

УДК 539.3

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОТЛА ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ С ЛЕЖНЕВЫМИ ОПОРАМИ

© 2011 И.Г. Емельянов¹, В.И. Миронов¹, А.В. Якушев², А.В. Кузнецов¹

¹ Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

² ОАО «НВЦ «Вагоны», г. С-Петербург

Поступила в редакцию 15.03.2011

Методом контактных элементов решена задача по определению двумерной области контакта для тонкой оболочки, лежащей на сплошном или дискретном основании, и распределения контактных усилий.

Ключевые слова: *контактная задача, оболочка, основание, давление*

Развитие добывающих отраслей способствует все более широкому применению железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов и других жидких грузов, среди которых значительную долю составляют опасные. В целях обеспечения безопасности движения к цистернам предъявляются повышенные требования в отношении расчетного давления внутри резервуара, толщины стенок, применяемых материалов, устойчивости цистерн и др. В проектных расчетах конструкции проводится конечноэлементный анализ прочности ее элементов, ответственные узлы проверяются в натурных испытаниях. Тем не менее, в эксплуатации наблюдаются усталостные разрушения литых деталей тележки, стяжных хомутов и лап крепления котла к хребтовой балке, течи резервуара. В ряде работ авторов рассматривались вопросы оценки прочности и ресурса различных элементов конструкции вагона-цистерны [1-4]. Конечноэлементный расчет НДС выявил опасные зоны повышенных напряжений в обечайке котла, лежневой опоре, стяжных хомутах и литых деталях тележки. Для разработки модели достаточно сложной конструкции вагона-цистерны использовался вычислительный комплекс COSMOS. Модель позволила сделать заключение о прочности конструкции и провести многовариантные расчеты по ее

доработке. В тоже время не установлено убедительных причин эксплуатационного разрушения элементов лежневой опоры, стяжных хомутов, лап крепления котла к хребтовой балке.

Развитие численных методов решения систем дифференциальных уравнений, совершенствование вычислительных технологий и стремительный рост возможностей современных ЭВМ позволяют с высокой точностью определить поле напряжений в деталях сложной формы в пределах упругих деформаций. Проблема здесь кроется в корректной постановке граничных условий, определяемых контактным взаимодействием элементов сложной конструкции. Повышение точности решения контактной задачи опоры котла на лежневую опору имеет целью предотвратить, прежде всего, разрушение обечайки. Разрушение деревянных брусков (или полиуретановых прокладок) между оболочкой и опорой не является предельным состоянием конструкции в целом. Но последующее ослабление крепежных хомутов приводит к динамическим нагрузкам и разрушению хомутов и крепежной лапы, приваренной к днищу котла и соединяющей его с хребтовой балкой [5]. Необходимо решить контактную задачу, чтобы корректно описать передачу нагрузки от котла на лежневые опоры, оценить прочность прокладочных элементов и найти возможную локализацию напряжений в цистерне, которая может определять ресурс всей конструкции.

В работе [4] в одномерной постановке решена контактная задача моделирующая передачу нагрузки от котла вагона-цистерны на лежневые опоры. При решении использовался метод контактных элементов, который широко применяется при решении контактных задач для оболочек вращения, взаимодействующих с упругими или жесткими основаниями [6].

Емельянов Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник. E-mail: Emeljanov@imach.uran.ru

Миронов Владимир Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Якушев Алексей Вячеславович, кандидат технических наук, руководитель группы. E-mail: avyakushev@ya.ru

Кузнецов Алексей Викторович, научный сотрудник. E-mail: Alekseikuz@rambler.ru

В работе [4] определена одномерная область контакта и распределение по ней контактных усилий, а затем напряженное состояние и долговечность оболочки.

В предлагаемой работе задача обобщается на двумерную область контакта. Таким образом, задача состоит из определения двумерной области контакта для тонкой оболочки, лежащей на сплошном основании, и определения распределения контактных усилий. Предлагаемая задача имеет как прикладное значение – определяются контактные усилия в двумерной области для реальной конструкции котла вагона-цистерны, которые влияют на напряженное состояние всей конструкции, так и фундаментальное значение – разработанный ранее численный метод контактных элементов применяется для новой задачи.

Представим срединную поверхность котла вагона-цистерны в виде оболочки вращения, лежащей на жестком основании (рис. 1). Между оболочкой и основанием имеется упругая прокладка. Координатную поверхность оболочки вращения отнесем к криволинейной ортогональной системе s, θ , где s – длина дуги меридиана, θ – центральный угол в параллельном круге. Линии $s=const, \theta=const$ являются линиями главной кривизны. Воспользуемся классической теорией оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа-Лява. В этом случае задача определения напряженного состояния оболочки описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных [6, 7]:

$$\frac{\partial \bar{Y}}{\partial s} = \sum_{m=0}^4 A_m(s, \theta) \frac{\partial^m \bar{Y}}{\partial \theta^m} + \bar{f}(s, \theta), \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \{ N_x, N_z, \hat{S}, M_s, u_x, u_z, v, \theta_s \},$$

где N_r, N_z – радиальное и осевое усилия; u_r, u_z – аналогичные перемещения; \hat{S} – сдвигающее усилие; M_s – меридиональный изгибающий момент; v – окружное перемещение; θ_s – угол поворота нормали. Элементы матрицы A_m зависят от геометрических и механических характеристик оболочки.

Раскладывая компоненты внешней нагрузки и искомые функции в системе (1) в ряды Фурье по окружной координате θ и разделяя переменные для каждого члена разложения, имеем разрешающую систему обыкновенных дифференциальных уравнений восьмого порядка [6, 7]. Добавляя граничные условия, данная система может быть проинтегрирована численно. Решение задачи состоит в

нахождении распределения контактного давления между оболочкой и основанием $q(\theta, s)$ в зависимости от окружной координаты, определяемой углом θ и меридиональной координаты s , и области контакта $\Omega_+(\theta, s)$. При изменении внешней нагрузки P (вес оболочки и груза, избыточное давление и др.) в силу упругости оболочки область контакта Ω_+ может изменяться. Возможно также образование зон отставания в меридиональном и окружном направлениях.

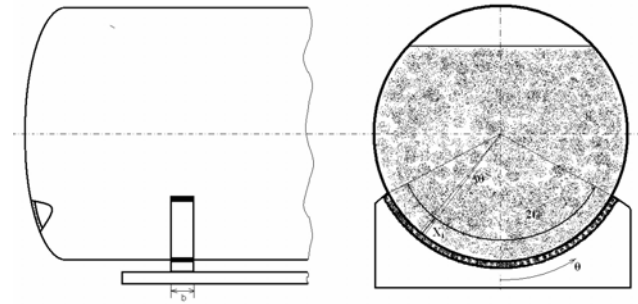


Рис. 1. Срединная поверхность котла вагона-цистерны

При решении рассматриваемой задачи с неизвестной границей области Ω_+ , необходимо искомую область дополнить областью Ω_- до некоторой известной области Ω . Следовательно,

$$\Omega = \Omega_+ + \Omega_-$$

где Ω – физически допустимая область контакта. При этом

$$\Omega = 2t_\theta \times b,$$

где $2t_\theta$ и b – максимальные размеры области контакта в окружном и меридиональном направлениях.

Проведем дискретизацию области Ω ($N \times K$) прямоугольными криволинейными элементами (N, K – число элементов по окружности и меридиану). Для этого область Ω разобьем на участки в меридиональном направлении, а полученные кольца разделим на одинаковое количество элементов по окружности. На каждом полученном элементе примем постоянное значение контактного давления $q \geq 0$. Следовательно, взаимодействие между оболочкой и основанием можно представить определенным количеством усилий X_{ij} , приложенных на каждом элементе

$$q_{ij} = X_{ij} A^{-1}, \quad i = 1 \dots N, j = 1 \dots K,$$

где $A=a_\theta \times a_s$ (a_θ, a_s – линейные размеры по окружности и меридиану) – площадь контактного элемента.

Для определения усилий взаимодействия используем классический смешанный метод строительной механики [7]. Учитывая наличие упругой прокладки между оболочкой и основанием, уравнения для первого кольца будут иметь вид [4, 6]

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \delta_{1i} X_i^{(1)} - Z^{(1)} \cos \theta_1 + D X_1^{(1)} = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N \delta_{Ni} X_i^{(i)} - Z^{(i)} \cos \theta_N + D X_N^{(i)} = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N \cos \theta_i X_i^{(1)} = P^{(1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь δ_{ij} – перемещение в основной системе координат по направлению i связи от единичного усилия, введенного по направлению отброшенной j связи; $Z \cos \theta_i$ – перемещение в основной системе по направлению отброшенной i связи, происходящее от единичного перемещения по направлению введенной связи; X_i – неизвестные усилия взаимодействия. В системе (2) индекс в скобках обозначает номер кольца, $P^{(1)}$ – нагружение первого кольца.

В системе (2) D есть оператор, связывающий реактивное усилие i точки поверхности прокладки и ее перемещение. Оператор D является аналогом параметра регуляризации, применяемым в аналитических методах решения контактных задач теории оболочек [8]. Для рассматриваемой задачи будем использовать простейшую модель линейно-деформированного основания (прокладки) – модель Винклера, и следовательно

$$D = \frac{1}{CA}$$

где C – коэффициент постели.

Податливость оболочки δ_{ij} в системе (2) определяется от единичного усилия, действующего на каждом контактном элементе. Поскольку у нас исследуется двумерная область, то учтем влияние оставшихся $K-1$ колец на первое, как это делается при решении двумерных задач [7, 9] и найдем искомое распределение давлений на площадке контакта котла с опорой. Поскольку возможны отставания оболочки от основания, то затем необходимо применять итерационные процедуры поиска реальной области контакта, которая зависит от

геометрических и упругих параметров конструкции и величины нагрузки P [6, 7, 9].

С использованием предлагаемого подхода рассмотрено контактное взаимодействие цилиндрической части оболочки котла вагона-цистерны, лежащей на опорах (рис. 1). При расчете принимались – внешний радиус цилиндрической оболочки $R=1,50$ м, радиус основания $R=1,50$ м, толщина стенки $h=0,06$ м, модуль упругости $E=2,1 \times 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. Главный вектор внешней нагрузки, действующий на опору, приложен вертикально и равен $P=4,5 \times 10^5$ Н. Оболочка лежит на жестком основании, расположенном симметрично относительно контуров шириной $b=0,25$ м. Длина основания вдоль окружной координаты $2t_\theta$ стягивается углом 120° . Между основанием и оболочкой имеется прокладка. Граничные значения коэффициента постели $C=(10^8-10^{11})$ Н/м³ характерны для вакуумной резины и абсолютно жесткого основания. Граничные условия приняты в виде жесткого защемления по обоим контурам

$$u_x = u_z = v = \theta_s = 0 \quad (s = s_0, s_L)$$

На рис. 2 показано распределение контактного давления q по области Ω . Длина области контакта $2t_\theta$ разбивалась углами равными $\Delta\theta = 2^\circ$ ($N=60$). Длина области контакта в меридиональном направлении $b=0,25$ м делилась на пять контактных элементов ($K=5$). Для лучшего восприятия распределения контактного давления q по области Ω рисунок сделан с увеличенным в 5 раз размером контактного элемента a_s . Упругие свойства основания – прокладки ($C=10^8$ Н/м³ позволяют получить достаточно плавное распределение контактного давления q по всей области Ω . При повышении жесткости основания в тысячу раз ($C=10^{11}$ Н/м³) можно считать, что контакт происходит с абсолютно жестким основанием. Данный расчетный случай показан на рис. 2. На рисунке видно наличие на границе области контакта локальных сил, что соответствует классическим решениям теории контактных задач для оболочек [9]. Наличие таких локальных сил может определять прочность и устойчивость оболочечных конструкций, и, следовательно, в этом месте может зарождаться усталостная трещина, которая будет определять общий ресурс конструкции.

Дискретная опора оболочки в виде деревянных брусков меняет характер распределения давления, но максимальное значение в крайних брусках не превышает 3 МПа. В испытаниях на сжатие сосновых брусков попе-

рек волокон разрушающее давление составляет по нашим данным 6-8 МПа, следовательно, статическая прочность брусков обеспечена. В эксплуатации бруски выдерживают также нагрузки, связанные с вертикальной динамикой и движением в кривых, а имеющиеся случаи разрушения носят усталостный характер. Для определения долговечности прокладок нужны натурные усталостные испытания при параметрах цикла давления, определенных решением контактной задачи.

