

# Развитие методов оценки надёжности вертикальных цилиндрических резервуаров с дефектами формы

Л. А. Алифанов, В. В. Москвичёв

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

*Статья посвящена проблемам оценки опасности локальных и общих дефектов формы вертикальных цилиндрических резервуаров. Приводятся результаты статистического анализа по данному виду дефектов, обзор существующих методик расчёта сосудов, их недостатки и перспективы развития.*

Корпус практически любого вертикального цилиндрического резервуара имеет форму, отличающуюся от идеального цилиндра. Несомненно, то, что искажение формы оказывает влияние на надёжность нефтехранилищ, однако, как показано в [1] эти дефекты относятся к редким причинам отказа, уступая дефектам сварки, низкому качеству материала и т. д. Деформацию стенки делят на местную (вмятины и выпучины) и общую, которую в теории оболочек называют погибью. Особое место занимают угловатости в монтажном стыке.

Авторами данной статьи был обработан статистический материал по несовершенствам формы, взятый из отчётов двух экспертных организаций: «СибЭРА» г. Красноярск, и «Диасиб», г. Новосибирск. Определённый вклад в общую деформацию стенки вносит неравномерная осадка основания, поэтому вместе с отклонениями образующих стенок от вертикали изучались законы распределения величин, связанных с неравномерной осадкой. К ним относятся модуль разности осадок между двумя соседними точками нивелирования окрайка днища, совпадающими с вертикальными швами; модуль разности диаметрально противоположных точек (крен) и, собственно, осадка – разность отметок самой высокой точки окрайка днища и рассматриваемой точки. Для сооружений, эксплуатирующихся менее 20 лет, модуль разности отметок смежных точек и абсолютная величина крена удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальным законом (частный случай закона Вейбулла, закона распределения при наличии в системе слабого звена), более 20 лет - полунормальным законом распределения, связанным с накоплением и суммированием отдельных воздействий. Величины отклонения образующих стенки от вертикали, характеризующие общую деформацию стенки распределены нормально, в то время как их абсолютные величины имеют полунормальное распределение [2]. Изучалась корреляция между максимальными для каждого резервуара осадками, креном и разностью осадок с одной стороны и максимальными отклонениями образующих различных поясов стенки с другой. Как и следовало ожидать, разность осадок между соседними точками более коррелирована с отклонениями образующих, чем крен и осадка, причём коэффициент корреляции значимо возрастает для верхних поясов. В свою очередь, для нижних поясов он равен нулю при уровне значимости 0,05.

Для резервуаров, прогибы окрайков днищ которых невелики, теоретические значения отклонений образующих стенок от вертикали, найденные численным моделированием обычно не совпадают с измеренными в натуре. Если сооружение испытывает значительные неравномерные осадки, то эпюры отклонений образующих, вызванных этим фактором, чаще совпадают с опытными по форме и по знаку. Наибольшие расхождения обычно наблюдаются в зоне, примыкающей к монтажному шву, что свидетельствует о влиянии сварочных деформаций на погибь стенки.

Приводимые в технических отчётах диагностирующих организаций, измеренные величины отклонений образующих от вертикали, не определяют однозначно напряжённо-деформированное состояние стенки резервуара, потому, что по проекциям перемещений нельзя восстановить, собственно, сами перемещения. Если допустить, что деформации стенки исключительно радиальные, а также принять форму резервуара, соответствующую

начальному ненапряжённому состоянию в виде геометрически правильного цилиндра то задача определения напряжений по заданным отклонениям образующих от вертикали будет иметь единственное решение. Результаты численного моделирования, тем не менее, отвергают предположение о радиальности отклонений, вызванных местными прогибами окрестностей днищ. При неравномерной осадке основания стенка резервуара претерпевает сложную трёхмерную деформацию, которая выражается как в радиальных смещениях точек, так и в закручивании всего корпуса. Поэтому, напряжения, найденные при описанных выше допущениях являются чисто гипотетическими. Анализ эквивалентных напряжений, вызванных осадкой основания, показывает, что на большей части стенки резервуара их уровень достаточно низок. Порядок величин отклонений образующих при этом совпадает с порядком опытных значений. Поэтому нет оснований полагать, что допускаемые значения отклонений образующих от вертикали можно принять непосредственно из условия прочности стенки. По всей видимости, влияние общей деформации на прочность стенки выражается в первую очередь в снижении общей устойчивости сооружения; именно это обстоятельство должно в первую очередь учитываться при назначении допусков по данному виду дефектов.

