

**Березин Александр Анатольевич,**  
магистрант, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: bsaha67@mail.ru

**Березин Никита Александрович,**  
магистрант, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: berezinna.93@mail.ru

**Черепанов Анатолий Петрович,**  
д.т.н., профессор, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: boning89@mail.ru

## **АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА РЕЗЕРВУАРОВ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

**Berezin A.A., Berezin N.A., Cherepanov A.P.**

## **ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING RESERVOIRS FOR STRENGTH AND STABILITY TAKING INTO ACCOUNT SEISMIC LOADS**

**Аннотация.** В работе показан сравнительный анализ методик расчета на прочность и устойчивость вертикальных цилиндрических резервуаров с учетом сейсмических нагрузок с целью определения возможности использования расчетных формул для повышения безопасности их эксплуатации в районах с повышенной сейсмичностью.

**Ключевые слова:** прочность, разрушение, сейсмические нагрузки, устойчивость, резервуар.

**Abstract:** The paper shows a comparative analysis of methods for calculating the strength and stability of vertical cylindrical tanks with consideration of seismic loads in order to determine the possibility of using calculation formulas to improve their operation safety in areas with high seismicity.

**Keywords:** fracture, seismic loads, stability, strength, reservoir.

Сооружения с оболочечными конструкциями, в том числе вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и газа, широко применяются в нефтегазовой и других отраслях промышленности, расположенных в сейсмоопасных районах. В мировом опыте резервуаростроения содержится достаточно данных о поведении резервуаров во время землетрясений. Анализ последствий землетрясений свыше 6 баллов по шкале Рихтера показывает, что стальные вертикальные цилиндрические резервуары весьма чувствительны к сейсмическим воздействиям, вследствие чего они повреждаются и разрушаются, что приводит к значительному ущербу, причиняемому народному хозяйству и экологии.

Типичные повреждения резервуаров во время землетрясений:

- потеря устойчивости нижнего пояса оболочки («слоновья нога»);
- потеря устойчивости верхнего пояса вследствие гидродинамического давления;
- разрушение от кольцевых гидродинамических напряжений;
- образование пластического шарнира на плите днища вследствие частичного отрыва от основания (для незакрепленных резервуаров);
- отрыв анкерных болтов;
- разрушение подводящих трубопроводов;

• горизонтальное смещение вследствие проскальзывания днища по основанию.

Учет сейсмических воздействий в зависимости от районов строительства представляет сложность не только при проектировании, но особенно при оценке их технического состояния и продлении срока безопасной эксплуатации.

В США основным нормативным документом, регулирующими расчеты прочности резервуаров, в том числе, с учетом сейсмических воздействий, является стандарт [1], который является одним из самых распространенных и широко применяемых в странах северного и южного континента Америки и в странах Африки. В России для этой цели применяются Правила проектирования, изготовления и монтажа [2].

Рассматривая и сравнивая методики расчета [1] и [2], применяемые в том числе и за рубежом, авторы обратились к работе [3], в которой сделан обзор истории их разработки и сопоставлены основные параметры сейсмических нагрузок, приведенные в этих методиках. Работа примечательна также тем, что в ней выполнен анализ применяемых методик для расчета конструкций проектируемых резервуаров и представлены формулы расчета.

Сравнение формул, примененных в методиках [1] и [2] для определения импульсивного и конвективного периода колебаний, показано в таблице 1, импульсивного гидродинамического давления - в таблице 2, высоты волны продукта - в таблице 3, основных сейсмических параметров - в таблице 4, и конвективного гидродинамического давления - в таблице 5.

