

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

Г.А. Зорина – магистр, **Д.Е. Молочников** – к.тех.н., доцент
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ, г. Ульяновск, Россия, e-mail: gzorina453@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрен способ расчета вертикальных стальных цилиндрических резервуаров за счет изменения потенциальной энергии стенки с использованием данных радиуса кривизны, момента внутренних сил относительно нейтральной оси, модуля упругости металла, момента инерции элемента поперечно сечения стенки резервуара.

Ключевые слова: резервуар, петля гистерезиса, модуль упругости металла, жесткость сечения, деформация.

Вертикальные стальные резервуары являются неотъемлемой частью парка оборудования добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья. Несмотря на развитую систему стандартизации и высокие требования к безопасности резервуаров, статистика аварий показывает, что существующие меры по обеспечению надежности этих объектов не являются совершенными. Для количественной оценки поврежденности локальных участков стенки резервуаров предложено использовать метод накопленных пластических деформаций, подтверждающих зависимость между возникновением циклических усталостных напряжений, развитием микро трещин и изменением площади петли гистерезиса.

Кривизну изменения потенциальной энергии стенки резервуара можно представить в виде балки защемленной с одного конца и нагруженной с другого (рисунок 1).

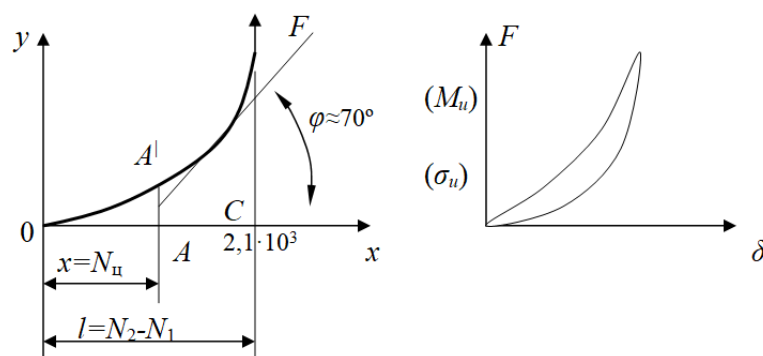


Рисунок 1. Расчетная схема кривизны петли гистерезиса

Перемещение кривизны при заданном числе циклов нагружения AA по направлению, перпендикулярному оси кривизны характеризует развитие микротрещин. Угол φ , на который повернется кривизна в зависимости от количества циклов нагружения, характеризует снижение внутреннего трения металла междокристаллической решетки [1, 2].

Измерение направления касательной к кривой выражено уравнением

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_z}{E J_z}, \quad (1)$$

где ρ – радиус кривизны; M_z – момент внутренних сил относительно нейтральной оси; E – модуль упругости металла; J_z – момент инерции элемента поперечно сечения стенки резервуара, связывающий кривизну с изгибающим моментом и жесткостью сечения при изгибе [3].

Для неподвижной оси координат XOY

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{y''}{\left[1 + (y')^2\right]^{3/2}}. \quad (2)$$

В большинстве практических задач перемещение точек оси кривизны относительно малы и $\operatorname{tg} \varphi = \varphi'' \ll 1$.

В связи с этим принимая $\frac{1}{\rho} \approx \pm y''$, запишем зависимость (1) в форме

$$y'' = \frac{M_z}{EJ_z} \quad (3)$$

Эта зависимость представляет собой приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси кривизны петли гистерезиса. Выбор знака определяется принятой системой координат. Для системы координат принятой на рисунке 2 знаки для второй производной кривизны и момента одинаковы, и уравнение имеет вид

$$EJ_z y'' = M_z \quad (4)$$

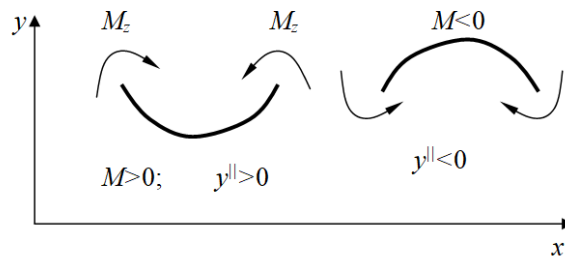


Рисунок 2. Расстановка знаков при нагружении элемента

Если в принятой системе координат знаки y'' и M_z не совпадают, то уравнение (3) имеет вид

$$EJ_z y'' = -M_z \quad (5)$$

Вычисление углов φ поворота значений A_r и прогибов (y) точек кривой производим интегрирования уравнения (3) с учетом условий закрепления (граничных условий).

