

УДК 629.4.015:625.03

В.С. Речкалов, С.Д. Речкалов, В.В. Ильчишин, М.И. Соляник

РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧКИ КОТЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Приведены расчетные зависимости для исследования вертикальных колебаний оболочки котла, в которой учитываются: конструктивные особенности котла, как упругой оболочки, подкрепленной шпангоутами; влияние жидкого груза.

Введение. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что динамика и прочность вагонов-цистерн, котлы которых представляют собой достаточно гибкие цилиндрические оболочки, во многом отличающиеся от вагонов других типов.

В процессе эксплуатации котлы-цистерны подвергаются весьма интенсивным и сложным воздействиям, приводящим к появлению трещин в отдельных элементах, Основной причиной этих разрушений, как показано в работе [1], являются интенсивные изгибные колебания котла. Кроме того, вагоны-цистерны, как правило, перевозят грузы повышенной (нефтепродукты), высокой (жидкие, газообразные продукты) и особо высокой (хлор, азот и т.п.) степени опасности. Использование традиционного подхода, сводящегося к введению динамических коэффициентов, в ряде случаев не дает возможности учесть специфику поведения наддресорного строения при различных условиях нагружения.

Однако при проектировании таких конструкций необходим предварительный тщательный динамико-прочностной анализ, что требует проведения более детальных теоретических исследований, создание более полных расчетных схем, учитывающих различные особенности конструкции, разработки углубленных математических моделей, находящихся в условиях динамического стохастического воздействия и требующих методов статистической динамики.

Цель работы: получение расчетных зависимостей для котлов железнодорожных вагонов-цистерн, представляющих замкнутые цилиндрические оболочки, закрытые с торцов эллиптическими днищами, обладающие рядом особенностей. К основным из которых следует отнести то, что в отличие от пластин и стержней, где наименьшим собственным частотам соответствуют формы колебаний без узловых линий, в оболочках, закрепленных так, что деформация их невозможна без растяжения срединной поверхности, наименьшие частоты имеют колебания с узловыми линиями.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

© Речкалов В.С., Речкалов С.Д., Ильчишин В.В., Соляник М.И. , 2018

Материал и результаты исследований. Разработаны расчетные зависимости для исследования колебаний вагона – цистерны. Расчетная схема вагона-цистерны (рис. 1) представлена в виде упругой оболочки, закрытой с торцов абсолютно жесткими в своей плоскости днищами, на пятниковые узлы которой действуют динамические силы.

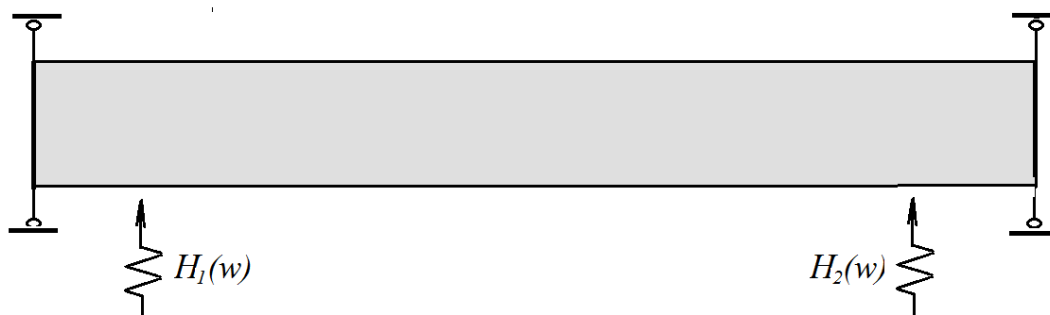


Рис.1. Расчетная схема котла вагона-цистерны

Сложность расчета на динамическое воздействие неизмеримо возрастает, если учесть упругость кузова и волновые процессы жидкого груза. В дальнейшем, используя вывод о том, что при небольших недоливах котла цистерны $0,1R$ (R – внутренний радиус котла) волновые процессы на поверхности жидкого груза практически не оказывают влияния на динамику и изгибные колебания котла [2, 3], поэтому рассматривается котел, полностью заполненный жидкостью.

