



## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОСУДОВ С ВМЯТИНАМИ И ВЫПУЧИНАМИ

В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ, Д. И. БЕРЕСТОВ, М. В. КРАВЕЦ

Получены расчетные зависимости, позволяющие оценить работоспособность сосудов с вмятинами и выпучинами. Эксперименты, выполненные на моделях сосудов, дают хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных. Приведен пример расчета работоспособности сосудов промышленного оборудования.

Dependencies were calculated, which allow evaluation of the performance of vessels with dents and bulges. Experiments made on vessel models, show a good agreement of the design and experimental data. An example of calculation of the performance of vessels of industrial equipment is given.

В ряде действующих нормативных материалов [1] регламентируются возможные искажения формы сосудов. Отступление от принятых норм рассматривается в качестве дефекта, который следует устранить в процессе ремонта.

Существуют расчетные методы оценки несущей способности сосудов, содержащих указанные дефекты. Результаты расчетов приводят к необходимости снижения допускаемого давления [2]. В то же время имеющийся опыт работы технологического оборудования с рассматриваемыми дефектами показал, что возможна безопасная эксплуатация сосудов без снижения нормативного давления.

В УкрНИИХиммаше выполнен комплекс расчетных и экспериментальных исследований, который позволил прогнозировать работоспособность сосудов, работающих под давлением и имеющих выпучины и вмятины.

Работоспособность сосуда определяется статической и циклической прочностью. Условие статической прочности принято определять на основе теории предельного равновесия. Сохраняя консервативный подход, предположим, что вмятины и выпучины вытянуты вдоль цилиндрической обечайки, так что длина вмятины больше ширины. В этом случае задача может быть сведена к оценке несущей способности бесконечной цилиндрической панели. Приняв жесткопластическую диаграмму деформирования, рассмотрим два варианта опирания цилиндрической панели: шарнирное и жесткая заделка по краям [3].

В первом случае предельное состояние достигается при образовании линии пластических шарниров в центре панели, во втором предельное состояние будет достигнуто, когда образуются три линии пластических шарниров в центре и на краях (рис. 1, точки 1, 2).

Уравнения равновесия для вмятины

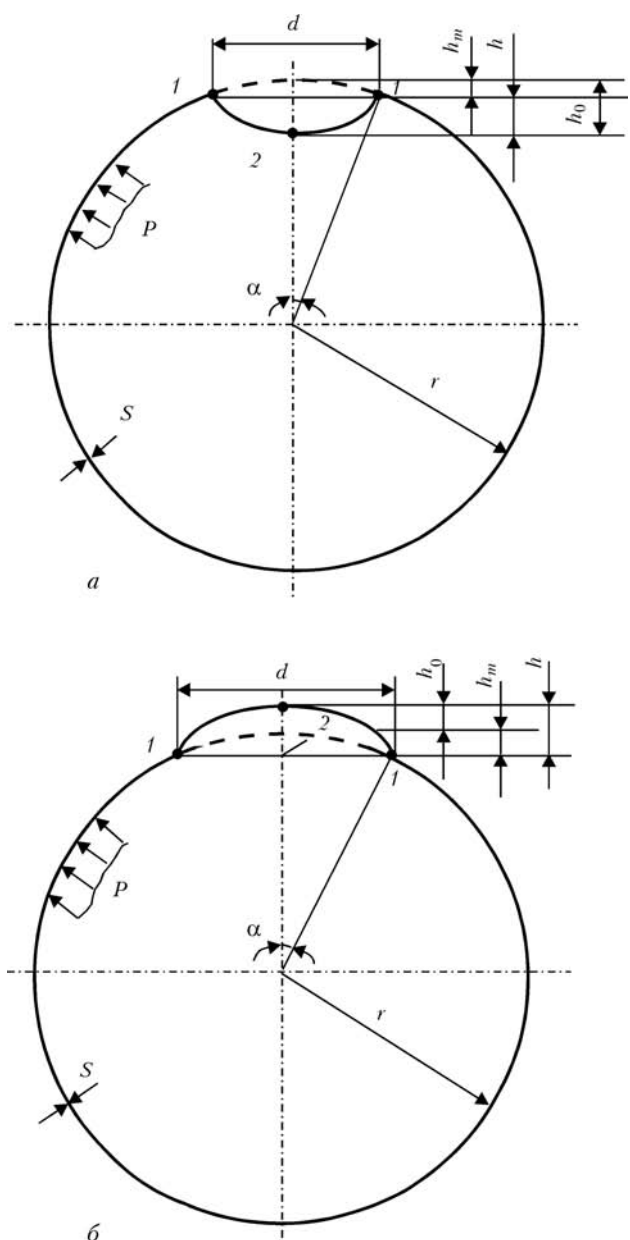


Рис. 1. Обечайки с дефектами формы: а — вмятина; б — выпучина



$$N_1 = Pr \cos \alpha, N_2 = N_1 - Ph, Q = Pr \sin \alpha, \\ M_2 = \frac{QL}{2} - \frac{PL^2}{8} + N_1 h - \frac{Ph^2}{2} - M_1. \quad (1)$$