Локальные дефекты формы появляются в процессе транспортировки (например, при падении рулонов), монтажа (механические воздействия и сварочные напряжения) и эксплуатации. Авторами был анализирован статистический материал почти по 300 локальным дефектам формы. Кроме стрелы прогиба  $f$  и высоты дефекта  $L$ , измеренной вдоль образующей, рассматривались две величины, характеризующие его положение: относительная высота расположения дефекта  $h_{отн}$  и относительный угол  $\alpha_{отн}$ . Первая равна отношению отметки центра вмятины или выпучины  $z$  к высоте стенки  $H$  резервуара, угол  $\alpha_{отн}$  равен относительному расстоянию по дуге от дефекта до ближайшего вертикального монтажного стыка (шва) обечайки и равен 0 при совпадении центра дефекта со стыком и 1 при одинаковом удалении его центра от смежных швов. Сначала данные были разбиты на четыре категории, в зависимости от объёма сосудов: 420 м<sup>3</sup>, 700-3350 м<sup>3</sup>, 5000 м<sup>3</sup> и свыше 5000 м<sup>3</sup> затем проверялись статистические гипотезы об однородности величин  $f$ ,  $L$ ,  $h_{отн}$  и  $\alpha_{отн}$  в различных категориях и группах категорий. Так как данные величины не показали нормальности распределения, то были использованы робастные методы непараметрической статистики, менее мощные, чем их параметрические аналоги. Использование  $W$ -критерия Вилкоксона показывает, что для  $f$ ,  $L$ ,  $h_{отн}$  имеются различия между категориями при уровне значимости 0,05. Эти различия объясняются главным образом разной толщиной стенок резервуаров, а также недостаточной представительностью выборок и рядом субъективных моментов, связанных с особенностями сбора информации специалистами экспертных организаций. Для  $\alpha_{отн}$  различия можно считать статистически недоказанными, другими словами функция распределения  $\alpha_{отн}$  одинакова для всех категорий. Показано, что ряд  $\alpha_{отн}$  удовлетворительно аппроксимируется бета распределением, типичным для случайных величин, принимающих значения в интервале от 0 до 1. Большая часть вмятин концентрируется у вертикальных стыков, что указывает на то, что причину возникновения вмятин следует искать в монтажных воздействиях. По имеющимся в распоряжении статистическим данным проверялись гипотезы об однородности величин  $f$  и  $L$  для вмятин, расположенных на первом поясе, и выше первого пояса отдельно для каждой из четырёх категорий по  $W$ -критерию. Исследовалось также влияние срока эксплуатации резервуаров на законы распределения  $f$  и  $L$ , а также влияние типа дефекта (вмятина или выпучина) на его основные параметры. Во всех этих случаях не находят подтверждения гипотеза о неоднородности величин  $f$  и  $L$  при разных уровнях описанных факторов.

Действующие нормы предусматривают достаточно низкий браковочный порог для размеров вмятин и выпучин, записывая в число недопустимых дефекты, с которыми сооружение может успешно эксплуатироваться десятки лет. В инструкции по диагностике вертикальных цилиндрических резервуаров [3] допускаемые стрелы прогиба выпучин или вмятин устанавливаются в зависимости от максимального размера дефекта вдоль обра-

зующей. Для резервуаров, эксплуатирующихся менее 5 лет, допуск составляет 15 мм при расстоянии от нижнего до верхнего края дефекта до 1,5 м; 30 мм при высоте вмятины 1,5-3 м и 45 мм при высоте от 3 до 4,5 м. Для резервуаров, находящихся в эксплуатации более 5 лет, допускаются отклонения на 30% больше, чем для вновь построенных. При этом не учитывается ни ширина вмятин, ни их форма, ни место их расположения. Последний фактор, очевидно, играет большую роль, так как нельзя ставить в один ряд вмятину, находящуюся выше уровня налива и расположенную в зоне максимальных напряжений. На практике, диагностирующая организация чаще всего учитывает все особенности конкретных дефектов и после поверочных расчётов, выполняемых чаще всего численными методами, выдаёт предписание не исправлять их, если они не представляют опасности и производить ремонт или ограничивать высоту налива нефтепродукта, если дефект значителен. Таким образом, нормы почти не играют роли в этом вопросе, фактически самоустраняясь от него, что не является лучшим выходом из данной ситуации.

Ряд существующих в настоящее время методик предполагает учёт наличия вмятин введением поправочного коэффициента к номинальному напряжению. По методике ДИ-ЭКС – коэффициент концентрации зависит от отношения  $f/s$  – глубины вмятины к толщине стенки ( $f/s \leq 1$ ). Способ, изложенный в [4], ставит коэффициент концентрации в зависимость, как от указанного отношения, так и от безразмерной характеристики  $r/\sqrt{Rs}$  ( $r$  – радиус вмятины в плане,  $R$  – радиус цилиндрической оболочки), причём  $f/s \leq 2$ ,  $20 \leq R/s \leq 300$ ,  $1/6 \leq r/R \leq 1/3$ . Численные исследования, описанные в [5], проводились для интервалов:  $f/s=0,25 \div 2$ ,  $R/s=50 \div 200$ ,  $r/R=1/12 \div 1/3$ . Данные методики больше подходят для вмятин на обечайках котлов, колонн и других сосудов давления, требования к которым значительно жёстче, чем к вертикальным цилиндрическим резервуарам. Для резервуаров они неприменимы, так как вмятины, глубина которых превышает допустимую, имеют отношение  $f/s > 2$ , равное в среднем (по выборке) 10,4. Другой недостаток этих методик состоит в том, что положенные в их основу допущения – идеализированная форма и безмоментное напряжённое состояние вокруг вмятин, выполняются менее, чем для половины дефектов. Большая часть вмятин, расположенных на первом поясе, примыкает к окрайкам днищ (зона краевого эффекта) или к врезкам трубопроводов, поэтому для них необходимы особые методы расчёта.

Новая методика оценки надёжности вертикальных цилиндрических резервуаров с дефектами формы должна быть разработана на основе системного подхода и основываться на исследовании НДС вмятин, последних достижениях механики разрушения и теории надёжности механических систем.

#### Список литературы

1. В. А. Прохоров Оценка параметров безопасности эксплуатации нефтехранилищ в условиях Севера. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999.- 142 с.: ил.
2. М. К. Сафарян. Металлические резервуары и газгольдеры. - М.: Недра, 1988.-200с.
3. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов (РД-08-95-95). Утв. Госгортехнадзором России 25.07.95 г. М.: -34 с.
4. В. В. Лихман, Л. Н. Копысицкая, В. М. Муратов. Прочность сварных резервуаров с несовершенствами формы при малоцикловом нагружении. Проблемы прочности, 1995, №11-12, стр.130-136.
5. Р. Х. Зайнуллин Безопасная эксплуатация цилиндрических сосудов с дефектами типа «вмятина» на обечайке. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. Спец. 05.26.04 «Промышленная безопасность».Казань: 2000. 18с.