За обобщенные координаты принимаются радиальные W перемещения оболочки (рассматривается полубезмоментная теория оболочек).

При определении потенциальной и кинетической энергий для котла используется методика расчета динамических характеристик котлов цистерн [4, 5], разработанная в МИИТе, которая базируется на гипотезе полубезмоментной теории оболочек, а расчетные зависимости выводятся на основе метода Ритца.

С учетом расчетной схемы котла поле радиальных перемещений точек срединной поверхности оболочки задается рядом:

$$W = \sum \sum W_{m,n}(t) \sin(\lambda \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \beta), \quad (1)$$

где $W_{m,n}(t)$ - коэффициенты ряда, зависящие от t

$$\lambda = \frac{m \cdot \pi}{L}; \quad (2)$$

m - номер члена ряда при разложении перемещения вдоль образующей оболочки;

L - длина цилиндрической части оболочки;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

x - координата, отсчитываемая от левой опорной диафрагмы вдоль котла;
 n - номер члена ряда при разложении перемещения ПО дуге оболочки;
 β - угловая координата, отсчитываемая против движения часовой стрелки от нижнего конца вертикального диаметра.

Используя геометрические гипотезы полубезмоментной теории оболочек:

$$\varepsilon_2 = \frac{\partial \mathcal{G}}{R \cdot \partial \beta} + \frac{W}{R} = 0; \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\partial u}{R \cdot \partial \beta} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x} \quad (4)$$

где ε_2 - относительное удлинение в кольцевом направлении;
 \mathcal{G} - тангенциальное перемещение точек срединной поверхности оболочки;
 γ - относительный сдвиг срединной поверхности;
 u - продольные перемещения точек срединной поверхности;
 R - радиус срединной поверхности,
 поле перемещений цилиндрической части котла определится в виде следующего вектора перемещений:

$$\vec{W} = \begin{vmatrix} \sin(\lambda \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \beta) \\ -R \cdot \frac{\lambda}{n^2} \cdot \sin(\lambda \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \beta) \end{vmatrix}, \quad (5)$$

а матрица жесткости - путем минимизации потенциальной энергии деформации

$$[r] = \int_v [B]^T \times [D] \times [B] dv, \quad (6)$$

где $[B]$ - матрица поля деформаций,

$$[B] = \begin{vmatrix} \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} + 1 \right) & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \sin(\lambda \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \beta) \\ -R \frac{\lambda}{n^2} \cos(\lambda \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \beta) \end{vmatrix}, \quad (7)$$

$[D]$ - матрица коэффициентов жесткости:

$$[D] = \begin{vmatrix} \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 + \mu^2)} & 0 \\ 0 & \frac{E \cdot h}{1 - \mu} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Для оболочки котла с переменной по дуге окружности толщиной обечаек, матрица жесткости имеет вид:

$$[r]_0 = \int_0^L \left(\sum_K \int_{\beta_K} ([B]_K^T \times [D]_K \times [B]_K \times R \cdot d\beta) \cdot dx, \quad (9)$$

где $[D]_K$ - матрица жесткости К-ой панели;

β_K - угловая ширина К-ой панели, определяемая как разность угловых координат верхней и нижней кромок панели.

Поле перемещений для i -го шпангоута, при условии, что он испытывает изгиб только в своей плоскости, определяется выражением:

$$\vec{W}_{\omega i} = |\sin(\lambda \cdot x_i) \cdot \cos(n \cdot \beta)| \times \vec{W}_{m,n}(t), \quad (10)$$

где x_i - координата установки шпангоута.