Таблица 1

Сравнение формул импульсивного и конвективного периода колебаний

Методика	Импульсивный период	Конвективный период
США [1]	$T_i = \frac{C_i}{\sqrt{1000}} \frac{H\sqrt{\rho R}}{\sqrt{E_t}}$ , где $C_i=f(\gamma)$	Не учитывается
Россия [2]	Не учитывается	$T_c = \sqrt{\frac{R}{1,84g \operatorname{th}\left(1,84\frac{H}{R}\right)}}$

Таблица 2

Определение импульсивного гидродинамического давления

Методика	Импульсивное гидродинамическое давление, Па
США [1]	$N_i = \begin{cases} 0,866\rho S_i H R [1 - \xi^2] \tanh\left(\frac{1,732}{\gamma}\right); & \gamma \leq 1,5; \\ 2,128\rho S_i R^2 \left[ \frac{(1-\xi)\gamma}{1,5} - 0,5 \left(\frac{(1-\xi)\gamma}{1,5}\right)^2 \right]; & \frac{1,5}{1-\xi} > \gamma > 1,5; \\ 1,06\rho S_i R^2; & \gamma \geq \frac{1,5}{1-\xi} \end{cases}$
Россия [2]	$P = \frac{\gamma_n K_i K_{\psi i}}{1000 \gamma_{seismic}} \rho S_i R C_{pi} \cos\theta ;$ $C_{pi} = 1 - (10\gamma + 1,4)^{-2,1} - 061325\xi^6 - C_{pc}$

Таблица 3

## Определение высоты волны продукта

Методика	высоты волны продукта, м
США [1]	$d_{max} = C_d R$ ; где $C_d \approx 2 \frac{S_c}{g}$
Россия [2]	$d_{max} = 0,84 \frac{S_c}{g} r$

Таблица 4

## Сравнение основных сейсмических параметров

Методика	Импульсивные параметры	Конвективные параметры
США [1]	$\begin{cases} m_i = m \frac{\text{th}1,732/\gamma}{1,732/\gamma}, \text{ при } \gamma \leq 0,666 \\ h_i = 0,375H \\ m_i = m[1 - 0,436/\gamma] \\ h_i = H[0,5 - 0,188/\gamma] \end{cases}, \text{ при } \gamma > 0,666$	$m_c = 0,46m \frac{1}{\gamma} \text{th}1,84\gamma ;$ $h_c = H \left[ 1 - \frac{\text{sh}(1,84\gamma) - 1}{1,84\gamma \text{sh}(1,84\gamma)} \right]$
	$P = \sqrt{S_i^2((m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell})^2 + S_c^2 m_c^2)};$ $M = \sqrt{S_i^2 h_i^2((m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell})^2 + S_c^2 h_c^2 m_c^2)}$	
Россия [2]	$M = \frac{\gamma_n [K_i S_i (m_{shell} h_{shell} + m_{roof} h_{roof}) + \alpha m H]}{\gamma_{seismic}};$ $\alpha = \sqrt{\left( K_i K_{\psi i} S_i \left( 0,483 - \frac{0,008}{\gamma} - \eta_l \right) \right)^2 + (K_c K_{\psi c} S_c \eta_l)^2};$ $\eta_l = \frac{0,247}{\gamma} \left[ 1,84 \tan h 1,84\gamma + \frac{1}{\gamma} \left( \frac{1}{\text{ch}1,84\gamma} - 1 \right) \right]$	

Таблица 5

## Определение импульсивного гидродинамического давления

Методика	Импульсивное гидродинамическое давление, Па
США [1]	$N_i = \begin{cases} 0,866 \rho S_i H R [1 - \xi^2] \tanh \left( \frac{1,732}{\gamma} \right); \gamma \leq 1,5; \\ 2,128 \rho S_i R^2 \left[ \frac{(1-\xi)\gamma}{1,5} - 0,5 \left( \frac{(1-\xi)\gamma}{1,5} \right)^2 \right]; \frac{1,5}{1-\xi} > \gamma > 1,5; \\ 1,06 \rho S_i R^2; \gamma \geq \frac{1,5}{1-\xi} \end{cases}$
Россия [2]	$P = \frac{\gamma_n K_i K_{\psi i}}{1000 \gamma_{seismic}} \rho S_i R C_{pi} \cos \theta ;$ $C_{pi} = 1 - (10\gamma + 1,4)^{-2,1} - 061325 \xi^6 - C_{pc}$

Основные обозначения в таблицах:

$\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $H$  — максимальный уровень продукта, м;  
 $R$  — радиус резервуара, м;  
 $t$  — толщина стенки резервуара, м;  
 $T_i$  — импульсивный период колебаний, с;  
 $T_c$  — конвективный период колебаний, с;  
 $\omega$  — циклическая частота, 1/с;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $S_i, S_c$  — спектральные ускорения, м/с<sup>2</sup>;  $S$  — пиковое ускорение, м/с<sup>2</sup>;  
 $m$  — масса продукта, кг;  
 $h$  — высота приложения гидродинамической силы, м;  
 $J_1, J_1'$  — модифицированная функция Бессера и ее производная;  
 $\theta$  — горизонтальный угол, град;  
 $C, k$  — коэффициенты;  
 $p$  — гидродинамическое давление, МПа;  
 $P$  — результирующая сила, Н;  
 $M$  — опрокидывающий момент, Н · м;  
 $Y$  — расстояние от рассчитываемой точки до зеркала, м;  
 $K_i, K_c$  — коэффициент учета неупругих деформаций;  
 $K_{\psi_i}, K_{\psi_c}$  — коэффициенты учета рассеивания энергии;  
 $\gamma_c$  — коэффициент условий работы;  
 $\gamma_n$  — коэффициент надежности по ответственности;  
 $f(\gamma)$  — функция по  $\gamma$  надежности и ответственности;  
 $h_{shell}$  — мода стенки (оболочки);  $h_{roof}$  — мода крыши;  $h_{plate}$  — мода днища;  
 $\gamma_{seismic}$  — дополнительный сейсмический коэффициент условий работы.  
Индексами обозначены моды:  $i$  — импульсивная;  $c$  — конвективная;  $f$  — гибкая.

Коэффициент относительных размеров резервуара определяется формулой:

$$\xi = \frac{H-Y}{H}.$$

Коэффициент отношения высоты наполнения продукта к наружному радиусу резервуара определяется формулой:

$$\gamma = \frac{H}{R}.$$

В методиках [1] и [2] частота плесканий жидкости в резервуаре при сейсмических воздействиях выражается формулой:

$$\omega_n^2 = \frac{g}{R} \lambda_n \tanh \left[ \lambda_n \frac{H}{R} \right],$$

где  $n$  — форма колебаний;

$\lambda_n$  — нулевой индекс функции Бессера, когда функция частоты плесканий (колебаний) по горизонтали определена без учета разных составляющих.

Результаты анализа показали, что формулы, приведенные в таблицах 1÷5, применимы для определения допустимых сейсмических нагрузок при расчете прочности и устойчивости вновь проектируемых резервуаров. В то же время ни стандарт [1], ни Правила [2] не учитывают фактического технического состояния при износе основных несущих конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров, отработавших, например, 20 и более лет. Поэтому при проведении экспертизы промышленной безопасности в большинстве случаев расчет на прочность стенок резервуаров выполняется с учетом только статической нагрузки от жидкости, хранящейся в нем [4].

Из анализа приведенных методов расчета в инструкцию по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных цилиндрических резервуаров следовало бы ввести требования по устойчивости резервуаров не только с учетом сейсмических нагрузок, но и с учетом фактического технического состояния, а именно:

- фактических толщин стенок, поскольку равнодействующая горизонтального гидродинамического давления превышает статическое давление в несколько раз;
- наполнения резервуаров принимать ниже верхнего края стенки на высоту волны, то есть ниже максимально уровня, приведенного в документации большинства действующих резервуаров;
- нагрузок при боковом сдвиге резервуара, поскольку большинство действующих резервуаров не имеют анкерного крепления днищ к фундаментам;
- снижения толщин стенок при коррозионном износе, деградации металла и сварных швов на последующий период эксплуатации;
- объемов технического диагностирования, коэффициентов дефектности и классов опасности резервуаров для окружающей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт А.Р.1. 650: сварные стальные резервуары для хранения нефти / Американский институт нефти. 1988.
2. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М.: НПК Изотермик, 2009. 216 с.
3. Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Обзор упрощенных методик расчета резервуаров на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 53–62. DOI : 10.22227/1997-0935.2017.1.53-62.
4. РД 153-112-017-97. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров.