

УДК 624:014.2.074.433

## УСТОЙЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ С КОЛЬЦЕВЫМИ РЕБРАМИ ЖЕСТКОСТИ

*д.т.н., проф. Егоров Е. А., асп. Дмитренко К.И.*

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

**Постановка и актуальность проблемы.** Известно, что устойчивость стальных сплошностенчатых конструктивных элементов эффективно обеспечивать путем установки дополнительных усиливающих элементов. Ярким примером этого является подкрепление стенки сварных двутавровых балок и колонн поперечными ребрами жесткости. Аналогичная ситуация имеет место и применительно к тонкостенным оболочечным конструкциям, в частности, к цилиндрической стенке стальных вертикальных цилиндрических резервуаров (далее РВС), где в качестве усиливающих (обеспечивающих устойчивость) элементов применяют кольцевые ребра жесткости и стрингеры (последние принимаются, как правило, в виде уголков, установленных по верхним поясам стенки) [1]. Т.е., сам факт использования усиливающих элементов для обеспечения устойчивости цилиндрической стенки РВС, как и для обеспечения устойчивости стенок сварных двутавровых балок и колонн, не несет в себе конструктивной новизны, но некоторые научные аспекты таких решений остаются не исследованными в полной мере.

В данной статье рассматриваются некоторые проблемы, связанные с устойчивостью РВС, подкрепленных кольцевыми ребрами жесткости. В ДБН В.2.6-...:2010 «Стальные конструкции...» [2] этому вопросу посвящен подраздел 1.10.2.4, где указывается, что при шаге установки колец жесткости  $s \geq 0.5r$  ( $r$  – радиус резервуара), устойчивость отдельных участков оболочки можно проверять по приведенным в ДБН формулам. В этой связи следует заметить, что для резервуаров большого объема (20 тыс.м<sup>3</sup> и более), для которых проблема устойчивости приобретает особую остроту, указанное условие (по шагу установки колец жесткости) не может быть выполнено из-за принятых для таких резервуаров соотношений высоты и диаметра. В тоже время в ДБН отсутствуют какие-либо указания для случаев  $s < 0.5r$ . В итоге это приводит к тому, что вопрос проверки устойчивости, а значит и правомерности установки кольцевых ребер жесткости с целью обеспечения устойчивости, во всех таких случаях остается открытым. Во многих случаях и для резервуаров меньших объемов условие  $s \geq 0.5r$  существенно ограничивает возможности использования кольцевых ребер жесткости для обеспечения устойчивости цилиндрической стенки. Все это делает проблему дальнейшего изучения устойчивости РВС с кольцевыми ребрами жесткости весьма актуальной. Можно отметить, что с несколько других позиций данная проблема рассматривалась в работах [3, 4].

**Формулировка цели.** Цель данной работы состояла в исследовании эффективности повышения устойчивости стенки РВС путем установки колец жесткости при шаге их расположения  $s < 0.5r$ . Цель достигалась путем

проведения соответствующих расчетов по оценке устойчивости с использованием ПБК «SCAD».

**Изложение основного материала исследований.** В качестве примера рассматривалась оболочка радиусом  $r=19.95\text{м}$ , высотой  $H=18\text{ м}$  с толщиной стенки  $t=0.01\text{м}$  по всей высоте (принятые параметры соответствуют цилиндрической стенке РВС объемом 20 тыс.м<sup>3</sup>).

По нижнему краю оболочки принималось жесткое защемление (связи по  $X, Y, Z, uX, uY, uZ$ ), по верхнему краю оболочки принимался жесткий диск (модель стационарной кровли), который мог свободно перемещаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях (объединение перемещений по  $X, Y, Z, uX, uY, uZ$ ). Вся поверхность оболочки разбивалась на прямоугольные конечные элементы ТИП 044 библиотеки элементов ПБК «SCAD».

Определение эффективной сетки разбиения осуществлялось на основе решения задач устойчивости гладкой оболочки (оболочка без усиливающих колец жесткости) при осевом и радиальном нагружении. В рассматриваемом примере в меридиональном (осевом) направлении оболочка загружалась погонной нагрузкой  $q_1=13.26\text{ кН/м}$ , а в радиальном направлении внешним давлением  $P=0.5\text{ кН/м}^2$ . Размеры конечных элементов варьировались в диапазоне  $n_1*n_2=3*0.75(\text{м}); 1.5*0.375; 1*0.21; 1*0.25; 0.58*0.125; 0.43*0.083; 0.29*0.067; 0.2*0.053$ .

