

Машиностроение

УДК 621.642.39

МЕТОДИКА РАСЧЕТА АМПЛИТУДЫ МЕСТНЫХ УСЛОВНЫХ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УЧАСТКЕ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА С ДЕФЕКТОМ ФОРМЫ В ВИДЕ ВМЯТИН

Р.Ю. Банников, О.Ю. Сметанников, Н.А. Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614000, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29а

E-mail: bannikov.ru@inbox.ru

Приводится методика расчета амплитуды местных условных упругих напряжений на участке стенки резервуара с дефектом формы в виде вмятин. Вмятина считается изолированной и попадает под определение эллиптической. В методике учитывается влияние на амплитуду напряжений четырех параметров: стрелы прогиба, высоты и относительной ширины вмятины, минимальной толщины стенки резервуара в зоне вмятины. Дается обоснование выбранной расчетной методики, основанное на выборе расчетной схемы определения НДС и базовой канонической формы профиля вмятины, определении критерия изолированности и правильности формы вмятины, получении аналитических зависимостей для аппроксимации ККН.

Ключевые слова: резервуар, вмятина, напряжения.

Несовершенства формы цилиндрических резервуаров в виде вмятин являются одним из наиболее часто встречающихся дефектов. Статистика дефектов стальных цилиндрических резервуаров вместимостью 2000–5000 м³ показывает, что вмятины являются наиболее распространенным видом дефекта и занимают более четверти от общего числа дефектов.

Проведенный обзор причин возникновения вмятин и расчетных методик [1–11] для определения ресурса прочности резервуаров с подобными дефектами позволяет сделать следующие выводы.

1. Дефекты формы, встречающиеся на стенках вертикальных цилиндрических резервуаров, имеют широкую вариацию геометрии, размеров и мест расположения, обусловленную разнообразными причинами их возникновения.

2. Анализ методов расчетов сосудов с дефектами показывает, что полноценной инженерной методики для оценки ресурса вертикальных цилиндрических резервуаров с вмятинами в настоящее время не существует. Принятая система допусков на размеры вмятин и выпучин нуждается в совершенствовании.

Руслан Юрьевич Банников, старший преподаватель кафедры «Вычислительная математика и механика».

Олег Юрьевич Сметанников (д.т.н.), доцент кафедры «Вычислительная математика и механика».

Николай Александрович Труфанов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Вычислительная математика и механика».

3. Оценка прочности резервуаров с дефектами по простым инженерным зависимостям возможна лишь в ограниченных пределах допустимых отклонений от канонической формы геометрии вмятины (круг, эллипс, прямоугольник). При больших отличиях формы вмятины от канонической необходим детальный анализ, включающий полный учет ее топологии, геометрическую и физическую нелинейность задачи. Подобный анализ возможен лишь с использованием численных методов, среди которых наиболее разработанным в настоящее время является метод конечных элементов.

1. Выбор расчетной схемы для инженерной оценки ресурса резервуара

Расчет σ_a^* – амплитуды местных условных упругих напряжений на участке стенки резервуара с дефектом формы – производится методом конечных элементов. При создании расчетной схемы и упрощении формы вмятины использованы материалы диссертационной работы Л.А. Алифанова [11]. В данной работе проведен глубокий анализ влияния различных упрощающих гипотез на погрешность результата при расчете вмятин и выпучин. Анализ проводился методом конечных элементов в пакете ANSYS. В качестве канонической в работе принята вмятина, полученная булевым пересечением сферы радиусом D с цилиндрической поверхностью стенки резервуара. Достоинством данной модели является ее простота, дающая возможность отслеживать зависимость максимальных эквивалентных напряжений от небольшого числа параметров формы дефекта (высота и глубина вмятины). Именно эти параметры в настоящее время используются в качестве нормативных. В то же время данное упрощение не позволяет оценить влияние на НДС такого важного параметра, как отношение ширины вмятины (горизонтального размера) к ее высоте. Это допущение компенсируется тем, что при использованном в расчетной схеме скачкообразном изменении угла профиля вмятины на границе цилиндрической и сферической поверхностей реализуется превышение максимального уровня напряжений в сравнении с плавным переходом порядка 40 %. Таким образом, создается дополнительный, не всегда оправданный запас прочности. Однако основные качественные и количественные закономерности, выявленные в работе [11], применимы и для более сложной схематизации.