Уравнения равновесия для выпучины

$$N_1 = Pr \cos \alpha, N_2 = N_1 + Ph, Q = Pr \sin \alpha, \\ M_2 = \frac{QL}{2} - \frac{PL^2}{8} - N_1 h - \frac{Ph^2}{2} - M_1. \quad (2)$$

Уравнения предельного состояния [3]

$$\left(\frac{N_i}{N_0}\right)^2 + \frac{M_i}{M_0} = 1, \quad i = 1, 2.$$

Здесь  $N_0 = R_e S, M_0 = \frac{R_e S^2}{4}, P$  — давление среды;

$N_i, Q$  — горизонтальные и вертикальные составляющие внутренних сил;  $M_i$  — изгибающие моменты;  $R_e$  — предел текучести;  $r$  — радиус обечайки;  $S$  — толщина стенки.

Решая системы (1)–(3) и (2)–(3), получаем

$$\lambda = \pm \frac{h_0}{S} (A) + \frac{\sqrt{\left[\frac{h_0}{S} (A)\right]^2 + 2[\cos^2 \alpha + (B)^2]}}{\cos^2 \alpha + (B)}, \quad (4)$$

где  $A = 2 + \frac{h_0}{\gamma S}, B = 1 + \frac{h_0}{\gamma S}, h_0 < 0$  — для вмятины;  $h_0 > 0$  — для выпучины; знак «+» относится к вмятине, «-» — к выпучине;  $\lambda = P/P_e$  — относительное предельное давление;  $P_e = R_e/\gamma$  — предельное давление для круглой цилиндрической

обечайки;  $\gamma = r/S, h_0, \alpha$  — параметры вмятины (рис. 1).

Зависимость (4) прошла экспериментальную проверку. Испытания выполнялись на баллонах, изготовленных из стали 09Г2С с различными вмятинами. Диаметр сосуда — 315 мм; длина 500 мм; толщина стенки — 2,8...2,9 мм; глубина вмятин 15...40 мм; ширина — 115...130 мм; длина — 150 мм.

В различных точках моделей устанавливались часовые индикаторы, которые фиксировали перемещения конструкции по мере повышения давления внутри сосуда. На рис. 2 представлены перемещения (изменение глубины вмятин) с двумя начальными значениями глубин вмятин  $h_0/S = 14,2$  и  $h_0/S = 6,42$ . Там же приведены результаты расчетов по формуле (4).

При малых нагрузках (область упругих деформаций) расчетные данные, основанные на модели жесткопластического тела, не позволяют описать деформирование сосуда в области вмятин. По мере роста нагрузки согласование теоретических и экспериментальных результатов становится вполне удовлетворительным и отражает постепенное ужесточение конструкции в процессе рихтовки вплоть до нагрузки полной рихтовки, когда несущая способность конструкции становится равной предельному давлению круглой цилиндрической оболочки ( $\lambda = 1$ ).

Получено достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных в случае протяженных вмятин: длина вмятины больше диаметра. В случае коротких вмятин имеет место