Критические напряжения полученные расчетом ПБК «SCAD» сравнивались с результатами аналитического расчета. В случае осевого сжатия гладкой оболочки расхождение с аналитическим расчетом по формуле:

$$\sigma_{cr1} = 0.605E \frac{t}{r} \quad (1)$$

составили 0.8-2.5%. Как и предполагалось, для данного вида нагружения наиболее близкий результат дает расчет с наименьшим размером конечного элемента.

В случае внешнего давления критические напряжения  $\sigma_{cr2}$  для гладкой оболочки определялись по формуле П.Ф. Папковича:

$$\sigma_{cr2} = 0.92E \frac{t}{H} \sqrt{\frac{t}{r}} \quad (2)$$

с учетом повышающего коэффициента 1.5 на принятые граничные условия. Здесь максимальное сгущение сетки конечных элементов не дает существенного увеличения сходимости с теорией и расхождения находятся в пределах 2.5-5.0%.

В целом же, как показывают результаты расчета, для решения задач устойчивости гладкой оболочки, сжимаемой в осевом и радиальном направлениях, эффективный размер конечного элемента можно принимать равным половине длины полуволны осесимметричной задачи устойчивости оболочки при радиальном сжатии:

$$n_{cl} = 0.864\sqrt{rt}. \quad (3)$$

По такому же принципу формировалась сетка разбиения на конечные элементы и в дальнейшем при расчетах оболочек, усиленных кольцами жесткости. В итоге расчетные оценки устойчивости РВС с кольцами жесткости выполнялись с принятием для оболочки конечно элементной сетки с элементами  $n_1 \cdot n_2 = 0.29 \cdot 0.067$  (м). Шаг установки колец жесткости принимался равным от  $s=0.16g$  до  $s=0.90g$ , т.е., как больше, так и меньше нижней границы нормативного ограничения  $s=0.5g$ .

**Обсуждение результатов.** На рис.1 показаны формы потери устойчивости цилиндрической стенки рассматриваемой оболочки при сжатии ее в осевом и радиальном направлениях с подкреплением и без подкреплений ребрами жесткости.

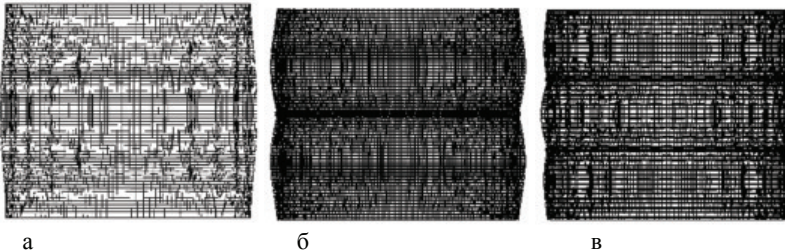


Рис 1 Формы потери устойчивости при комбинированном нагружении для оболочки: а – без кольца жесткости, б – с одним кольцом жесткости в – с двумя кольцами жесткости.

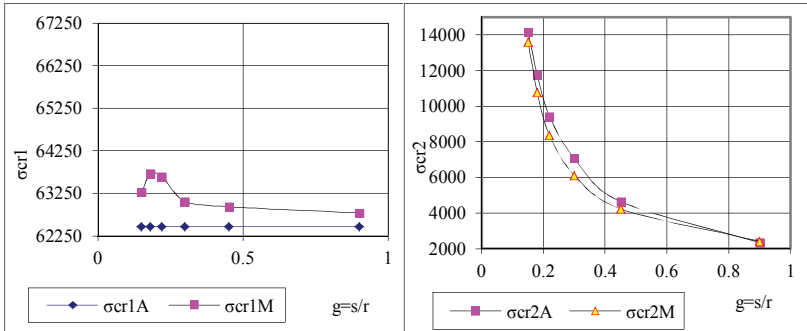
В полученных формах имеет место явное превалирование продольных волн, характерных для потери устойчивости радиально сжатой оболочки. В данном случае это объясняется тем, что  $\sigma_{cr1}$  определялось без поправки на несовершенство геометрии (коэффициент С в [2]) и запас по устойчивости в осевом направлении при принятых значениях нагрузки во всех случаях находился в пределах 45-55, в то время как по радиальному направлению он не превышал 10.

На рис.2 показаны графики изменения критических напряжений от изменения параметра  $g=s/r$ , характеризующего относительный шаг установки колец жесткости, при раздельном сжатии оболочки в осевом и радиальном направлениях.