Определим, прогиб и угол поворота кривой, нагруженного силой F . С учетом правила знаков, принятого на рисунке 2, используем уравнение (4) изгибающий момент в сечении (x) [4].

$$M_z(x) = F(1-x), \quad (6)$$

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$EJ_z y'' = F(1-x). \quad (7)$$

Принимая, что жесткость сечения постоянна и интегрируя полученное уравнение, выражение будет иметь вид:

$$EJ_z y' = Flx - Fx^2/2 + C_1. \quad (8)$$

Повторяя интегрирование, найдем

$$EJ_z y = Fx^2/2 - Fx^3/6 + C_1x + C_2. \quad (9)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 определим из известных граничных условий. При $x=0$ в (заделке), начале отсчета координат $y'=0$ и $y=0$ с учетом этих условий $C_1=0$ и $C_2=0$.

Таким образом, имеем следующие уравнения для определения угла поворота кривизны и прогибов точек

$$y'(x) = \frac{Flx}{EJ_z} - \frac{Fx^2}{EJ_z}; \quad y(x) = \frac{Flx^2}{2EJ_z} - \frac{Fx^3}{6EJ_z}. \quad (10)$$

Откуда угол поворота и прогиб на конце кривизны ($x=1$) соответственно равны:

$$\varphi(l) = \frac{Fl^2}{2EJ_z}; \quad y(l) = \frac{Fl^3}{3EJ_z}. \quad (11)$$

Значение l принимаем как разность числа циклов нагружения, в начале отсчета $N_{ц1}$ и конце отсчета $N_{ц2}$, то есть $l = N_{ц2} - N_{ц1}$.

Во втором подходе используем энергетический метод определения кривизны разрушения стенки резервуара. Этот метод более точен, и основан на теореме Кастилиано, согласно которой перемещение (в данном случае прогиб кривизны) в точке приложения некоторой силы F_i , равно частной производной от энергозатрат деформации стенки резервуара по этой силе, то есть [5].

$$y_i = \frac{\partial J_p}{\partial F_i}. \quad (12)$$

Угол поворота кривизны, в которой действует сосредоточенный изгибающий момент

$$\varphi_i = \frac{\partial J_p}{\partial M_i} = \int_0^l \frac{M_z(x) dx}{EJ_z} \frac{\partial M_z(x)}{\partial M_i}. \quad (15)$$

Определим прогиб консоли, нагруженной на конце силой F (рисунок 1).

Изгибающий момент на расстоянии x от начала координат

$$M_z(x) = F(l-x), \quad (16)$$

производная от момента по силе

$$\frac{\partial M_z(x)}{\partial F} = l - x. \quad (17)$$

Наклон конца кривизны находим

$$y = \int_0^l \frac{F(l-x)^2}{EJ_z} dx = \frac{Fl^3}{3EJ_z} \quad (18)$$

Описанный способ позволяет определить перемещения в точках приложения сил. Возможности способа и круг решаемых задач можно расширить, если в рассчитываемой точке кривизны мысленно приложить дополнительную силу F_g в интересующем нас направлении (или дополнительный момент M_g). Затем составить выражение энергозатрат системы с учетом этой силы и применить теорему Кастилиано, взяв частичную производную от энергозатрат по дополнительной силе.

Библиографический список

1. Молочников Д.Е., Яковлев С.А., Мустякимов Р.Н. Прогнозирование ресурса вертикальных резервуаров для нефтепродуктов при циклическом нагружении // Материалы Всероссийской научно-практической конференции посвящённой 40-летию со дня организации студенческого конструкторского бюро (СКБ). Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2020. С. 63-67.
- 2.. Молочников Д.Е., Халимов Р.Ш., Яковлев С.А. Методы неразрушающего контроля материалов // Теория и практика современной аграрной науки: Сборник IV национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 26 февраля 2021 года / Новосибирский государственный аграрный университет. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета "Золотой колос", 2021. С. 521-524.
3. Молочников Д.Е., Яковлев С.А., Замальдинов М.М. Модель коррозионного износа днища резервуара для нефтепродуктов // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции в рамках XXII Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш», Ростов-на-Дону, 27 февраля – 01 марта 2019 года / Донской государственный технический университет, Аграрный научный центр «Донской». Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2019. С. 376-380. DOI

10.23947/interagro.2019.6.376-380.

4. Молочников Д.Е., Яковлев С.А., Замальдинов М.М. Прогнозирование коррозионного износа вертикальных резервуаров // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 28 февраля 2019 года. Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. С. 182-186.

5. Зазуля А.Н., Халимов Р.Ш., Молочников Д.Е., Аюгин Н.П., Татаров Л.Г. Определение динамических характеристик подвижных стыков машин // Наука в центральной России, № 5 (35). 2018. С. 11-17.