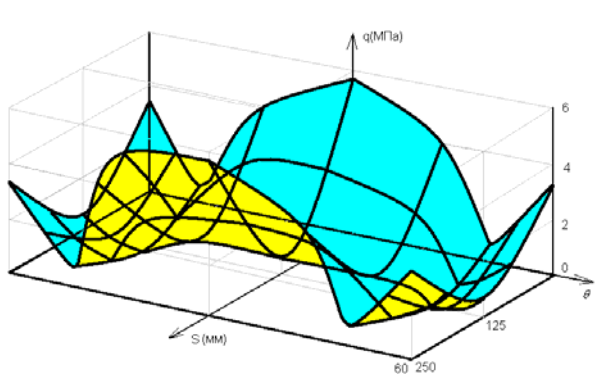


Рис. 2. распределение контактного давления q по области Ω

Вывод: предложенный подход, позволяющий решить контактную задачу, моделирующую передачу нагрузки от котла вагона-цистерны на лежневые опоры, позволяет уточнить распределение контактных усилий и оценить прочность прокладок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Емельянов, И.Г. Модель напряженно-деформированного состояния котла вагона-цистерны с усовершенствованной схемой опирания на раму / И.Г. Емельянов, В.П. Ефимов, А.В. Кузнецов // Тяжелое машиностроение. 2005. №8. С. 44-49.
2. Емельянов, И.Г. Определение напряженного состояния и ресурса оболочечной конструкции / И.Г. Емельянов, В.И. Миронов, А.В. Кузнецов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. №5. С. 57-65.
3. Миронов, В.И. Трещиностойкость несущих деталей вагонов / В.И. Миронов, А.В. Якушев, И.Г. Емельянов // Ростов-на-Дону: Вестник РГУПС. 2009. №1(33). С. 56-60.
4. Емельянов, И.Г. Оценка долговечности оболочечной конструкции лежащей на опорах. / И.Г. Емельянов, В.И. Миронов, А.В. Кузнецов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №1. С. 101-107.
5. Путьято, А.В. Моделирование прочности кузова вагона-цистерны при ударном нагружении с учетом нарушения крепления котла на раме. Тез. докладов международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев, Украина, 28-30 сентября 2010. Т. 2. С. 68-69.
6. Емельянов, И.Г. Контактные задачи теории оболочек. – Екатеринбург, УрО РАН, 2009. 185 с.
7. Григоренко, Я.М. Механика композитов: В 12 т. Т. 8. Статика элементов конструкций. / Я.М. Григоренко, А.Т. Василенко, И.Г. Емельянов – Киев: А.С.К., 1999. 379 с.
8. Кантор, Б.Я. Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения. – Киев: Наукова думка, 1990. 136 с.
9. Григолюк, Э.И. Контактные задачи теории пластин и оболочек / Э.И. Григолюк, В.М. Толкачев. – М.: Машиностроение, 1980. 411 с.

CONTACT INTERACTION OF BOILER AT THE TANK-TRUCK WITH THE TRACKS BEARINGS

© 2011 I.G. Emelyanov¹, V.I. Mironov¹, A.V. Yakushev², A.V. Kuznetsov¹

¹ Institute of Engineering Science UrB RAS, Ekaterinburg

² JSC “Scientific Implementation Center “Vagony”, St.-Petersburg

By the method of contact elements it is solved a problem of definition two-dimensional area of contact for the thin shell lying on the continuous or discrete basis, and distribution of contact efforts.

Key words: *contact problem, shell, basis, pressure*

Igor Emelyanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Research Fellow. E-mail: Emelyanov@imach.uran.ru

Vladimir Mironov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow
Aleksey Yakushev, Candidate of Technical Sciences, Chief of the Group.

E-mail: av-yakushev@ya.ru

Aleksey Kuznetsov, Research Fellow. E-mail: Alekseikuz@rambler.ru