Как следует из графиков значения слабо реагируют на изменения шага установки колец жесткости, причем машинный счет дает несколько большие в сравнении с аналитическими оценками значения (полученный всплеск в значениях машинного счета может объясняться местом установки кольца жесткости относительно полуволн потери устойчивости при осевом сжатии).

Значения  $\sigma_{cr}$ , как и следовало ожидать, более существенно реагируют на шаг установки колец жесткости (на графике параметр S), увеличиваясь при

его уменьшении. Характер изменений и значения аналитических и машинных оценок имеют хорошую сходимость на всем диапазоне принятых значений  $g$ .



а б  
 Рис 2. Изменение критических напряжений в зависимости от шага установки колец жесткости: а – случай осевого сжатия; б – случай сжатия внешним радиальным давлением.

При совместном действии продольного сжатия и внешнего радиального давления по рекомендациям [2] устойчивость цилиндрических оболочек может проверяться по формуле:

$$\frac{1}{\gamma_c} \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \right) \leq 1. \quad (4)$$

Попутно следует отметить, что, согласно [2], применение данной формулы для проверки устойчивости стенки РВС с кольцами жесткости опять-таки ограничивается условием  $s \geq 0.5r$ .

На рис.3 показаны графики изменения значений  $\alpha$  (левая часть приведенной формулы) в зависимости от параметра  $g$  установки колец жесткости. При этом сравниваются результаты аналитического счета  $\eta_A$  по формуле (4), машинного счета  $\eta_M$  при раздельном нагружении оболочки (используется (4)), но каждое отдельное слагаемое правой части определяется машинным счетом) и машинного счета  $\eta_{KM}$  при комбинированном нагружении оболочки (формула (4) не используется).

Приведенные графики показывают, что на всем диапазоне изменений параметра  $g$  оценки устойчивости, полученные машинным счетом при комбинированном нагружении дают завышенные значения  $\alpha$ , т.е., дают дополнительный запас по устойчивости. При этом такой запас уменьшается при уменьшении параметра  $g$ .

**Выводы.** Приведенные в статье результаты показывают, что какой-либо существенной разницы в характере изменений критических напряжений и при раздельном нагружении осевым и радиальным давлением, и параметра  $\alpha$  при комбинированном нагружении рассматриваемой оболочки не обнаруживается. Это говорит о том, что в действительности диапазон допустимости использования формул (1)-(3) может быть расширен и за пределы принятого в нормах [2] ограничения по минимально допустимому шагу установки колец жесткости  $s \geq 0.5r$ .

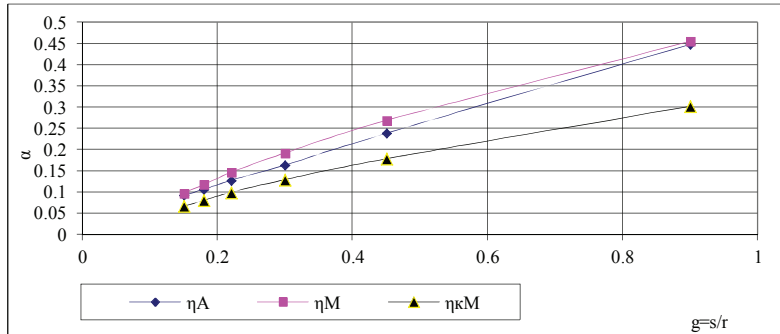


Рис 3. Изменение показателя  $\alpha$  устойчивости оболочки в зависимости от параметра  $g$ .

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Е.А., Исмагулов Б.Г., Федоряка Ю.В. Проблемы устойчивости стальных вертикальных цилиндрических резервуаров в задачах технической диагностики/ Весник академии ПДАБА. Днепропетровск, 2010.-№11. С.19-28.
2. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. Київ: Мінрегіонбуд України 2010, 78с.
3. Гоцуляк Є.О., Барвінко А.Ю., Шах В.В. «Стійкість стінок вертикальних сталевих резервуарів підкріплених ребрами жорсткості» VIII Українська науково-технічна конференція «Металічні конструкції: вигляд в минуле і майбутнє» Київ 2004г.
4. Галканов В. А., Беляев Б. Ф., Гуров А. И., Кулахметьев Р. Р. Влияние конструктивно-технологических несовершенств на работоспособность металлоконструкций нефтяных резервуаров//Промышленное и гражданское строительство, 1996.-№7.-С. 26-27.