

**Ю.Э. СЕНИЦКИЙ
М.И. БАЛЬЗАННИКОВ
А.А. МИХАСЕК**

О ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ УРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ ДЕРИВАЦИОННЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*DYNAMIC LOAD ON CYLINDER SURGE TANKS OF DIVERSION HYDROELECTRIC POWER STATIONS
UNDER SEISMIC IMPACT*

В работе указывается на необходимость сооружения уравнивательных резервуаров для гидроэлектростанций (ГЭС) деривационного типа с напорной деривацией. Эти объекты в составе водопроводящего тракта ГЭС выполняют важную роль – защищают протяженный напорный тоннель от повышения давления в нем при гидравлическом ударе, а, следовательно, от необоснованных дополнительных затрат на крепление стенок тоннеля. Отмечается, что ГЭС такого типа часто строятся в горной местности, а уравнивательные резервуары размещаются на переломе трассы водопроводящего тракта. Такое расположение позволяет сократить общую высоту уравнивательного резервуара и затраты на его строительство. На конкретных примерах показывается, что уравнивательные резервуары эффективно возводятся непосредственно на поверхности земли. Отмечается, что конструктивные элементы таких сооружений подвергаются воздействию статического давления воды и динамической нагрузки воды вследствие осуществления регулирования расхода воды через агрегаты при изменении потребляемой мощности ГЭС. В горной местности уравнивательные резервуары могут подвергаться еще и динамической нагрузке из-за сейсмического воздействия. В статье приводится точное решение задачи, связанное с определением импульсивной и конвективной составляющих гидродинамического давления воды на вертикальные стенки металлического цилиндрического резервуара в случае горизонтального сейсмического воздействия. Приведенное решение уточняет известные методы расчета и позволяет более точно выполнить расчет конструкции на возможные нагрузки и подобрать необходимые геометрические параметры, что обеспечит повышение надежности работы резервуара.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, водопроводящий тракт, уравнивательный резервуар, сейсмическое воздействие, расчет динамической нагрузки

The necessity of construction of surge tanks for diversion hydroelectric power stations with pressure derivation is substantiated in the article. These tanks as a part of water-conveyance headrace are essential to protect a long pressure tunnel from pressure boost under hydraulic shock and in consequence from additional charges for tunnel walls underpinning. It is to be noted that diversion hydroelectric power stations are often erected in mountainous area and surge tanks are situated on the turning point of water-conveyance headrace. This position allows to lower surge tank and to keep construction costs down. The examples show that it is preferable to construct surge tanks on the surface of the earth. It is to be noted that these structures constructive elements are exposed to static water pressure and water dynamic load due to water flow control through aggregates under power consumption changes of hydroelectric power station. At the same time in mountainous area surge tanks can also be exposed to dynamic loads because of seismic impact. The article gives the solution for determination of impulse and convective components of hydrodynamic pressure at vertical walls of metal cylinder tank in the case of horizontal seismic impact. The proposed solution clarifies well-known calculation methods and allows to perform an accurate design calculation of potential loads and to choose necessary geometric parameters that ensure tank reliability.

Keywords: hydroelectric power station, water-conveyance headrace, surge tank, seismic impact, dynamic load screening

В общем составе гидротехнических сооружений гидроэлектростанций (ГЭС) важная роль принадлежит водопроводящему тракту. Именно эти сооружения обеспечивают подвод необходимого объема воды к гидравлическим агрегатам и выработку электроэнергии в соответствии с режимом ее потребления. Наиболее сложный состав водопроводящего тракта предусматривается в ГЭС деривационного типа. Так, при напорной деривации вода от водохранилища к зданию гидроэлектростанции подводится по напорному тоннелю и напорному турбинному трубопроводу [1-4].

Для защиты протяженного напорного тоннеля от динамического воздействия при гидравлическом ударе, возникающем в турбинном трубопроводе, сооружается уравнильный резервуар. Он обычно

размещается на переломе трассы водоводов. Это позволяет сократить общую высоту резервуара и затраты на его строительство. Чаще всего гидроэлектростанции деривационного типа с напорной деривацией строятся в горных районах. При этом могут применяться уравнильные резервуары различного типа и конструктивного исполнения.

Для ГЭС средней и малой мощности наиболее предпочтительны уравнильные резервуары, размещаемые непосредственно на поверхности горного склона и изготавливаемые из металла или железобетона. В качестве примера может служить конструкция уравнильного резервуара Краснополянской ГЭС г. Сочи (рис. 1). На рисунке представлен общий вид станционного узла гидроэлектростанции. Здесь от помещения для затворов вода по двум турбинным



Рис. 1. Станционный узел Краснополянской ГЭС деривационного типа [5]

трубопроводам, уложенным по крутому склону, подводится к агрегатному зданию, в котором размещены четыре гидроагрегата типа РО-115 мощностью по 7.3 МВт каждый [5]. Выше помещения для затворов на горном склоне размещен металлический уравнильный резервуар цилиндрического типа.

В разрезе вид цилиндрического металлического уравнильного резервуара представлен на рис. 2 [1]. Верхняя часть этого сооружения должна быть выше отметки нормального подпорного уровня (НПУ) на величину подъема уровня воды в нем при сбросе полной нагрузки агрегатов ГЭС. Значительная высота уравнильных резервуаров цилиндрического типа является основным их недостатком.

С целью уменьшения общей высоты, материалоемкости и затрат на возведение уравнильного резервуара рекомендуется использование резервуаров специального типа. Это – либо резервуары замкнутого типа со специальными управляющими

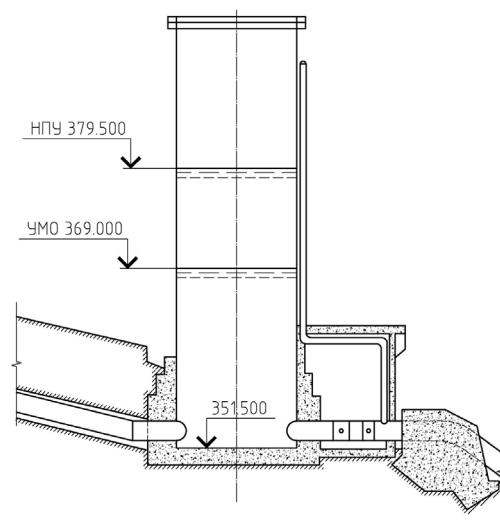


Рис. 2. Схема цилиндрического уравнильного резервуара деривационной ГЭС [1]

системами, разработанными, в том числе, с участием авторов [6], либо резервуары дифференциального типа. В последнем случае внутри цилиндра большого диаметра дополнительно размещается цилиндрический резервуар меньшего диаметра с верхней водосливной кромкой (рис. 3). Для обеспечения его устойчивости предусматриваются дополнительные опоры [1].

Важнейшим требованием, предъявляемым к строительной конструкции уравнильного резервуара деривационной ГЭС, является обеспечение высоких прочностных характеристик и надежности

их работы [7-12]. Поэтому конструктивные элементы должны рассчитываться на статические и динамические нагрузки.

Основные статические нагрузки воспринимает основание конструкции уравнильного резервуара от веса самой конструкции и веса воды, находящейся внутри резервуара. Величина статического давления воды на стенки резервуара возрастает с увеличением заглубления под уровень поверхности воды в резервуаре. Кроме этого на конструктивные элементы уравнильного резервуара воздействует динамическая нагрузка вследствие осуществления регулиро-

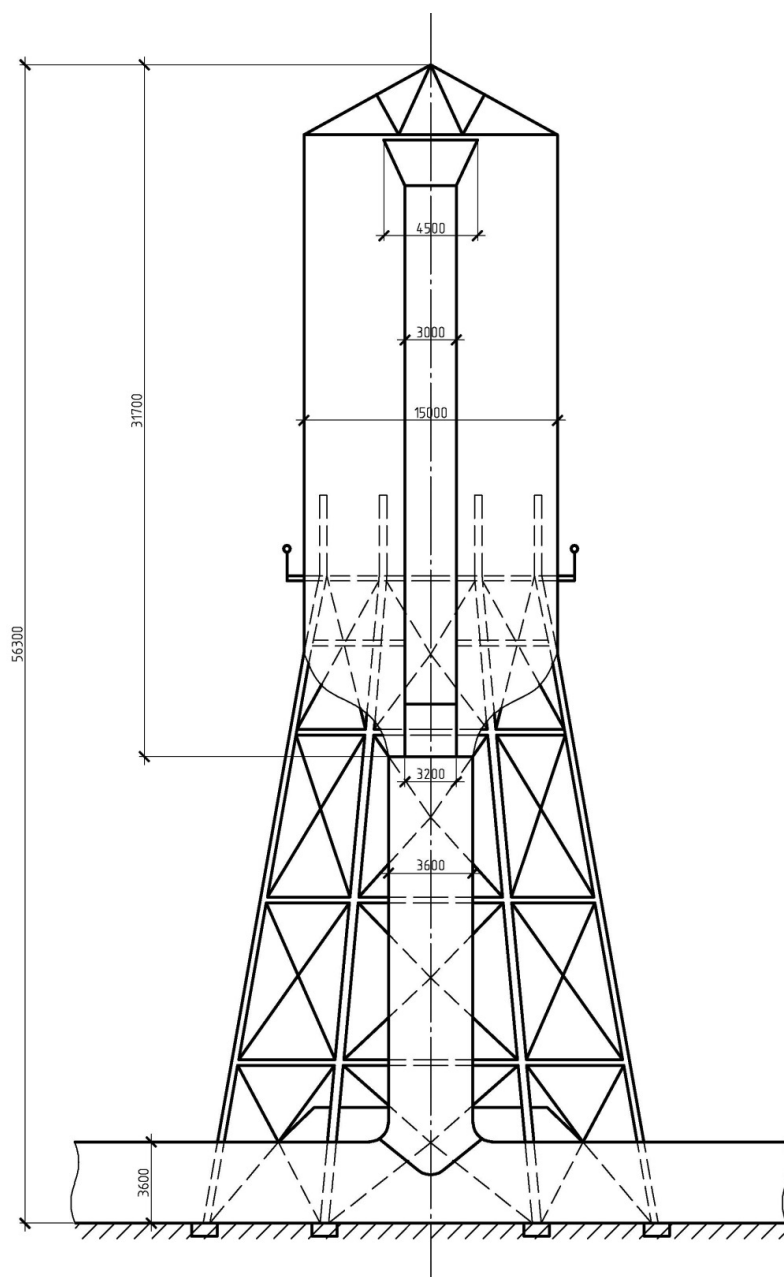


Рис. 3. Схема уравнильного резервуара дифференциального типа [1]

вания расхода воды через агрегаты. Направляющий аппарат гидравлических турбин при изменении потребляемой мощности ГЭС закрывается или открывается, что вызывает резкий подъем или снижение уровня воды в резервуаре. Особенно опасна ситуация при сбросе полной нагрузки всех гидроагрегатов. Эти нагрузки достаточно точно определяются по известным методам, хорошо себя зарекомендовавшим для практического использования и правильного подбора материала фундамента и стенок резервуара и их геометрических параметров [1, 2, 4].

Вместе с тем в горной местности уравнильные резервуары могут подвергаться еще и динамической нагрузке из-за сейсмического воздействия. В таких условиях важно знать величину динамического воздействия и учесть ее при расчете несущих конструктивных элементов резервуара. Именно динамические нагрузки редкой повторяемости и определяют надежность практически всех реализованных или проектируемых конструкций. Поэтому важной задачей современного проектирования сооружений является определение таких воздействий.

Теоретическая часть

Определение нагрузок при сейсмическом воздействии представляет собой важную задачу строительной механики. Если обозначить через $\varphi(r, y, \theta, t)$ потенциал скоростей идеальной жидкости, то краевая задача о ее изотермическом движении формулируется следующим образом:

$$\Delta^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=R} = A(\theta, t) \text{ при } r=R, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=0} < \infty, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=0} < \infty \text{ при } r=0, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{y=H} = 0 \text{ при } y=H, \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{y=0} + gz(r, y, \theta, t)HV(\theta, t) = 0 \text{ при } y=0, \quad (5)$$

$$\varphi(r, y, \theta, t) = \varphi(r, \theta + 2\pi, y, t), \quad (6)$$

$$\text{здесь } A(\theta, t) = V(t) \cos \theta. \quad (7)$$

Граничные условия (2) и (7) указывают на то, что скорость жидкости при $r = R$ совпадает со скоростью стенки резервуара. Неравенство (3) является условием регулярности решения, а (4) – соответственно указывает на непроницаемость дна. Соотношение (5) представляет собой линеаризованное уравнение Бернулли, т.е. является условием на свободной поверхности жидкости.

В случае сейсмического воздействия механическая система резервуар – жидкость совершает сложное движение, которое может быть представлено в виде суммы переносного и относительного. Эти воздействия следует трактовать как импульсивное и конвективное [13-15], поскольку такое представление соответствует физической картине исследуемого процесса колебаний. Действительно, первое из них определяет ту часть давления, при котором возмущение передается непосредственно на стенки и днище резервуара и жидкость играет роль инерционной массы. Вторая составляющая является следствием возникающих при колебаниях жидкости гравитационных волн.

В соответствии с этим представлением функции φ и z можно рассматривать в виде суммы φ_1, φ_2 и z_1, z_2 . Дальнейшее решение задачи осуществляется методом разложения по собственным функциям [13, 14]. При этом имеется в виду, что доминирующей формой колебания жидкости является форма с одним узловым диаметром. В результате имеем:

$$P_1(\xi, \zeta, \theta, t) = \rho \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = C_1(\xi, \zeta) \rho H V(t) \cos(\theta), \quad (8)$$

$$\text{где } C_1(\xi, \zeta) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} I_1 \left(\frac{V_n \xi}{\gamma} \right) \left[V_n^2 I_1' \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \right]^{-1} \sin(V_n \zeta), \quad (9)$$

$$V_n = \frac{2n+1}{2} \pi, \quad n=0.1 \dots 6.0, \quad \xi = rR^{-1},$$

$$\zeta = yH^{-1}, \quad y = HR^{-1}, \quad (10)$$

$$Q_1(t) = m\dot{V}(t), \quad M_1(t) = mh\dot{V}(t), \quad (11)$$

$$m_1 = 2\rho\pi R^2 H \gamma \sum_{n=0}^{\infty} I_1 \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \left[V_n^3 I_1' \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \right]^{-1}, \quad (12)$$

$$h_1 = H \left\{ 1 + \frac{\left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} I_1 \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \right] \left[\sum_{n=0}^{\infty} I_1 \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \right]^{-1}}{\left[V_n^4 I_1' \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \right] \left[V_n^3 I_1' \left(\frac{V_n}{\gamma} \right) \right]^{-1}} \right\}. \quad (13)$$

Аналогичные результаты для конвективной составляющей

$$P_2(\xi, \zeta, \theta, t) = \rho \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} =$$

$$= \rho \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n A_{kn}(t) ch[\mu_n \gamma (1-\zeta)] J_1(\mu_n \xi), \quad (14)$$

$$\text{здесь } \psi_n = 2R[(\mu_n^2 - 1)J_1(\mu_n)ch(\mu_n \gamma)], \quad (15)$$

$$A_{kn}(t) = \dot{V}(t) - \omega_n \int_0^t \dot{V}(r) \sin \omega_n(t-r) dr, \quad (16)$$

$$\omega_n = [g\mu_n R^{-1} th(\mu_n \gamma)]^{1/2}, \quad J_n(\mu_n) = 0, \quad n=1, 2, \dots \infty \quad (17)$$

$$Q_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} A_{kn}(t), \quad M_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} m_{cn} h_{cn} A_{kn}(t) \quad (18)$$

$$m_{cn} = 2\rho\pi R^2 H h(\mu_n \gamma) [\mu_n \gamma (\mu_n^2 - 1)]^{-1}, \quad (19)$$

$$h_{cn} = H [1 + (1 - ch(\mu_n \gamma)) [\mu_n \gamma sh(\mu_n - 1)]^{-1}]. \quad (20)$$

Соотношения (9), (13) и (20) уточняют соответствующие равенства, приведенные в европейских нормах [16]. В зависимости от балльности землетрясения ускорение $\dot{V}(t)$ задается в долях от «g» [17].

Имея в виду (14), находим

$$\dot{V}(t) = kg A_{gn}(t) = kg \cos \omega_n t k = 0.1; 0.2; 0.4. \quad (21)$$

Результаты исследования

В табл. 1 приведены результирующие усилия (опрокидывающие моменты M_1, M_2 (кНм) и сдвигающие силы Q_1, Q_2 (кН)) импульсивной и конвективной составляющих гидродинамического давления, передающегося на вертикальный цилиндрический резервуар. Расчеты выполнялись для емкости $R=10$ м при различной степени ее наполнения. Резервуар, заполненный водой, рассматривается в условиях семибалльного землетрясения (при

$\dot{V}(t) = 0.1g$). В таблице содержатся результаты расчетов по предполагаемой методике (11), (16) (в числителе), а также по формулам руководства API650 [18].

Таблица 1
Результирующие усилия на уравнильный резервуар при сейсмическом воздействии

H/R	0,3	0,5	1,0
$M_1; M_2$	<u>195; 1081</u> 180 1120	<u>923; 2708</u> 840 2750	<u>6821; 8066</u> 6340 7917
$Q_1; Q_2$	<u>163; 704</u> 155 715	<u>462; 1017</u> 440 1020	<u>1688; 1332</u> 1730 1320

Следует отметить, что расхождение приведенных результатов не превышает 10 %, в то время как ввиду отмеченных ошибок в Eurocode 8 эти данные не корректируют [16].

На рис. 4 представлена эпюра максимального гидродинамического давления P для резервуара вместимостью 30000 м³ ($R=25$ м; $\rho=900$ кг/м³, $H=16$ м, $\theta=0$) при девятибалльном землетрясении.

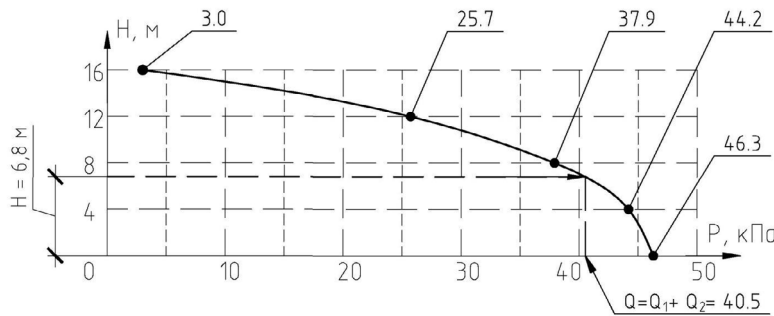


Рис. 4. Эпюра максимального гидродинамического давления

Из полученных расчетов следует, что при увеличении объема резервуара возрастает вклад гидродинамической составляющей по сравнению с гидростатическим давлением.

Таким образом, приведенное решение уточняет известные методы расчета и позволяет более точно выполнить расчет конструкции на возможные нагрузки и подобрать необходимые геометрические параметры, что обеспечит повышение надежности работы уравнильного резервуара, размещаемого в сейсмически активных районах.

Выводы. 1. Уравнильные резервуары гидроэлектростанций деривационного типа с напорной деривацией выполняют важную роль по защите протяженного напорного тоннеля от повышения давления в нем при гидравлическом ударе. Следовательно, эти сооружения обеспечивают снижение затрат на крепление стенок тоннеля и повышение эффективности капитальных вложений в ГЭС.

2. В горной местности уравнильные резервуары размещаются на переломе трассы водопроводящего тракта, что позволяет сократить общую высоту уравнильного резервуара и затраты на его строительство, и могут возводиться непосредственно на земной поверхности. Конструктивные элементы таких сооружений подвергаются воздействию статического давления воды и динамической нагрузки воды вследствие осуществления регулирования расхода воды через агрегаты при изменении потребляемой мощности ГЭС.

3. В горной сейсмически активной местности уравнильные резервуары могут подвергаться еще и динамической нагрузке из-за сейсмического воздействия. Получено точное решение задачи по определению импульсивной и конвективной составляющих гидродинамического давления воды на вертикальные стенки металлического цилиндрического резервуара в случае горизонтального сейсмического

воздействия. Решение уточняет известные методы расчета, и его использование позволяет более точно выполнить расчет конструкции и подобрать необходимые геометрические параметры, обеспечивающие надежность работы уравнительного резервуара.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щавелев Д.С., Васильев Ю.С., Претро Г.А. и др. Гидроэнергетические установки / под ред. Д.С. Щавелева. Л.: Энергоиздат, 1981. 520 с.
2. Васильев Ю.С., Елистратов В.В. Гидроэнергетические установки. Изд-во Санкт-Петербургского гос. политехнического ун-та. СПб., 2011. 308 с.
3. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. СПб.: Наука, 2013. Изд. 2-е, доп. 308 с.
4. Бальзанников М.И., Евдокимов С.В., Орлова А.А. Сооружения деривационной ГЭС. Выбор основных параметров и их расчет: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 64 с.
5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Краснополянская ГЭС](https://ru.wikipedia.org/wiki/Краснополянская_ГЭС) (дата обращения: 26.02.2017).
6. Бальзанников М.И. Управление давлением воды в деривационном напорном водоводе и уравнительном резервуаре гидроэлектростанции // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сборник статей / СГАСУ. Самара, 2015. С. 192–195.
7. Бальзанников М.И., Иванов Б.Г., Михасек А.А. Система управления состоянием гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 119–124.
8. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И. О технологии проектирования объектов гидроэнергетики // Гидротехническое строительство. 2014. № 7. С. 2–8.
9. Свитала Ф., Евдокимов С.В., Галцкова Ю.М. Особенности конструкций гидротехнических сооружений и агре-

гатных зданий первых гидроэлектростанций // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 12. С. 87–90.

10. Бальзанников М.И., Родионов М.В., Сеницкий Ю.Э. Повышение эксплуатационной надежности низконапорных гидротехнических объектов с грунтовыми плотинами // Приволжский научный журнал. 2012. № 2. С. 35–40.
11. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Оценка надежности гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2012. № 1. С. 64–69.
12. Евдокимов С.В., Дормидонтова Т.В. Критерии оценки надежности и технического состояния гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2011. № 2. С. 105–108.
13. Сеницкий Ю.Э., Еленицкий Э.Я., Дидковский О.В. Определение импульсивной и конвективной составляющих гидродинамического давления жидкости в цилиндрических резервуарах при сейсмических воздействиях // Известия вузов. Строительство. 2005. № 5. С. 18–26.
14. Сеницкий Ю.Э. К вопросу определения гидродинамического давления в цилиндрических резервуарах при сейсмических воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 6. С. 63–67.
15. Сеницкий Ю.Э., Еленицкий Э.Я., Дидковский О.В. К вопросу о нормативных требованиях по расчету вертикальных стальных цилиндрических резервуаров в условиях сейсмического воздействия // Безопасность сооружений. 2006. № 4. С. 65–69.
16. Eurocode 8. Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 4. Silos, tanks and pipelines. 1999. 65 p.
17. СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.
18. API Standart 650 Welded steel tanks for oil storage, 2003.

Об авторах:

СЕНИЦКИЙ Юрий Эдуардович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики и сопротивления материалов Самарский государственный технический университет Архитектурно-строительный институт 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: senitskiy@mail.ru

БАЛЬЗАННИКОВ Михаил Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет Архитектурно-строительный институт 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: balzannikov@samgasu.ru

МИХАСЕК Андрей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет Архитектурно-строительный институт 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194 E-mail: andremixas@mail.ru

SENITSKY Yury E.

Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Construction Mechanics and Resistance of Materials Chair Samara State Technical University Institute of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: senitskiy@mail.ru

BALZANNIKOV Mikhail I.

Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair Samara State Technical University Institute of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: balzannikov@samgasu.ru

MIKHASEK Andrey A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair Samara State Technical University Institute of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: andremixas@mail.ru

Для цитирования: Сеницкий Ю.Э., Бальзанников М.И., Михасек А.А. О динамической нагрузке на цилиндрические уравнительные резервуары деривационных гидроэлектростанций при сейсмическом воздействии // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 1. С. 64–69. DOI: 1017673/Vestnik.2017.01.11.

For citation: Senitsky Yu. M., Balzannikov M. I., Mikhasek A. A. Dynamic load on cylinder surge tanks of diversion hydroelectric power stations under seismic impact // Urban Construction and Architecture. 2017. V. 7, № 1. Pp. 64–69. DOI: 1017673/Vestnik.2017.01.11.