этом необходимо учитывать, что дополнительные массы, установленные на аппарате, приводят к дальнейшему снижению собственных частот.

Основной частью циклона является элемент в форме конической оболочки (рисунок 2).

Расчёт проведён для относительных размеров $h/r=0{,}0094$, $L/r=3{,}756$, $\beta=20°$. Результаты приведены в форме безразмерного частотного параметра $\lambda=\omega^2\rho^2L^2/E(1-\nu^2)$ (таблица 2), где ρ, E, ν - соответственно плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки. Поскольку низшие значения частот соответствуют числу волн в окружном направлении от 4 до 6, в таблице 2 представлены результаты расчёта при $n=5$.

На рисунке 3 представлены различные варианты закрепления циклонных аппаратов. Соотношение низших тонов собственных колебаний для этих случаев можно дать априорно. Самое высокое значение тона колебаний соответствует варианту (а), низкое - (д). Частоты колебаний для вариантов (б), (в) и (г) занимают промежуточное положение между случаями (а) и (д). Отметим, что вариант (в) соответствует проведенным расчётам по схемам, изображённым на рисунке 1 и 2. Численные значения для случаев (а), (б), (г), (д) можно получить с использованием изложенного алгоритма, рассматривая сопряжённые цилиндрический и конический участки циклона.

Таблица 1

Частотный параметр λ

n	Номер тона, k		
	$k=1$	$k=2$	$k=3$
0	2,5546	5,5073	5,6006
1	0,3508	2,5036	4,1425
2	0,0964	0,9864	2,8386
3	0,0271	0,4270	1,6269
4	0,0201	0,2167	0,9345
5	0,0328	0,1423	0,5880
6	0,0632	0,1343	0,4297
7	0,1162	0,1709	0,3836
8	0,1989	0,2482	0,4172

Таблица 2

Частотный параметр λ при $n=5$

K	1	2	3	4	5
λ	0,0534	0,1943	0,7074	1,6119	2,6286

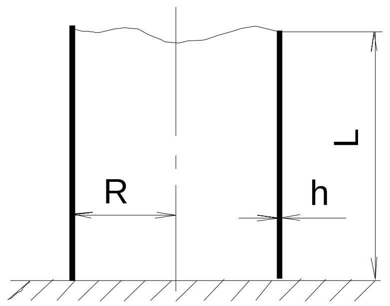


Рисунок 1. Цилиндрическая консольно закрепленная оболочка

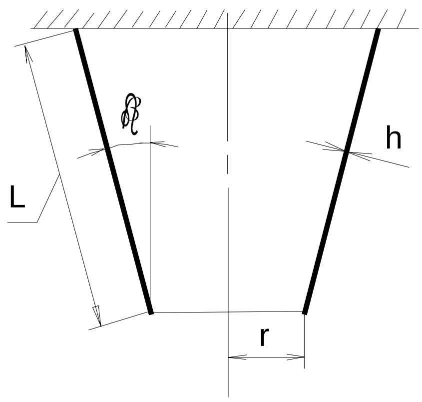
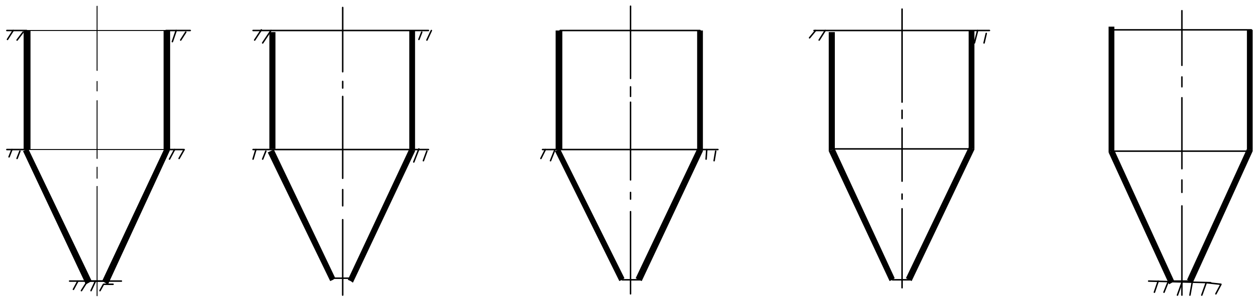


Рисунок 2. Элемент в форме конической оболочки

Разработанный метод расчёта и проведенные исследования позволяют дать рекомендации по проектированию оболочек циклонных аппаратов, способствующие их устойчивой работе и динамической прочности конструкции.