Матрица жесткости для i -го шпангоута со ступенчато изменяющимся по окружности поперечным сечением, по аналогии с формулой (9), определится выражением:

$$[r]_{\omega i} = \sum_l \left(\int_{R\beta_0} [B]_{\omega i}^T \times [D]_{li} \times [B]_{\omega i} \times R \cdot d\beta, \quad (11)$$

где l - число участков, на которые разбит шпангоут;

$[D]_{li}$ - жесткость l -го участка шпангоута,

$$[D]_{li} = |E \cdot J_{\omega i}|, \quad (12)$$

$R\beta_l$ - длина l -го участка шпангоута.

Матрица жесткости оболочки котла, с учетом дискретного подкрепления ее шпангоутами, будет равна сумме:

$$[r]_K = [r_0] + \sum_i [r]_{\omega i}, \quad (13)$$

тогда потенциальная энергия котла со шпангоутами будет равна:

$$P_K = \{W_{m,n}\}^T \times [r]_K \times \{W_{m,n}\}. \quad (14)$$

При выводе кинетической энергии предполагается, что кинетическая энергия оболочки (T_0), шпангоутов (T_{ω}), а также сосредоточенных масс (T_M), установленных на котле цистерны, определяется скоростями радиальных перемещений. В соответствии с [5]:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$T_0 = \int_0^l \left(\sum_K \int_{\beta_K} \left(\frac{\gamma \cdot h_K}{2 \cdot g} W^2 \cdot R \cdot d\beta \right) dx, \quad (15)$$

$$T_u = \sum_i \sum_l \int_{\beta_l} \frac{\gamma \cdot F_{li}}{2 \cdot g} \cdot W_i^2 \cdot R \cdot d\beta, \quad (16)$$

$$T_M = \sum_j \frac{1}{2} \cdot M_j \cdot W_j^2, \quad (17)$$

Расчетные зависимости кинетической энергии для жидкого груза получены из условия, что жидкость идеальная, полностью заполняет котел, на поверхности контакта оболочки и жидкости соблюдается условие непроницаемости, колебания жидкости малые и, кроме того, в центре жидкой фазы колебания отсутствуют [5]:

$$T_{ж} = \frac{R \cdot \gamma_{ж}}{2 \cdot g} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^R \left(\sum_m \sum_n \sum W_{m,n} \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^{n-1} \cdot \cos(n \cdot \beta) \cdot \sin(\lambda \cdot x) \right)^2 \cdot dr \cdot d\beta \cdot dx \quad (18)$$

где γ - удельная масса материала котла и шпангоутов;

g - ускорение свободного падения;

W - скорость движения точек срединной поверхности i -го шпангоута;

M_j - масса j -ой детали, подвешенной на котле;

$\gamma_{ж}$ - удельная масса жидкости;

r - текущее значение радиальной координаты.

Суммарная кинетическая энергия котла вагона равна сумме кинетических энергий элементов, относящихся к котлу:

$$T_k = T_0 + T_u + T_M + T_{ж}. \quad (19)$$

Вводя силы P_1 и P_2 , отображающие взаимодействие котла с соединительными балками, и после подстановки формул для кинетической и потенциальной энергий в уравнение (20), получим следующую систему дифференциальных уравнений, которую запишем в матричном виде:

$$[t] \{W_{m,n}(t)\} + [r] \times \{W_{m,n}(t)\} = \{P_1(t), P_2(t)\}; \quad (20)$$

где $[t]$, $[r]$ - матрицы инерции и жесткости котла как подкрепленной шпангоутами упругой оболочки;

Матрицы жесткости и инерции для котла имеют размерность $(m \cdot n)$, которая обусловлена переменными поперечными сечениями оболочки и шпангоутов.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Пренебрегая в этих матрицах побочными членами, получающимися вследствие нарушения ортогональности разложения в тригонометрический ряд радиальных перемещений по дуге оболочки, получим матрицы размерности $(m \cdot m)$, число которых определяется количеством удерживаемых гармоник по n . При фиксированных значениях m и n члены рассматриваемых матриц определяются по формулам [4]:

$$\begin{aligned}
 t_{i,i} = & \left(\sum_K \frac{\gamma_0 R h_K L}{2g} \left[\frac{\beta_K}{2} + \frac{1}{4n} (\sin 2n\beta_{2K} - \sin 2n\beta_{1K}) \right] \right) + \\
 & + \left(\sum_i \sum_l \frac{\gamma_{ш} F_{li} R}{g} \sin^2 \lambda x_i \left[\frac{\beta_l}{2} + \frac{1}{4n} (\sin 2n\beta_l - \sin 2n\beta_{1l}) \right] \right) + \frac{\gamma_{ж} \pi R^2 L}{2gn} + \quad (21) \\
 & + \sum_j M_j \sin^2 \lambda x_j \cos^2 n\beta_j;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_{i,i} = & \left(\sum_K \frac{D_K L}{2R^3} (n^2 - 1)^2 \left[\frac{\beta_K}{2} + \frac{1}{4n} (\sin 2n\beta_{2K} - \sin 2n\beta_{1K}) \right] \right) + \\
 & + \left(\sum_K \frac{B_K R^3 L \lambda^4}{2n^4} \left[\frac{\beta_K}{2} + \frac{1}{4n} (\sin 2n\beta_{2K} - \sin 2n\beta_{1K}) \right] \right) + \quad (22) \\
 & + \left(\sum_i \sum_l \frac{EI_l}{R^3} (n^2 - 1)^2 \sin \lambda x_i \left[\frac{\beta_l}{2} + \frac{1}{4n} (\sin 2n\beta_{2l} - \sin 2n\beta_{1l}) \right] \right)
 \end{aligned}$$

$$r_{i,j} = \sum_i \sum_l \sum_l \frac{EI_l}{R^3} (n^2 - 1)^2 \sin \lambda x_i \sin \lambda x_j \left[\frac{\beta_l}{2} + \frac{1}{4n} (\sin 2n\beta_{2l} - \sin 2n\beta_{1l}) \right] \quad (23)$$

где D_K - жесткость k -ой панели оболочки на изгиб;

B_K - жесткость k -ой панели в продольном направлении;

γ_0 - удельная масса материала оболочки и шпангоутов;

K - число обечаек котла с постоянной толщиной;

h_K - толщина k -ой панели оболочки;

β_{1K}, β_{2K} - угол начала и конца кромок K -ой панели;

$\gamma_{ж}$ - удельная масса перевозимого груза;

M_j - масса j -ой детали подвешенной на вагоне;

$\gamma_{ш}$ - удельный вес материала шпангоутов;

F_{li} - площадь поперечного сечения l -го участка i -го шпангоута;

x_j, β_j - линейная и угловая координата установки j -ой детали;

g - ускорение свободного падения.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Выводы. Для исследования колебаний цистерны получены расчетные зависимости с учетом физических свойств и следующих допущений:

- жесткость котла при ограниченной величине деформаций остается постоянной;
- демпфирование колебаний оболочки слабое;
- параметры системы не изменяются с течением времени.

Допущение о малости демпфирования не вносит существенных погрешностей, так как логарифмический декремент затуханий для котла не превышает (0,1 - 0,3) [2].

ЛИТЕРАТУРА

6. Осипов Т.А. Исследование динамических параметров большегрузных цистерн и напряженного состояния их подкрепленных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М: МИИТ., 1967г. – 246 с.
7. Черкашин Ю.М. Исследования динамики цистерн с учетом колебаний жидкости. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М. 1971.
8. Лазарян В.А. Динамика вагонов. – М: Транспорт, 1964. – 250 с.
9. Котуранов В.Н., Кирьянова Г.А., Морзинова Т.Г. Упругие колебания подкрепленных оболочек цистерн. МИИТ-М.; 1982 - 12с: Деп. в МИИТе 22.10.82, № 2040.
10. Морзинова Т.Г. «Колебания оболочек котлов цистерн с учетом их конструктивных особенностей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., МИИТ: 1983, УДК 629. 463.3: 629.4.015: 625.032.434 (043.3). – 118с.