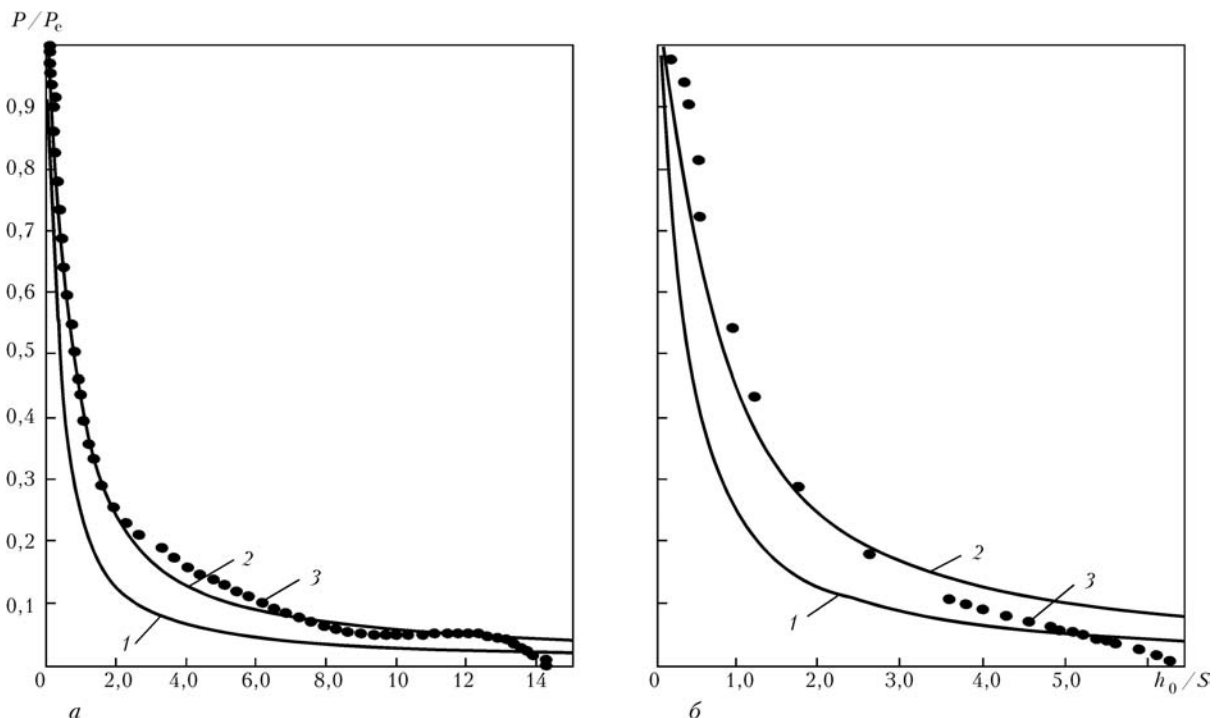


Рис. 2. Зависимость относительного предельного давления ( $\lambda = P/P_e$ ) от относительной глубины вмятины ( $h_0/S$ ): 1 — шарнирное опирание; 2 — заделка на края; 3 — экспериментальные точки (а —  $h_0/S = 14,2$ ; б —  $h_0/S = 6,42$ )



консервативная оценка. Давление рихтовки, как и следовало ожидать, больше теоретического значения. Следует отметить, что в случаях длинных и коротких вмятин несущая способность сосуда в целом остается неизменной. Местная потеря несущей способности сосуда приводит лишь к уменьшению дефектов формы сосуда.

Опасность процесса рихтовки возможна в зонах значительного изменения радиуса кривизны, на краях вмятины, что может оказаться существенным при циклическом нагружении. Размах циклических напряжений можно оценить, зная радиус кривизны  $R_i$  в центре и на краях вмятины

$$\sigma = \frac{ES}{2} \left( \frac{1}{R_i} - \frac{1}{r} \right). \quad (5)$$

Здесь  $E$  — модуль Юнга;  $R_i$  — радиус кривизны в точках 1, 2.

Таким образом, по количеству циклов нагружения можно оценить циклическую прочность на основании нормативного документа [4].

Рассмотрим предложенную методику оценки работоспособности сосудов на примере расчета колонны, установленной на ОАО «УКРТАТНАФТА», на обечайке которой при вакуумировании образовалась вмятина.

Исходные данные для расчета:

расчетное внутреннее давление и расчетная температура  $P = 0,2$  МПа;  $t = 360$  °С;

давление гидроиспытаний  $P_{пр} = 0,35$  МПа; внутренний радиус и толщина стенки  $r = 2500$  мм;  $S = 15,4$  мм; ширина и глубина вмятины  $d = 1000$  мм;  $h_0 = 50,5$  мм;

радиусы кривизны в точках 1, 2 (см. рис. 1)  $R_1 = \infty$ ;  $R_2 = 500$ ;

предел текучести материала при расчетной (комнатной) температурах  $R_e = 206$  (300) МПа;

модуль Юнга при расчетной (комнатной) температурах  $E = 1,62 \cdot 10^5$  ( $1,99 \cdot 10^5$ ) МПа;

материал сталь 16ГС; параметр  $\gamma = r/S = 162$ ; предельное давление для круглой цилиндрической обечайки  $P_e = R_e/\gamma = 1,27$  (1,85) МПа;

относительное предельное давление  $\lambda = P/P_e = 0,157$  (0,189) МПа;

относительная начальная глубина вмятины  $h_0/S = 3,28$ .

По формуле (4) определяем значение относительной глубины вмятины при рихтовке расчетным давлением  $h_0/S = 3,12$ , при рихтовке давлением гидроиспытаний  $h_0/S = 2,56$ . При расчетном давлении вмятина уменьшается на 2,5 мм и ее глубина составит 48 мм; при гидроиспытаниях — на 11,1 мм и ее глубина составит 39,4 мм. Т. е., если гидроиспытания предшествовали рабочему режиму, то уменьшения вмятины не наблюдается.

Размах циклических напряжений (формула (5))  $\sigma = 500$  МПа (точка 1);  $\sigma = 2000$  МПа (точка 2). Допускаемое количество циклов нагружения, определяемое напряжениями в точке 2, составляет  $[N] = 175$  [4].

## Выводы

Вмятины и выпучины не снижают несущую способность сосудов при статическом нагружении; повышение давления приводит к частичному или полному исправлению дефектов формы.

Оценка циклической прочности сосудов с дефектами геометрической формы в виде вмятин может быть выполнена по методу, изложенному в ГОСТ [4].

1. ГСТУ 3-17-191-2000. Посудини та апарати сталні зварні. Загальні технічні умови.
2. РД 26-6-87. Методические указания. Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968.
4. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.