

2. Предлагаемый способ позволяет контролировать температуру внутри тела в процессе тепловой обработки.
3. С увеличением коэффициента теплопроводности материала уменьшается максимально допустимый температурный перепад по толщине; с увеличением скорости нагрева это отличие возрастает.
4. С помощью предложенного способа можно определить допустимую скорость нагрева изделия.
5. Разработанная модель позволяет исследовать динамику нагрева объемных тел и оценивать степень равномерности температур по сечению.
6. Модель нагрева позволяет определять закон изменения температуры и достигать равномерности прогрева изделия.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Баумштейн И. П.** Автоматизированные системы управления тепловыми процессами в керамической и стекольной промышленности / И. П. Баумштейн – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд., 1979. – 88 с.
2. **Дьяконов В.** Simulink 4 Специальный справочник / Владимир Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.
3. **Дьяконов В.** MATLAB 6 : учебный курс / Владимир Дьяконов – СПб, Питер, 2001. – 592 с.
4. **Исламов М. Ш.** Проектирование и эксплуатация промышленных печей / М. Ш. Исламов. – Л. : Химия, 1986. – 280 с.
5. **Краснопрошина А. А.** Современный анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, Control System: учеб. пособ. / А. А. Краснопрошина, Н. Б. Репникова, А. А. Ильченко – К. : Корнейчук, 1999. – 144 с.
6. **Мастрюков Б. С.** Теплотехнические расчеты промышленных печей / Б. С. Мастрюков – М. : Металлургия, 1972. – 368 с.
7. **Никифорова Н. М.** Основы проектирования тепловых установок при производстве строительных материалов / Н. М. Никифорова – М. : Высшая школа, 1974. – 144 с.
8. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского – М. : Наука, 1987. – 711 с.
9. **Зобнин Б. Ф.** Теплотехнические расчеты металлургических печей: учеб. пособ. для студ. вузов / Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев, Б. И. Китаев и др., изд. (2-е изд.). – М. : Металлургия, 1982. – 360 с.
10. **Ткачев В. С.** Розробка моделі теплових процесів у тунельній печі / В. С. Ткачев // Вісник Придніпр. держ. акад. будівниц. та архітект. – Д. : ПДАБА, 2008. – № 11. – С. 41 – 47.
11. **Ткачев В. С.** Применение тепловой модели для адаптивного программного управления температурой в помещении / В. С. Ткачев, А. В. Ужеловский – // Вісник Придніпр. держ. акад. будівниц. та архітект. – Д. : ПГАСА, 2009. – № 2. – С. 26 – 32.
12. **Ткачев В. С.** Исследование динамики нагрева плоских изделий методами визуально-ориентированного моделирования / В. С. Ткачев // Вісник Придніпр. держ. акад. будівниц. та архітект. – Д. : ПГАСА, 2011. – № 1 – 2. – С. 46 – 51.

УДК 624.953:624.046.03

### ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКЕ

*Ю. В. Ивченко, к. т. н.*

**Ключевые слова:** *напряженно-деформированное состояние, ветровая нагрузка, цилиндрическая оболочка, устойчивость*

**Постановка задачи.** Стальные вертикальные цилиндрические резервуары наиболее часто применяются в химической, нефтяной и газовой промышленности как емкости, предназначенные для хранения жидкостей и газов. В настоящей работе рассматриваются стальные резервуары, используемые для хранения нефти и нефтепродуктов. Согласно

разработанным отечественным типовым решениям объем резервуаров рассматриваемого типа составляет 100 – 50 000 м<sup>3</sup>. В настоящее время на территории Украины построены резервуары объемом 75 000 м<sup>3</sup>. За рубежом объем эксплуатируемых резервуаров составляет 100 000 м<sup>3</sup> и более. Учитывая высокую стоимость хранимых в резервуарах продуктов, а также значительный ущерб, причиняемый окружающей среде при авариях с возможными утечками продукта, к эксплуатационной надежности резервуаров предъявляются высокие требования. Эксплуатационная надежность резервуара обуславливается прочностью, устойчивостью и герметичностью основных его конструктивных элементов. Определяющим фактором для надежности резервуара является прочность. Вместе с тем вопросы устойчивости также немаловажны, поскольку при полной потере устойчивости резервуар выходит из работоспособного состояния.

