УДК 624.042.7

ОБЗОР УПРОЩЕННЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА РЕЗЕРВУАРОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Р.Р. Шигапов, О.А. Ковальчук

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Аннотация. В статье приводится обзор исследований, посвященных теме проектирования сейсмостойких резервуаров. Дан краткий экскурс в историю исследования реакции резервуаров на динамическое воздействие, описаны основные методики, включенные в нормы различных стран. Произведено сравнение выражений основных сейсмических параметров: импульсивного и конвективного периодов свободных колебаний, результирующей силы и опрокидывающего момента, импульсивного и конвективного давлений и высоты волны в резервуаре.

Ключевые слова: резервуары, сейсмические воздействия, гидродинамическое давление, импульсивная мода, конвективная мода

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.53-62

REVIEW OF SIMPLIFIED SEISMIC ANALYSIS PROCEDURES FOR STORAGE TANKS

R.R. Shigapov, O.A. Koval'chuk

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract. This paper presents a review of simplified procedures for design of earthquake-resistant cylindrical tanks included in codes and standards of several countries.

A brief excursus on the history of research is given. A paper of G. Housner is the basis for the latter studies. A mechanical model of two inertia masses is offered in this paper. This mechanical model with some adjustments (such as adding a one more mass to consider the flexibility of tank ringwall and foundation) is used in the latter works.

Aside from papers using paradigm of Housner's work, some alternative methods are reviewed. These methods are mentioned in 1) G. Mano's paper, recommended by ASCE as alternative method; 2) Russian Recommendations of TsNIISK (Central Scientific Research Institute for Building Structures) by Goldenblat and Nikolaenko, also mentioned in a monograph of A.N. Birbrayer, concerning seismic analysis of nuclear plant facilities.

Codes reviewed in this paper belong to the following regions: Russia, USA, New Zealand, Europe. These codes are: Appendix E of API 650; AWWA D-100; Eurocode 8, part 4; Red Book of New Zealand National Society for Earthquake Engineering and Russian code STO SA-03-002-2009.

In order to make a comparison of the assessment procedures mentioned in the codes reviewed a few tables containing major expressions are submitted. The expressions are modified so that it is possible to compare them. The parameters of seismic analysis given in these tables are: impulsive and convective time periods of tank, equivalent base shear and overturning moment, impulsive and convective hydrodynamic pressure distribution on tank wall and maximum sloshing wave height.

Key words: storage tanks, seismic effects, hydrodynamic pressure, impulsive mode, convective mode

На данный момент нефтегазовая отрасль является важнейшей отраслью промышленности РФ, что связано с повсеместным возведением резервуарных объектов, в т.ч. с увеличением их числа в сейсмоопасных районах. В мировом опыте резер-

вуаростроения содержится достаточно большое количество данных о поведении резервуаров во время землетрясений. Ниже представлены 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 подводных трубопроводов;
- горизонтальное смещение вследствие проскальзывания.

Наибольшую трудность для расчета и эксплуатации с учетом сейсмических воздействий вызывают сооружения с оболочечными конструкциями, такие как наземные вертикальные шаровые и цилиндрические резервуары для хранения нефти и газа.

Первые исследования по определению гидродинамического давления на конструкции начались в 30-х гг. XX в. В 1934 г. Г. Вестергор получил выражение для давления для прямоугольной вертикальной дамбы [1]. В том же году Л. Хоскинс и Л. Якобсен экспериментально определили импульсивное давление в прямоугольном резервуаре [2]. Лам (1945) в своей работе привел классическую формулу (см. формулу (1)) для определения частоты плесканий жидкости [3].

В 1949 г. Якобсен вычислил гидродинамическое давление, решив уравнение Лапласа для цилиндрического резервуара с жидкостью, принимая его стенки и связь с фундаментом абсолютно жесткими.

Упрощенные методики для расчета резервуаров на сейсмические воздействия, как правило, используют упрощенную механическую модель с точечными массами.

В 1954 г. увидела свет основополагающая работа Дж. Хаузнера [4]. В ней предлагалась упрощенная механическая модель, заменяющая взаимодействие конструкция–жидкость системой точечных масс, упрощающей расчет гидродинамических сил. Система имела две степени свободы: импульсивную (движение оболочки резервуара с большей частью содержимого) и конвективную (плескания поверхностных слоев продукта). Принимая стенки абсолютно жесткими, а жидкость — несжимаемой и невязкой, и используя приближенные методы, он получил выражения для контейнеров нескольких разновидностей, в т.ч. и для цилиндрического.

Сильные землетрясения в 1964 г. в Ниигате, Япония и на Аляске, а также в Паркфилде, США в 1966 г. произвели сильные повреждения множества резервуаров, спроектированных по положениям Хаузнера. Вызванные этим многочисленные исследования показали, что допущение о жесткости стенок

резервуара и связи с грунтом неадекватно реальному поведению конструкции.

В работе А. Велетсоса и Дж. Янга (1977) было показано, что импульсивные ускорения в резервуаре с гибкими стенками в несколько раз превышают пиковые ускорения [5]. Учет гибкости оснований приводит к увеличению значения импульсивного периода. Однако импульсивная нагрузка может определяться и без учета гибкости, если в уравнениях, полученных для жесткой стенки, положить вместо пикового ускорения спектральное, соотнесенное с основным периодом свободных колебаний системы.

М. Харун и Г. Хаузнер (1981) модернизировали теорию расчета в соответствии с предположением о гибкости стенок резервуара [6].

В США основным нормативным документом, регулирующим расчеты резервуаров, в т.ч. с учетом сейсмических воздействий, является API 650: Welded steel tanks for oil storage (Стальные сварные резервуары для хранения нефти) [7]. Расчетная методика, изложенная в приложении Е данного нормативного документа, детально разработана в работе Р. Возняка и У. Митчелла [8]. Этот стандарт включает в себя требования к определению исходной сейсмической нагрузки, напряжений от гидродинамической нагрузки, опрокидывающего момента, свободного запаса, необходимости закрепления резервуара и требования к гибкости трубопроводов. Расчет по методике API является одним из самых распространенных и широко применяемых.

AWWA D-100, нормативный документ, регламентирующий расчеты резервуаров для хранения воды, использует методику, схожую с методикой API 650 [9].

В 1986 г. Джордж Манос представил альтернативную методику анализа сейсмического воздействия, основанную на экспериментальных данных и наблюдениях за поведением резервуаров при землетрясениях [10]. Вместо моделирования сложного поведения днища при частичном отрыве, Манос предлагает сравнивать опрокидывающий момент с эмпирически определенным удерживающим моментом, обеспечиваемым суммарным напряжением, близким к значениям, при которых происходит потеря устойчивости.

Давление достигает максимального значения в узле между стенкой и днищем в точке, противоположной точке максимального отрыва, и постепенно уменьшается до нуля на эмпирически определенном расстоянии от узла. Максимальное сжимающее напряжение не должно превышать 75 % от критического напряжения потери устойчивости. Суммарные меридиональные сжимающие напряжения уравновешиваются равными растягивающими на-

пряжениями в точке отрыва. Плечи гипотетического рычага определяются по эмпирической формуле. Удерживающий момент определяется с учетом значения плеч.

Опрокидывающий момент определяется по методике API без учета конвективной составляющей. Резервуар считается устойчивым, если удерживающий момент M_{RES} больше, чем опрокидывающий M_{OT} . С точки зрения ускорений, это неравенство выражается в следующем: резервуар устойчив, если предельное импульсное ускорение C_{eq} , вычисленное при $M_{OT} = M_{RES}$, больше, чем пиковое ускорение спектра с 2%-ым демпфированием.

Важной особенностью методики Маноса является использование коэффициента деформативности основания S , которое считается равным 1 для жестких оснований (бетон, асфальтобетон); 1,2 — для более мягких оснований (хрупкие скальные грунты, песок или почва). Таким образом, учитывается тот факт, что зона сжимающих напряжений при слабых основаниях больше, чем при жестких, что вызывает увеличение удерживающего момента и ведет к увеличению максимального ускорения, при котором резервуар сохраняет устойчивость. Это входит в противоречие с API, где тип основания не влияет на удерживающий момент и в силу роста конвективных ускорений при слабых основаниях увеличивает опрокидывающий.

В 1986 г. были выпущены нормы Новой Зеландии [11], основанные на работе М. Пристли и других ученых [12]. Документ содержит результаты исследований Новозеландского национального общества инженеров-сейсмологов. Целью разработчиков было создание норм, которые охватывали бы большее количество типов резервуаров из различных материалов.

Для резервуаров с жесткими стенками используется механическая модель Велетсоса и Янга [5], а для гибких — модель Харуна и Хаузнера [6]. Для определения импульсивного периода адаптирована формула, полученная Харуном и Хаузнером [6].

Модели жесткого и гибкого резервуаров приведены на рис. 1.

В Европе сейсмические расчеты резервуаров с жидкостью регламентирует Еврокод 8, Часть 4 [13]. Этот стандарт содержит информацию о расчетах конструкций наземных и подземных трубопроводных систем, силосов и резервуаров различных типов и назначения. Для резервуаров с жесткими стенками используется механическая модель Велетсоса и Янга [5], для гибких резервуаров — методика П. Малхотры [14], который внес в схемы Велетсоса [15] и Харуна и Хаузнера [6] следующие модификации:

- учет только первых форм импульсивного и конвективного режимов;
- уточнение импульсивной и конвективной высот с целью учета влияния высших мод;
- обобщение формулы импульсивного периода для применения как для стальных, так и железобетонных резервуаров со стенкой переменной толщины;
- сочетание импульсивной и конвективной нагрузок методом прямой суммы, а не SRSS (квадратный корень суммы квадратов).

Вопросы поведения резервуара при отрыве от основания и взаимосвязи сооружения и основания были исследованы в работах Р. Пика [16], С. Нацияваса [17], А. Велетсоса и Й. Тана [18] и П. Малхотры [19]. Значительные дополнения к проблеме реакции закрепленных и незакрепленных резервуаров были внесены Д. Фишером [20] и Ф. Раммершторфером [21]. Положения этих исследований также были включены в стандарт [13].

В РФ основными регулирующими документами являются нормы общего характера — СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах» [22] и СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» [23]. Их применение к расчету резервуаров имеет серьезные ограничения. Тем не менее существуют отечественные нормы и учебники, которые содержат некоторые положения расчета резервуаров на сейсмические воздействия.

Рис. 1. Модели резервуара: а — жесткая; б — гибкая

Рис. 2. Расчетная схема резервуара с жидкостью [26]

В 1960-е гг. ЦНИИ строительных конструкций им. В.А. Кучеренко выпустил рекомендации по расчету резервуаров и газгольдеров на сейсмические воздействия, авторами которых были И.И. Гольденблат и Н.А. Николаенко [24]. В этих рекомендациях приводятся формулы для определения гидродинамического давления, частоты первой формы колебаний и свободного запаса для цилиндрических резервуаров, в т.ч. с плавающей крышей. В зависимости от частоты первой формы колебаний выделяются два варианта: 1) $\omega > 1$ рад/с и 2) $\omega \leq 1$ рад/с, в зависимости от чего и определяется гидродинамическое давление. Высота волны поверхностного слоя при втором варианте не определяется. Отдельно приводятся формулы для цилиндрических резервуаров с плавающими крышами.

А.Н. Бирбрайер, описывая сейсмостойкость сооружений атомных станций в труде [25], выделяет два подхода к расчету резервуаров с жидкостью.

Первый подход основывается на методике Гольденблата и Николаенко. Второй подход включает в себя адаптированные выражения из работы Хаузнера.

Создатели стандарта организации «Ростехэкспертиза» СТО-СА-03-002–2009 [26] пошли по другому пути. Расчетные формулы, лежащие в основе методики расчета представлены в статьях [27, 28]. Они получены для деформированной расчетной схемы, приведенной на рис. 2.

Ниже, в табл. 1–5 представлено сравнение формул в методиках, описанных выше, для чего выражения в оригинальных документах были определенным образом изменены.

Частота плесканий жидкости определяется по формуле

$$\omega_n^2 = \frac{g}{R} \lambda_n \tanh\left(\lambda_n \frac{H}{R}\right), \quad (1)$$

где λ_n — нули модифицированной функции Бессера; n — форма колебаний.

Табл. 1. Сравнение формул импульсивного периода колебаний

Источник	Импульсивный период, с
[4]	Не приведено
[7]	$T_i = \frac{C_i}{\sqrt{1000}} \frac{H \sqrt{\rho R}}{\sqrt{Et}}$, где $C_i = f(\gamma)$
[9]	Не приведено
Жесткий резервуар [13]	$T_i = \frac{2}{0,01675\gamma^2 - 0,15\gamma + 0,46} R \frac{\sqrt{\rho H}}{\sqrt{Et}}$
Гибкий резервуар [13]	$T_f = (0,157\gamma^2 + \gamma + 1,49) R \frac{\sqrt{\rho H}}{\sqrt{Et}}$
Жесткий резервуар [12]	$T_i = \frac{5,61\pi}{C_i} H \frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}}$, где $C_i = f\left(\gamma; \frac{t}{R}\right)$

Табл. 1. Сравнение формул импульсивного периода колебаний (окончание)

Источник	Импульсивный период, с
Гибкий резервуар [12]	$T_{f1} = T_i \sqrt{1 + \frac{k_f}{k_x} \left(1 + \frac{k_x h_f^2}{k_\theta} \right)}$ $T_{f2} = 2\pi \sqrt{\frac{m_i + m_{plate}}{k_x} + \frac{m_i h_i^2}{k_\theta}}$
[10]	Не приведено
[24]	Не приведено
по Николаенко [25] по Хаузнеру [25]	Не приведено
[26]	Не приведено