В качестве базовой используется расчетная схема, показанная на рис. 1.

В базовой расчетной схеме использованы следующие гипотезы.

1. Исследуется одиночная вмятина эллиптической формы с полуосями r_x и r_y , параллельными окружной и осевой координатам соответственно.

2. Форма погиба описывается следующим выражением:

$$z(r, \phi) = A \left\{ 0.5 \left[\cos \left(\frac{\pi r}{r_k(\phi)} \right) + 1 \right] \right\}^n, \quad (1)$$

где $r_k(\phi)$ – радиус контура вмятины в плане (см. рис. 1), определяется по формуле

$$r_k(\phi) = \sqrt{x_s(\phi)^2 + y_s(\phi)^2},$$

$$\text{где } x_s(\phi) = \frac{y_s(\phi)}{y}, \quad y_s(\phi) = \frac{r_x r_y y}{\sqrt{r_x^2 r_y^2 + r_y^2 x^2}}, \quad y = r \cdot \sin(\phi), \quad x = r \cdot \cos(\phi);$$

r , φ – координаты точки вмятины в полярной системе, связанной с ее центром;

n – варьируемый показатель «плавности» перехода от цилиндрической поверхности к дефекту.

3. Размеры представительной области (габариты сектора цилиндра) определяются по условию $B_\Gamma = 3B$, $H_\Gamma = 3H$,

где $B = 2r_x$; $H = 2r_y$ – ширина и высота вмятины соответственно.

4. Внутреннее давление задается как равномерно распределенное по площади исследуемой области.

5. Осевыми (вертикальными) усилиями при расчете напряженно-деформированного состояния вмятины пренебрегается ввиду их малости.

6. Задача считается геометрически и физически линейной, что позволяет использовать расчет при единичном давлении и существенно уменьшить число варьируемых параметров.

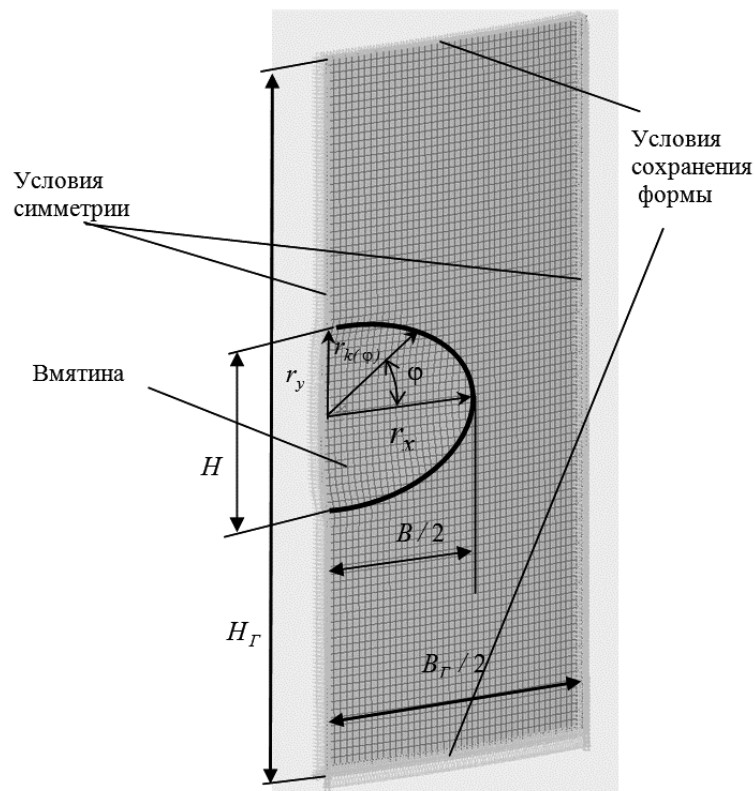


Рис. 1. Расчетная схема задачи об НДС вмятины

2. Критерий изолированности вмятины

Одиночной (изолированной) вмятиной следует считать вмятину, отстоящую от соседних на расстояние не менее максимального габаритного размера наибольшей из их совокупности. Данный вывод основан на ряде численных экспериментов (случайная выборка из 500 вмятин), проведенных на вмятинах канонической формы, параметры которых находились в пределах, указанных для ис-

пользования формулы (4). При этом полагалось, что безопасным является расстояние, на котором

$$(K_{\sigma} - 1)/(K_{\sigma}^{\max} - 1) > 0.15,$$

т. е. превышение уровня напряжений над фоновым уровнем составляет не более 15 % от максимального.

3. Выбор базовой канонической формы профиля вмятины

Профиль эллиптической вмятины описывается формулой (1). Показатель плавности перехода влияет на форму поперечного сечения дефекта, при уменьшении n переход от недеформированной области стенки сосуда к вмятине становится все более резким. Как показано в работе [11], в которой детально исследована зависимость характера перехода на границе вмятины, рост скачка по первой производной профиля на границе увеличивает максимальную интенсивность напряжений на вмятине. Автор [11] анализировал закономерности НДС вмятины, форма профиля которой описывается уравнением сферы. В работе сделан вывод о том, что отсутствие переходной зоны (галтели) дает превышение по уровню эквивалентных напряжений порядка 40 % в сравнении с вариантом, когда такая зона есть. Ближе всего к сферическому профилю находится кривая с показателем степени $n = 0.5$. Поэтому для дальнейших расчетов использовалась именно такая аппроксимация базового профиля.

4. Выбор критерия правильности формы вмятины

При выборе данного критерия учитывалось, что габаритные размеры эллиптической вмятины далеко не полностью определяют ее форму в плане. В качестве дополнительного параметра варьирования геометрических характеристик был выбран угол наклона полуосей эллиптической вмятины φ (рис. 2), вписанной в габаритные размеры. Контур вмятины при этом описывается следующими уравнениями:

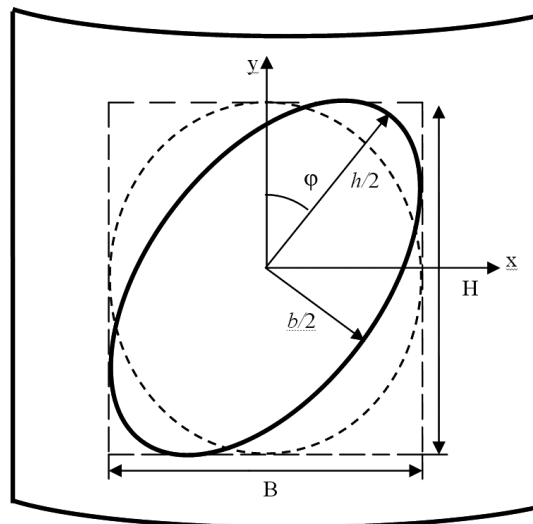


Рис. 2. Расчетная схема исследования зависимости роста ККН соотношения габаритных и фактических размеров вмятины

$$x = B \cos(2\pi - \alpha); \quad (2)$$

$$y = H \cos(2\pi t), \quad (3)$$

где t – параметр в интервале $[0, 1]$;

α – разность фаз в интервале $[0, \pi/2]$, причем при $\alpha = \pi/2$ $\varphi = 0$, а при $\alpha = 0$ $\varphi = \arctg(H/B)$ и наименьшая полуось ($b/2$ на рис. 2) стремится к нулю, т. е. эллипс вырождается в линию.

Таким образом, при варьировании формы вписанного в прямоугольник с фиксированными размерами эллипса можно определить зависимость максимальной интенсивности напряжений от отношения минимального размера эллипса (ось b) к минимальному размеру вмятины (B или H в зависимости от соотношения габаритных размеров)

Был проведен анализ зависимости превышения ККН над уровнем напряжений прямой вмятины от соотношения минимальных размеров. Анализ проводился на случайной выборке из 500 вмятин, параметры которых находились в пределах, указанных для использования формулы (4). Выбранная на основании проведенных расчетов граница соотношений минимальных размеров $H/b_{кр}$ получена равной 1.5 – максимальное значение из выборки рассчитанных для каждой вмятины.

5. Методика получения аналитических зависимостей для аппроксимации ККН

Один из путей упрощения интерпретации конечно-элементного решения – построение аппроксимирующих зависимостей ключевых характеристик напряженно-деформированного состояния конструкции от наиболее значимых параметров ее геометрии.