**Анализ состояния вопроса.** Особого внимания заслуживает действие ветровой нагрузки на вертикальные резервуары и ее учет в расчетах устойчивости. Согласно нормам проектирования [4], ветровая нагрузка на сооружения цилиндрической формы представлена в виде неравномерно распределенного по окружности знакопеременного давления и равномерно распределенной нагрузки на покрытие. При расчете резервуаров на устойчивость учитывается только давление на цилиндрическую стенку резервуара без учета разгружающей нагрузки на покрытие. При этом, согласно отечественным нормам проектирования [3], неравномерное ветровое давление на цилиндрическую стенку заменяется равномерным давлением – эквивалентным вакуумом, с одинаковым для резервуаров всех объемов коэффициентом приведения, равным 0,5. Указанный факт представляется спорным, поскольку геометрические параметры резервуаров изменяются в широком диапазоне:  $l/r = 0,6 \div 2,5$ ;  $r/t = 600 \div 3800$  ( $l, r, t$  – длина, радиус и толщина цилиндрической стенки резервуара). Для различных резервуаров ширина зоны, сжатой ветровым давлением, будет различной. Соответственно, поведение резервуара при ветровой нагрузке должно быть различным, исходя из соотношения ширины сжатой зоны и длины волны выпучивания формы потери устойчивости оболочки при внешнем давлении.

**Цель работы.** Исследовать особенности поведения цилиндрической стенки стальных резервуаров при ветровой нагрузке с учетом ее фактического распределения.

**Содержание исследований.** Исследования проводились численным методом (МКЭ) с использованием программного комплекса «ЛИРА». Рассматривались цилиндрические оболочки постоянной толщины, геометрические параметры которых принимались близкими к параметрам реальных резервуаров:  $r/t = 1500 \div 3000$ ,  $l/r = 0,6 \div 2,5$ . В качестве нагрузки принято распределение ветрового давления по окружности оболочки согласно [4]. При назначении граничных условий было рассмотрено два варианта закрепления торцов оболочки: 1) шарнирное опирание; 2) жесткая заделка.

Исследования выполнялись в три этапа. На первом этапе выполнялся анализ напряженно-деформированного состояния оболочек при ветровой нагрузке.

Статический расчет показал, что рассматриваемые оболочки имеют большой запас по прочности. Во всех случаях величина кольцевых напряжений не превышает 12 – 18 МПа, а эквивалентных напряжений – 17 – 20 МПа. Как и следовало ожидать, рассматриваемые оболочки имеют большой запас по прочности, и ветровая нагрузка в расчетах прочности может не учитываться.

Анализ деформативного состояния оболочек при ветровой нагрузке показал, что на поверхности оболочек (особенно в зоне активного ветрового давления) возникают волновые радиальные отклонения (см. рис. 1), которые являются следствием неоднородного характера нагружения. Величина таких отклонений невелика, однако длина их близка длине волн выпучивания собственной формы потери устойчивости оболочек.

На следующем этапе исследований выполнялся нелинейный анализ деформированного состояния оболочек при ветровой нагрузке. В результате расчета были получены предельные значения ветрового давления (верхнее  $q_{cr,w}^e$  и нижнее  $q_{cr,w}^h$  значения), деформированные схемы оболочек.

Анализ полученных результатов указывает на то, что существенные расхождения между линейным и нелинейным анализом деформированного состояния начинают проявляться при достижении ветровым давлением величины  $q_w = 0,8 \cdot q_{cr,w}^e$ . В этих условиях существенно

увеличиваются радиальные перемещения оболочек и изгибные напряжения кольцевого направления.