Примечания. 1. Основные обозначения в таблицах: ρ — плотность, кг/м³; H — максимальный уровень продукта, м; R — радиус резервуара, м; E — модуль упругости, МПа; t — толщина стенки резервуара, м; T — период, с; ω — циклическая частота, с⁻¹; g — ускорение свободного падения, м/с²; S_p , S_c — спектральные ускорения, м/с²; S — пиковое ускорение, м/с²; m — масса продукта, кг; h — высота приложения гидродинамической силы, м; λ_n — нули функции Бессера; J_1 , J_1' — модифицированная функция Бессера и ее производная; θ — горизонтальный угол; C , k — коэффициенты; p — гидродинамическое давление, МПа; P — результирующая сила, Н; M — опрокидывающий момент, Н · м; Y — расстояние от рассчитываемой точки до зеркала; K_p , K_c — коэффициент учета неупругих деформаций; $K_{\psi p}$, $K_{\psi c}$ — коэффициенты учета рассеивания энергии; γ_c — коэффициент условий работы; γ_s — дополнительный сейсмический коэффициент условий работы; γ_n — коэффициент надежности по ответственности; k_f — действительная

жесткость системы «жидкость-конструкция»; k_x — горизонтальная жесткость; k_θ — жесткость основания; $\xi = \frac{H-Y}{H}$; $\gamma = \frac{H}{R}$.

2. Индекс «i» означает импульсивную моду, «c» — конвективную, «f» — гибкую, «shell» — оболочку, «roof» — крышу, «plate» — плиту днища.

Табл. 2. Сравнение основных сейсмических параметров*

Источник	Импульсивные параметры	Конвективные параметры
[4]	$m_i = m \frac{\text{th} 1,732/\gamma}{1,732/\gamma}$ $h_i = 0,375H$ $P_i = m_i S_i; M_i = P_i h_i$	$m_c = 0,39m \frac{1}{\gamma} \text{th} 1,84\gamma$ $h_c = H \left[1 - \frac{\text{ch}(1,84\gamma) - 135/88}{1,84\gamma \text{sh}(1,84\gamma)} \right]$ $P_c = m_c S_c; M_c = P_c h_c$
[7]	$\begin{cases} m_i = m \frac{\text{th} 1,732/\gamma}{1,732/\gamma}, \gamma \leq 0,666 \\ h_i = 0,375H \end{cases}$ $\begin{cases} m_i = m [1 - 0,436/\gamma] \\ h_i = H [0,5 - 0,188/\gamma], \gamma > 0,666 \end{cases}$	$m_c = 0,46m \frac{1}{\gamma} \text{th} 1,84\gamma$ $h_c = H \left[1 - \frac{\text{ch}(1,84\gamma) - 1}{1,84\gamma \text{sh}(1,84\gamma)} \right]$
	$P = \sqrt{S_i^2 \left((m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell})^2 + S_c^2 m_c^2 \right)}; M = \sqrt{S_i^2 h_i^2 \left((m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell})^2 + S_c^2 h_c^2 m_c^2 \right)}$	
[9]	Аналогично [7]	Аналогично [7]
	Аналогично [7], SRSS	
Жесткий резервуар [13]	$m_i = 2m \frac{H}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n J_1(v_n/\gamma)}{v_n^2 J_1'(v_n/\gamma)}$ $h_i = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n J_1(v_n/\gamma)}{v_n^4 J_1'(v_n/\gamma)} (v_n (-1)^n - 1) \right]}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n J_1(v_n/\gamma)}{v_n^2 J_1'(v_n/\gamma)}}$ $v_n = (2n+1)\pi/2$	$m_c = \frac{2}{\lambda_n (\lambda_n^2 - 1)} m \frac{1}{\gamma} \text{th} 1,84\gamma$ $h_c = H \left[1 - \frac{\text{ch}(\lambda_n \gamma) - 1}{\lambda_n \gamma \text{sh}(\lambda_n \gamma)} \right]$ <p>При $n = 1$ — аналогично [23]</p>
	$P = S_i \left(m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} S_{cn} m_{cn}; M = S_i h_i \left(m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} S_{cn} h_{cn} m_{cn}$	

Табл. 2. Сравнение основных сейсмических параметров* (окончание)

Источник	Импульсивные параметры	Конвективные параметры
Гибкий резервуар [13]	$m_f = C_f m \gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{v_n} K_n$ $h_f = H \frac{\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n v_n - 2}{v_n^2} K_n + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K_n J_1'(v_n/\gamma)}{v_n}}{\gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{v_n} K_n}$ $C_f = \frac{\int_0^1 f(\xi) \left[\frac{\rho_{shell}}{\rho} \frac{t(\xi)}{H} + \sum_{n=0}^{\infty} K_n' \cos(v_n \xi) \right] d\xi}{\int_0^1 f(\xi) \left[\frac{\rho_{shell}}{\rho} \frac{t(\xi)}{H} + \sum_{n=0}^{\infty} K_n \cos(v_n \xi) \right] d\xi}$ $K_n' = 2 \frac{(-1)^n J_1(v_n/\gamma)}{v_n^2 J_1'(v_n/\gamma)}$ $K_n = \frac{\int_0^1 f(\xi) \cos(v_n \xi) d\xi}{v_n} \frac{J_1(v_n/\gamma)}{J_1'(v_n/\gamma)}$	$P = S_i (m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell}) + \sum_{n=1}^{\infty} S_{cn} m_{cn} + S_f m_f$ $M = S_i h_i (m_i + m_{roof} + m_{plate} + m_{shell}) + \sum_{n=1}^{\infty} S_c h_c m_c + S_f h_f m_f$
[12]	Масса, высота ее приложения, результирующая сила и опрокидывающий момент определяются по таблице в зависимости от H/R	
	m_i — аналогично [4] $h_i = 0,41 H \gamma^{0,15}$	Не приведено
[10]	$\left. \begin{aligned} P &= 1,169 C_{soil} \frac{Et^2}{\gamma^{n+1}} \left(\frac{t}{t_{plate}} \right)^{0,1} \\ M &= 0,48 C_{soil} \frac{ERt^2}{\gamma^{n-0,15}} \left(\frac{t}{t_{plate}} \right)^{0,1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow S_{i,max} = \frac{0,644 C_{soil} Et^2}{\rho \gamma^n H^2 \operatorname{th}(1,732/\gamma)} \left(\frac{t}{t_{plate}} \right)^{0,1},$ $n = 0,1 + 0,2 \gamma$	
[24]	$\begin{cases} P = m S C_{p1}; h = H C_h, \omega \leq 1 \text{ рад/с;} \\ P = m S C_{p2} \sqrt{1 - e^{-60\tilde{\omega}}}; h — \text{центр тяжести эпюры, } \omega > 1 \text{ рад/с,} \end{cases}$ <p>где $C_{p1} = f(\gamma)$, $C_h = f(\gamma)$, $C_{p2} = f(\tilde{\omega}, K_p, \omega)$, где</p> $K_p = 0,418 - 0,237 \frac{\operatorname{th} 1,84 \gamma}{\gamma}, \tilde{\omega} = \frac{5,98 \sqrt{\gamma}}{R} \sqrt{\frac{\operatorname{th} 1,84 \gamma}{R}}$	
по Николаенко [25]	Аналогично [24] при $\omega \leq 1,1$ рад/с	
по Хаузнеру [25]	Аналогично [4]	Аналогично [7]
	$P = m_i S_i + 1,2 m_c S_c \sin \omega t$; $M = m_i S_i h_i + 1,2 m_c S_c h_c \sin \omega t$; $1/R \tan h 1,84 \gamma$	
	Не приведено	Не приведено
[26]	$M = \frac{\gamma_n \left[K_i S_i (m_{shell} h_{shell} + m_{roof} h_{roof}) + \alpha m H \right]}{\gamma_{seismic}}$ $\alpha = \sqrt{\left(K_i K_{\psi i} S_i \left(0,483 - \frac{0,008}{\gamma} - \eta_l \right) \right)^2 + \left(K_c K_{\psi c} S_c \eta_l \right)^2}$ $\eta_l = \frac{0,247}{\gamma} \left[1,84 \tan h 1,84 \gamma + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{1}{\operatorname{ch} 1,84 \gamma} - 1 \right) \right]$	

*Основные обозначения см. в примечаниях к табл. 1.

Табл. 3. Определение высоты волны продукта*

Источник	Высота волны, м
[4, 10]	Не приведено
[7]	$d_{\max} = C_d R$, где $C_d \approx 2 \frac{S_c}{g}$
[9]	$d_{\max} = 0,84 \frac{S_c}{g} R$
[12, 13, 26]	Аналогично [9]
[24]	$\begin{cases} d_{\max} = 0,836 \frac{S}{g} R C_d \sqrt{1 - e^{-60\tilde{\omega}}}; C_d = f(\omega, \tilde{\omega}), \omega < 1 & /; \\ d_{\max} = 0,0836 \frac{\omega}{\sqrt{\tilde{\omega}}} \frac{S}{g} R \sqrt{1 - e^{-60\tilde{\omega}}}; 6 \geq \omega \geq 1 & / \end{cases}$
по Николаенко [25]	$d_{\max} = 2 \frac{R}{g} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{S_n^2}{(\lambda_n^2 - 1)^2}}$
по Хаузнеру [25]	$d_{\max} = \frac{0,408 R \operatorname{ch} 1,84 \gamma}{\frac{1}{1,84^2 \frac{S_c}{g} \gamma \tanh^2 1,84 \gamma} - 1}$

*Основные обозначения см. в примечаниях к табл. 1.

Табл. 4. Определение импульсивного гидродинамического давления*

Источник	Импульсивное гидродинамическое давление, Па
[4]	$p_i = 0,866 \rho S_i H [1 - \xi^2] \tanh(1,732/\gamma) \cos \theta$
[7] [Н/м]	$N_i = \begin{cases} 0,866 \rho S_i H R [1 - \xi^2] \tanh(1,732/\gamma); \gamma \leq 1,5; \\ 2,128 \rho S_i R^2 \left[\frac{(1-\xi)\gamma}{1,5} - 0,5 \left(\frac{(1-\xi)\gamma}{1,5} \right)^2 \right]; \frac{1,5}{1-\xi} > \gamma > 1,5; \\ 1,06 \rho S_i R^2, \gamma \geq \frac{1,5}{1-\xi} \end{cases}$
[9]	Аналогично [7]
Жесткий резервуар [13]	$p_i = C_i \rho S_i H \cos \theta$ $C_i = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{J_1'(v_n/\gamma) v_n^2} \cos(v_n \xi) J_1(v_n/\gamma)$
Гибкий резервуар [13]	$p_f = \rho H C_f \cos \theta \sum_{n=0}^{\infty} \cos(v_n \xi) S_{fn}$
[12]	Выражения в явном виде не приведены, однако присутствует графическое представление эпюры, полученное у Велетсуса [15]
[17]	Не приведено
[24]	$\begin{cases} p = \rho S R \left[1 - 0,837 \left[\frac{\operatorname{ch}(1,84 \xi \gamma)}{\operatorname{ch}(1,84 \gamma)} \right] \right] \cos \theta; \omega \leq 1 & /; \\ p = \rho S R C_p \sqrt{1 - e^{-60\tilde{\omega}}} \cos \theta; \omega > 1 & / , \\ C_p = f(\tilde{\omega}, K_p, \omega) \end{cases}$
по Николаенко [25]	$p = \rho S R \left[1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(1,84 \xi \gamma)}{(\lambda_n^2 - 1) \operatorname{ch}(1,84 \gamma)} \right] \cos \theta$

Табл. 4. Определение импульсивного гидродинамического давления* (окончание)

Источник	Импульсивное гидродинамическое давление, Па
по Хаузнеру [25]	Не приведено
[26]	$p = \frac{\gamma_n K_i K_{\psi i}}{1000 \gamma_{seismic}} \rho S_i R C_{pi} \cos \theta$ $C_{pi} = 1 - (10\gamma + 1,4)^{-2,1} - 0,1325 \xi^6 - C_{pc}$

*Основные обозначения см. в примечаниях к табл. 1.

Табл. 5. Определение конвективного гидродинамического давления*

Источник	Конвективное гидродинамическое давление, Па
[4]	$p_c = 0,0833 \rho R S_c \left[\frac{\operatorname{ch} 1,84 \xi \gamma}{\operatorname{ch} 1,84 \gamma} \right] (9 - \cos^2 \theta) \cos \theta \sin \omega t$
[7] [Н/м]	$N_c = 0,754 \rho S_c R^2 \left[\frac{\operatorname{ch}(1,84 \xi \gamma)}{\operatorname{ch}(1,84 \gamma)} \right]$
[9]	Аналогично [7]
[13]	$p_c = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cosh(\lambda_n \xi \gamma) J_1(\lambda_n) S_{cn} \cos \theta$ $\psi_n = \frac{2R}{(\lambda_n^2 - 1) J_1(\lambda_n) \cosh(\lambda_n \gamma)}$ <p>Для $n = 1$: $p_c = 0,837 \rho S_c R \left[\frac{\operatorname{ch}(1,84 \xi \gamma)}{\operatorname{ch}(1,84 \gamma)} \right] \cos \theta$</p>
[12]	Выражения в явном виде не приведены, однако присутствует графическое представление эпюры, полученное у Велетсоса [15]
[10, 24, 25]	Не приведено
[26]	$p = \frac{\gamma_n K_c K_{\psi c}}{1000 \gamma_{seismic}} \rho S_c R C_{pc} \cos \theta, \quad C_{pc} = 0,837 \left[\frac{\operatorname{ch}(1,84 \xi \gamma)}{\operatorname{ch}(1,84 \gamma)} \right]$

*Основные обозначения см. в примечаниях к табл. 1.

В статье рассмотрены основные методики сейсмического расчета резервуаров, представленные в нормах и кодах различных стран. Сделан обзор

истории их разработки и сопоставлены основные параметры сейсмических нагрузок, приведенные в этих методиках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Westergaard H.M. Water pressures on dams during earthquakes // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 1933. Vol. 98.
2. Hoskins L.M., Jacobsen L.S. Water Pressure in a Tank Caused by a Simulated Earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. 1934. Vol. 24.
3. Lamb H. Hydrodynamics. Cambridge : Cambridge University Press, 1932. 644 p.
4. Housner G.W. Earthquake Pressures on Fluid Containers. California Institute of Technology, 1954.
5. Veletsos A.S., Yang J.Y. Earthquake Response of Liquid Storage Tanks // Proc. of 2nd Engg. Mechanics specialty conf. ASCE Raleigh. 1977. 1-24.
6. Haroun M.A., Housner G.W. Seismic Design of Liquid Storage Tanks // Journal of the Technical Councils of ASCE. 1981. Vol. 107. No. 1. Pp. 191–207.

7. Standard A.P.I. 650: Welded steel tanks for oil storage // American Petroleum Institute. 1988.
8. Wozniak R.S., Mitchell W.W. Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks // Sessions on Advances in Storage Tank Design. American Petroleum Institute. Washington. 1978. 35 p.
9. AWWA Standard D100-05. Welded steel tanks for water storage, 2005.
10. Manos G.C. Earthquake Tank-wall stability of unanchored tanks // J. Struct. Eng. 1986. Pp. 1863–1880.
11. Seismic design of storage tanks — Recommendations of a study group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1986.

12. Priestley M.J.N., Wood J.H., Davidson B.J. Seismic design of storage tanks // Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. December 1986. Vol. 19. No. 4.
13. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 4: Silos, tanks, and pipelines, 2003.
14. Malhotra P.K. Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks // Structural Engineering International. 2000. 1997. No. 3. Pp. 197–201.
15. Veletsos A.S. Seismic response and design of liquid storage tanks // Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems. 1984. С. 255–370.
16. Peek R. Analysis of unanchored liquid storage tanks under lateral loads // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1988. Vol. 16. No. 7. Pp. 1087–1100.
17. Natsiavas S. An analytical model for unanchored fluid-filled tanks under base excitation // Journal of Applied Mechanics. 1988. Vol. 55. No. 3. Pp. 648–653.
18. Veletsos A.S., Tang Y. Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1990. Vol. 19. No. 4. Pp. 473–496.
19. Malhotra P.K. Base uplifting analysis of flexibly supported liquid-storage tanks // Earthquake engineering & structural dynamics. 1995. Vol. 24. No. 12. Pp. 1591–1607.
20. Fischer D. Dynamic fluid effects in liquid-filled flexible cylindrical tanks // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1979. Vol. 7. No. 6. Pp. 587–601.
21. Rammerstorfer F.G., Fischer F.D., Scharf K. A proposal for the earthquake resistant design of tanks-results from the Austria research project // Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering (August 2–9, 1988, Tokyo–Kyoto, JAPAN) (VOLVIJ). 1988.
22. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах (актуализированная редакция СНиП II-7-81*). М. : ОАО «ЦПП», 2011.
23. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции (актуализированная редакция СНиП II-23-81*). М. : ОАО «ЦПП», 2011.
24. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А., Штоль А.Т., Тумасов В.Р. Рекомендации по расчету резервуаров и газгольдеров на сейсмические воздействия. М. : Стройиздат, 1969. 47 с.
25. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 253 с.
26. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М. : НПК Изотермик, 2009. 216 с.
27. Еленицкий Э.Я. Несущая способность корпуса вертикальных цилиндрических стальных резервуаров в условиях сейсмического воздействия // Сейсмостойкость и безопасность специальных сооружений. 2009. № 1. С. 41–43.
28. Еленицкий Э.Я. Обеспечение сейсмостойкости вертикальных цилиндрических стальных резервуаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. № 5. С. 45–49.

Поступила в редакцию в августе 2016 г.

Об авторах: **Шигапов Рустам Рамилович** — аспирант кафедры теоретической механики и аэродинамики, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, shigapov.rustam@gmail.com;

Ковальчук Олег Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и аэродинамики, директор, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, oko44@mail.ru.

Для цитирования: *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

REFERENCES

1. Westergaard H.M. Water pressures on Dams During Earthquakes. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 1933, vol. 98.
2. Hoskins L.M., Jacobsen L.S. Water Pressure in a Tank Caused by a Simulated Earthquake. Bull. Seism. Soc. Am. 1934, vol. 24.
3. Lamb H. Hydrodynamics. Cambridge, Cambridge University Press, 1932, 644 p.
4. Housner G.W. Earthquake Pressures on Fluid Containers. California Institute of Technology, 1954.
5. Veletsos A.S., Yang J.Y. Earthquake Response of Liquid Storage Tanks. Proc. of 2nd Engg., Mechanics specialty conf. ASCE Raleigh, 1977, 1-24.
6. Haroun M.A., Housner G.W. Seismic design of liquid storage tanks. Journal of the Technical Councils of ASCE, 1981, vol. 107, no. 1, pp. 191–207.
7. Standard A.P.I. 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute, 1988.
8. Wozniak R.S., Mitchell W.W. Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks. Sessions on Advances in Storage Tank Design, American Petroleum Institute, Washington, 1978, 35 p.
9. AWWA Standard D100-05. Welded Steel Tanks for Water Storage, 2005.
10. Manos G.C. Earthquake Tank-Wall Stability of Unanchored Tanks J. Struct. Eng., 1986, pp. 1863–1880.
11. Seismic Design of Storage Tanks — Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1986.
12. Priestley M.J.N., Wood J.H., Davidson B.J. Seismic Design of Storage Tanks. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. December 1986, vol. 19, no. 4.

13. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 4: Silos, tanks, and pipelines, 2003.
14. Malhotra P.K. Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. Structural Engineering International. 2000, 1997, no. 3, pp. 197–201.
15. Veletsos A.S. Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems. 1984, pp. 255–370.
16. Peek R. Analysis of unanchored liquid storage tanks under lateral loads. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1988, vol. 16, no. 7, pp. 1087–1100.
17. Natsiavas S. An Analytical Model for Unanchored Fluid-Filled Tanks Under Base Excitation. Journal of applied mechanics. 1988, vol. 55, no. 3, pp. 648–653.
18. Veletsos A.S., Tang Y. Soil-Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid Storage Tanks. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1990, vol. 19, no. 4, pp. 473–496.
19. Malhotra P.K. Base uplifting analysis of flexibly supported liquid-storage tanks. Earthquake engineering & structural dynamics. 1995, vol. 24, no. 12, pp. 1591–1607.
20. Fischer D. Dynamic Fluid Effects in Liquid-Filled Flexible Cylindrical Tanks. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 1979, vol. 7, no. 6, pp. 587–601.
21. Rammerstorfer F.G., Fischer F.D., Scharf K. A Proposal for the Earthquake Resistant Design of Tanks-Results from the Austria Research Project. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering (August 2–9, 1988, Tokyo–Kyoto, JAPAN) (VOLVIJ), 1988.
22. SP 14.13330.2011 *Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh (aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-7-81*)* [SP 14.13330.2011. Construction in Seismic Regions (Revised Edition SNIIP II-7-81*)]. Moscow, OAO TsPP Publ., 2011. (In Russian)
23. SP 16.13330.2011 *Stal'nye konstruksii (aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-23-81*)* [SP 16.13330.2011 *Steel Structures*. (Revised Edition SNIIP II-23-81*)]. Moscow, OAO TsPP Publ., 2011. (In Russian)
24. Gol'denblat I.I., Nikolaenko N.A., Shtol' A.T., Tumasov V.R. *Rekomendatsii po raschetu rezervuarov i gazgol'derov na seysmicheskie vozdeystviya* [Guidelines for Design of Tanks and Gasholders for Seismic Forces]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969, 47 p. (In Russian)
25. Birbraer A.N. *Raschet konstruksiy na seysmostoykost'* [Calculation of Structures for Seismic Stability]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1998, 253 p. (In Russian)
26. STO-SA-03-002-2009. *Pravila proektirovaniya, izgotovleniya i montazha vertikal'nykh tsilindricheskikh stal'nykh rezervuarov dlya nefi i nefteproduktov* [Rules for the Design, Manufacture and Installation of Vertical Cylindrical Steel Tanks for Crude Oil and Petroleum Products]. Moscow, NPK Isotermik Publ., 2009, 216 p. (In Russian)
27. Elenitskiy E.Ya. *Nesushchaya sposobnost' korpusa vertikal'nykh tsilindricheskikh stal'nykh rezervuarov v usloviyakh seysmicheskogo vozdeystviya* [Carrying Capacity of Shells of Vertical Cylindrical Steel Tanks under Conditions of Seismic Forces]. *Seysmostoykost' i bezopasnost' spetsial'nykh sooruzheniy* [Seismic Stability and Safety of Special Structures]. 2009, no. 1, pp. 41–43. (In Russian)
28. Elenitskiy E.Ya. *Obespechenie seysmostoykosti vertikal'nykh tsilindricheskikh stal'nykh rezervuarov* [Ensuring the Seismic Stability of Vertical Cylindrical Steel Tanks]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Antiseismic Construction. Safety of Structures]. 2006, no. 5, pp. 45–49. (In Russian)

About the authors: **Shigapov Rustam Ramilevich** — postgraduate student, Department of Theoretical Mechanics and Aerodynamics, Institute of Fundamental Science, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; shigapov.rustam@gmail.com;

Koval'chuk Oleg Aleksandrovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Theoretical Mechanics and Aerodynamics, Director of Institute of Fundamental Science, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; oko44@mail.ru.

For citation: Shigapov R.R., Koval'chuk O.A. Obzor uproshchennykh metodik rascheta rezervuarov na seysmicheskie vozdeystviya [Review of Simplified Seismic Analysis Procedures for Storage Tanks]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 1 (100), pp. 53–62. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.1.53-62