В соответствии с методикой оценки ресурса резервуара с вмятиной для определения числа циклов нагружения до образования макротрещин требуется величина коэффициента концентрации напряжений k_σ . Для унификации процедуры расчета σ_i используется аппроксимация гиперповерхности $k_\sigma(x_j)$ по значениям ККН в узловых точках $k_\sigma(x_j^k)$, полученным методом конечных. В качестве аргументов выбраны следующие параметры:

$x_1 = \delta$ – стрела прогиба, мм;

$x_2 = H$ – высота вмятины, мм;

$x_3 = B/H$ – относительная ширина вмятины;

$x_4 = t$ – минимальная толщина стенки резервуара в зоне вмятины, мм.

Параметры $x_1 - x_4$ варьировались в пределах, указанных для использования формулы (4). Для каждого из них был выбран равномерный шаг, количество узловых точек для всех параметров – 4. Таким образом, было получено $4^4 = 256$ значений $k_\sigma(x_j^k)$. Кроме того, были получены еще 500 значений ККН для случайных равномерно распределенных в указанных пределах значений параметров.

Специфика построения выражения для $k_\sigma(x_j)$ заключается в дополнительном условии – компактности, необходимом для его включения в нормативную документацию. Поэтому для построения $k_\sigma(x_j)$ был использован эволюционный метод GRSM [3].

6. ККН для изолированной эллиптической вмятины

1. Результатом использования метода GSRM стало выражение для вычисления коэффициента концентрации напряжений для изолированной вмятины, подпадающей под определение эллиптической:

$$k_{\sigma} = [\bar{B}(1.914 - 0.01521 \cdot \bar{B}^4) + \delta(0.222 + 6.861 \cdot 10^{-5} \cdot H - 2.392 \cdot 10^{-3} \cdot \delta + 0.04413 \cdot \bar{B}^2 - 0.1352 \cdot \bar{B}) + 1.1492] [\bar{B} + 0.09105 \cdot t]^{-1}, \quad (4)$$

где δ – стрела прогиба (максимальное отклонение от образующей цилиндрической поверхности резервуара в радиальном направлении в зоне вмятины на пустом резервуаре), от 10 до 50 мм;

H – высота вмятины (расстояние от самой нижней до самой верхней точки вмятины, измеренное по вертикали), от 500 до 1500 мм;

$\bar{B} = B/H$ – относительная ширина вмятины, от 0.33 до 3. Абсолютная ширина вмятины B в миллиметрах измеряется по горизонтали вдоль образующей цилиндра как расстояние от крайней левой до крайней правой точки границы вмятины;

t – минимальная толщина стенки резервуара в зоне вмятины, от 5 до 8 мм.

2. Рассчитывается минимальное и максимальное эквивалентное напряжение на вмятине по формуле

$$\sigma_i^{\max} = k_{\sigma} P_{\max} D / 2t, \quad \sigma_i^{\min} = k_{\sigma} P_{\min} D / 2t, \quad (5)$$

где D – диаметр резервуара;

$P_{\min} = \rho g H_{\min}^{np}$, $P_{\max} = \rho g H_{\max}^{np}$ – максимальное и минимальное осредненное давление жидкости в области вмятины за период заполнения-опорожнения резервуара;

g – ускорение свободного падения (9.81 м/с²);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$H_{\min}^{np} = \max(0, H_{\min}^{63l} - (H_0 + 0.25H))$, $H_{\max}^{np} = \max(0, H_{\max}^{63l} - (H_0 + 0.25H))$ – минимальная и максимальная высота столба жидкости в метрах над вмятиной соответственно;

H_0 – высота нижнего края вмятины над окрайкой, м.

3. Определяется амплитуда местных условных упругих напряжений по формуле

$$\sigma_a^* = \sigma_i^{\max} - \sigma_i^{\min}. \quad (6)$$

На использование формулы (4) накладываются следующие ограничения:

– все параметры, входящие в формулу (4), должны находиться в пределах, указанных в пояснениях к формуле;

– вмятина должна быть изолированной. Данное условие выполняется, если не более двух вмятин находятся на расстоянии, превышающем максимальный размер $L_{\max}$ обеих вмятин:

$$dL_{12} > 0.5L_{\max}; \quad (7)$$

при этом dL_{12} определяется как ближайшее расстояние между границами вмятин;

– минимальный размер вмятины $L_{\min}$ не должен быть более чем в 1.5 раза меньше минимального габаритного размера:

$$L_{\min} > \frac{\min(B, H)}{1.5}; \quad (8)$$

– вмятина должна находиться в безмоментной зоне, т. е. удалена от днища и кровли на величину большую, чем полутолщина затухания краевого эффекта [1]:

$$H_0 > 0.78\sqrt{Rt}; \quad (9)$$

$$H_p - (H_0 + H) > 0.78\sqrt{Rt}, \quad (10)$$

где $R = D/2$ – радиус резервуара;

H_p – высота резервуара от окрайки до верхней кромки. Все параметры указаны в метрах.