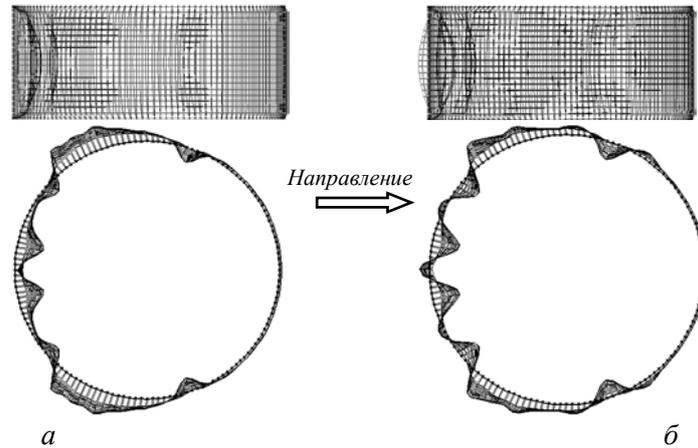


Рис. 1. Деформативные схемы оболочки с  $r/t=1500$ ,  $l/r=1$  при вариантах граничных условий: а – шарнирное опирание; б – жесткая заделка

Соотношения верхнего и нижнего предельных значений ветровой нагрузки для рассматриваемых оболочек составило: при шарнирном опирании торцов –  $q_{cr,w}^h/q_{cr,w}^e = 0,58 \div 0,65$ ; при жесткой заделке –  $q_{cr,w}^h/q_{cr,w}^e = 0,81 \div 0,87$ . При этом верхней предельной нагрузке соответствуют перемещения  $(1,0 \div 2,6) \cdot t$  – для всех вариантов граничных условий; нижней предельной нагрузке –  $(14 \div 26) \cdot t$  (шарнирное опирание) и  $(6 \div 11) \cdot t$  (жесткая заделка).

Здесь необходимо отметить, что в натуральных резервуарах всегда имеются отклонения от правильной геометрической формы, что снижает устойчивость стенки резервуара. Величина таких начальных прогибов может составлять  $f = (6 \div 20) \cdot t$  [2].

На рисунке 2 приведены деформированные схемы оболочки с параметрами  $r/t=1500$ ,  $l/r=1$ , полученные при нагрузке: а)  $q_w = 0,3 \cdot q_{cr,w}^e = 1,05$  кПа; б)  $q_w = 0,6 \cdot q_{cr,w}^e = 2,1$  кПа; в)  $q_w = q_{cr,w}^e = 3,18$  кПа.