а) б) в) г) д)

Рисунок 3. Различные варианты закрепления циклонов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Палий О.М., Спиро В.Е. Анизотропные оболочки в судостроении. –Л.: Судостроение, 1977. – 392с.
2. Громыко О.В. Исследование элементов тонкостенных конструкций, образованных системой стержней, с использованием континуальной модели. – Труды МВТУ. – М., 1982, № 373, с.72-79.
3. Молчанов И.Н. Численные методы решения некоторых задач теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1979. – 316с.
4. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций / А.В. Карамшин, В.А. Лясковец и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 376с.

УДК 620.179.16

Костюк Д.А., Кузавко Ю.А.

ОСОБЕННОСТИ ГРАНИЧНОГО ОТРАЖЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН ОТ ДИССИПАТИВНОЙ СРЕДЫ

Теоретически рассмотрено отражение непрерывных и импульсных поперечных акустических волн от границы твердого тела с диссипативной жидкостью. Показана существенная зависимость коэффициентов отражения сигнала и его фазы от значения сдвиговой вязкости диссипативной среды. Определена программными средствами форма отраженного импульсного сигнала. Приведен коэффициент прохождения акустическим сигналом границы раздела таких сред и его фаза.

Отражение непрерывных и импульсных акустических сигналов изучено теоретически и экспериментально достаточно подробно [1,2], при этом для частного случая нормального отражения поперечной волны (ПВ) от границы твердого тела с жидкостью всегда считалось, что отражение является полным в силу невозможности распространения ПВ в жидкости. Нами в работах [4 – 6] изучалось теоретически отражение непрерывных и импульсных продольных акустических сигналов от границы твердого тела с сильно диссипативной средой (СДС), результаты которого подтвердились экспериментально [6] при акустических исследованиях слоистой структуры оргстекло – эпоксидная смола (ЭС) при отвердении последней. Поразительным эффектом были значительные изменения коэффициента отражения (в 8.5 раз) при отвердении компаунда, приготовленного в объемном соотношении 4:1 ЭС и отвердителя. Представляет несомненный интерес развитие проведенных исследований и их обобщение на распространение поперечных волн в таких слоистых структурах. Отметим, что в жидкости распространение ПВ невозможно [2, 3]. Тем не менее, следует ожидать влияния состояния отражающей СДС на спектральные характеристики отраженных сигналов. В реальной жидкости помимо объемной вязкости всегда имеет место сдвиговая вязкость, которая обеспечивает проникновение ПВ в жидкость, быстро затухающих в ней, а при малых жидкостных зазорах между твердыми телами обуславливает и прохождение таких колебаний. Таким образом, при отражении ПВ от плоской границы раздела твердого тела с реальной достаточно вязкой жидкостью возможно возникновение некоторых особенностей для коэффициента отражения акустического сигнала, ранее не рассматривавшие и составившие цель данной работы.

Пусть в твердом теле без затухания распространяется непрерывная плоская гармоническая ПВ, которая при нормальном падении на границу с вязкой жидкостью частично отражается, а прошедшая ПВ в жидкости очень быстро затухает. Волновые уравнения для ПВ в твердом теле (1) и диссипативной среде (2) имеют следующий вид [1]:

$$\rho_1 u_{1y} = \mu_1 u_{1y,xx} \qquad (1)$$

$$\rho_2 u_{2y} = \eta_2 u_{2y,xxt} \qquad (2)$$

где u_y – компонента поперечного смещения в ПВ, μ_1 – второй коэффициент Ламэ, ρ – плотность, η_2 – сдвиговая вязкость, $u_{1y,xx}=\partial^2 u_{1y}/\partial x^2$, $u_{2y,xxt}=\partial^3 u_{2y}/\partial^2 x\partial t$.

Решения для падающей (I), отраженной (R) и прошедшей (T) ПВ ищем в виде [2]:

$$\begin{aligned} u_1^I &= u_{01}^I \exp[i(k_1 x - \omega t)], \\ u_1^R &= u_{01}^R \exp[i(-k_1 x - \omega t)], \\ u_2^T &= u_{02}^T \exp[i(k_2 x - \omega t)], \end{aligned} \qquad (3)$$

где $k_1=\omega/S_{1t}$, $k_2^2=i\rho_2\omega/\eta_2$ – волновые числа, S_{1t} – скорость ПВ, ω – частота, t – время.

Граничные условия при $x=0$ представляют собой непрерывность упругих смещений и напряжений на границе сред и имеют вид:

Костюк Дмитрий Александрович. *Аспирант каф. ЭВМиС Брестского государственного технического университета. БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.*
Кузавко Юрий Алексеевич. *К. ф-м.н., член-кор. МАИ, коммерческий директор ООО НПК "СЭТ".*