В качестве показателя качества аппроксимации было использовано максимальное относительное отклонение

$$\Delta_{\max} = \max\left(\frac{|k_{\sigma}(x_i^k) - k_{\sigma}^*(x_i^k)|}{k_{\sigma}(x_i^k)}\right), \quad (11)$$

где $k_{\sigma}(x_i^k), k_{\sigma}^*(x_i^k)$ – значения ККН, вычисленные методом конечных элементов (исходные данные) и полученные по (4) соответственно.

Для данной выборки этот показатель ($\Delta_{\max}$) не превышает 15 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорошенко Ф.Е., Лебедев В.А. Особенности технологии сборки и сварки монтажных ступенчатых стыков стенки цилиндрических резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1998. – № 5. – С. 3-5.
2. Товстик П.Е. Устойчивость тонких оболочек: асимптотические методы. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 320 с.
3. РД-08-95-95. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М., 1995. – 35 с.
4. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 192 с.
5. Катанов А.А., Майлер А.З., Поповский Б.В. Техническое обследование нефтерезервуаров и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния дефектов конструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1998. – № 7-8. – С. 22-25.
6. Лихман В.В., Копысцкая Л.Н., Муратов В.М. Концентрация напряжений в резервуарах с локальными несовершенствами формы // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. – № 6. – С. 22-24.
7. Лихман В.В., Копысцкая Л.Н., Муратов В.М. Прочность сварных резервуаров с несовершенствами формы при малоцикловом нагружении // Проблемы прочности. – 1995. – № 11-12. – С. 130-136.
8. Мухин В.Н., Эльманович В.И. Расчетная и экспериментальная оценка влияния локальных вмятин на прочность корпусов судов и аппаратов // Хим. и нефт. машиностроение. – 1991. – № 6. – С. 24-26.
9. Перельгин О.А., Серазутдинов М.Н., Зайнуллин Р.Х., Фокин Д.А. Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек с локальными несовершенствами формы // Вестник Казанского технологического университета. – 1999. – № 1-2. – С. 58-61.
10. Иванов Г.П., Разбитной С.А. Метод оценки напряжений от вмятин на стенках сосудов, работающих под давлением // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2000. – № 4. – С. 18-19.
11. Алифанов Л.А. Нормирование формы дефектов и ресурса вертикальных цилиндрических

- резервуаров: Дисс. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2003. – 218 с.
12. Сметанников О.Ю., Сметанников А.О., Соловьев Е.Н. Использование алгоритма многофакторной регрессии GSRM для оценки ресурса резервуаров // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. – 2005. – № 1. – С. 96-110.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2014 г.

CALCULATION OF THE AMPLITUDE OF LOCAL CONDITIONAL ELASTIC STRESSES ON THE WALL SECTION TANK WITH DEFECTS THE FORM AS A DENT

R.Yu. Bannikov, O.Yu. Smetannikov, N.A. Trufanov

Perm National Research Polytechnic University
29, Komsomolsky Ave, Perm, 614990, Russian Federatin

Describes the method of calculating the amplitude local conditional elastic stresses on the wall section tank with form defects of a dent is described in the paper. Dent is isolated and falls under the term of an elliptic. The methodology takes into account the effect on the amplitude of the stress of four parameters: arrow of a deflection, height and relative width of dent, the minimum thickness of the tank wall in the area of dent. The chosen calculation method based on the selection of a design scheme for determining the mode of deformation and the base of the canonical form of the profile dent is provided, the term for isolation and the correct form of dent are provided, analytical dependences to approximate the stress concentration factor are received.

Keywords: tank, dent, stresses.

Ruslan Yu. Bannikov, Senior Lecture.

Oleg Yu. Smetannikov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

Nikolay A. Trufanov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.