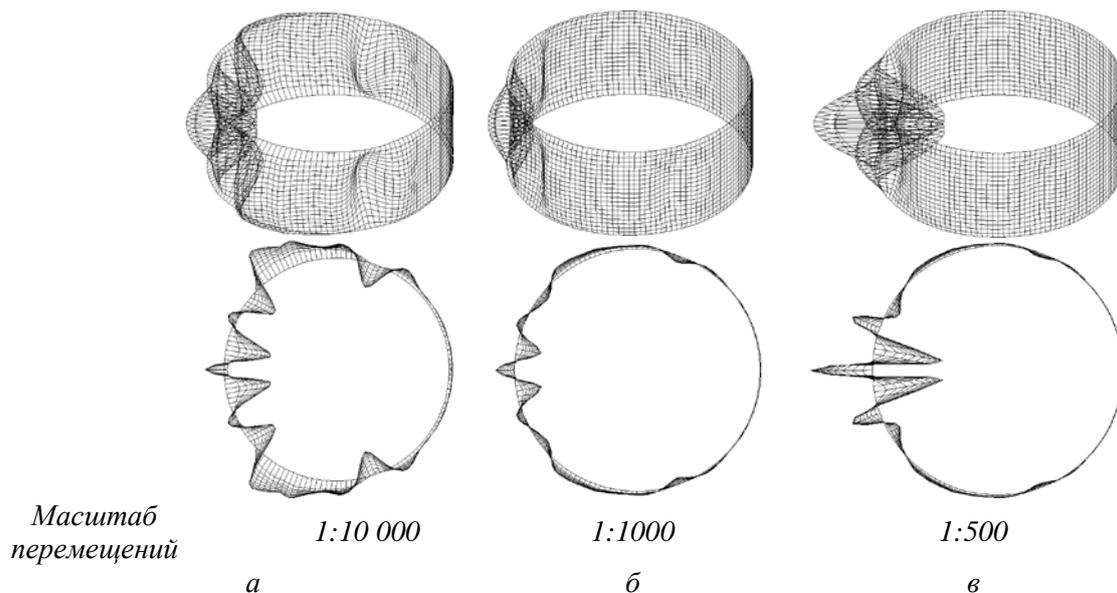


Рис. 2. Деформированные схемы оболочки с  $r/t=1500$ ,  $l/r=1$  при величине нагрузки: а –  $q_w = 0,3 \cdot q_{cr,w}^e = 1,05$  кПа; б –  $q_w = 0,6 \cdot q_{cr,w}^e = 2,1$  кПа; в –  $q_w = q_{cr,w}^e = 3,18$  кПа

Анализ деформированных схем оболочек на разных этапах деформирования показывает, что по мере увеличения нагрузки перестроек формы выпучивания оболочек не наблюдается.

Отсюда, учитывая положения работы [1], можно сделать вывод о том, что изменяемость ветровой нагрузки невелика и можно ограничиться проведением линейного расчета.

На третьем этапе исследований выполнялся линейный анализ устойчивости цилиндрических оболочек при ветровом давлении. В результате расчета получены критические значения ветрового давления  $q_{cr,w}$ .

Необходимо отметить, что, если достижение предельных значений ветрового давления  $q_{cr,w}^e$  и  $q_{cr,w}^H$  сопровождается существенным ростом деформаций оболочек, то достижение нагрузкой критического значения  $q_{cr,w}$  связано с полной потерей устойчивости оболочки, что является недопустимым для резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Из анализа полученных данных установлено, что для рассматриваемых цилиндрических оболочек критические значения давления  $q_{cr,w}$  несколько выше верхних предельных  $q_{cr,w}^e$ , однако отклонения невелики и составляют 5 – 10 %.

**Выводы.** 1. Анализ деформативного состояния оболочек при ветровой нагрузке показал, что на поверхности оболочек возникают волновые радиальные отклонения, которые являются следствием неоднородного характера нагружения. Величина таких отклонений невелика, однако длина их близка к длине волн выпучивания собственной формы потери устойчивости оболочек.

2. Процесс деформирования оболочек при ветровом давлении имеет в целом устойчивый характер, перестроек формы выпучивания оболочек с увеличением нагрузки не происходит, и в данном случае можно было бы ограничиться проведением линейного расчета устойчивости. Однако, учитывая тот факт, что в натуральных резервуарах всегда имеются отклонения от правильной геометрической формы, величина которых может составлять  $f = (6 \div 20) \cdot t$ , в инженерных расчетах оценки устойчивости резервуаров в качестве предельного значения ветровой нагрузки рекомендуется принимать нижнюю предельную нагрузку  $q_{cr,w}^H$ , определенную нелинейным расчетом.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Л. В. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации / Л. В. Андреев, Н. И. Ободан, А. Г. Лебедев. – М. : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 207 с.
2. Егоров Е. А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации / Е. А. Егоров – Д. : Навчальна книга, 2002. – 95 с.
3. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Відомчі будівельні норми України: ВБН В.2.2-58.2-94. – Офіц. вид. – К. : Держкомнафтогаз, 1994. – 98 с.
4. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006. – К. : Минстрой Украины, 2006. – 78 с.

УДК 625.1

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СПОРУД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ

*В. В. Ковальов, к. т. н.*

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
ім. академіка В. Лазаряна*

**Ключові слова:** земляне полотно залізниць, метод скінченних елементів, підвищення швидкості.

**Постановка проблеми та її зв'язок із науковими і практичними завданнями.** Відповідно до «Стратегії розвитку залізничного транспорту України на період до 2020 року» одним з актуальних напрямків є збільшення провізної і пропускної спроможності та підвищення швидкості руху. Все це викликає до необхідності пред'являти нові вимоги до