

Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС

К.т.н., начальник отдела расчетных обоснований сооружений Г.Л. Козинец*,
ОАО «Ленгидропроект»

Ключевые слова: гидродинамическое давление; задача Вестергарда; динамическое воздействие; присоединенная масса воды; уравнение Лапласа; принцип Даламбера; потенциал температур; собственные частоты и формы

Надежность сооружения, контактирующего с водой, в условиях возмущающих динамических воздействий в значительной мере определяется гидродинамическим давлением на напорную грань, поэтому важной задачей является адекватная оценка динамических характеристик – собственных частот сооружения [1-5].

Определение нагрузки от гидродинамического воздействия предусмотрено действующими нормами проектирования России, США и стран Евросоюза [6-8]. При этом, как правило, не принимаются во внимание такие факторы как характер колебаний и форма сооружения, а гидродинамическое давление определяется решением задачи Вестергарда о взаимодействии «жесткой» (недеформируемой) конструкции с жидкостью и основано на статической теории сейсмостойкости [9]. Решение этой задачи для «жесткой» конструкции реализовано с применением современных программных комплексов во ВНИИГ им. Веденеева [10]. В работах [11-14] данная проблема представлена для вязкоупругих систем, что в значительной мере может быть использовано для грунтовых сооружений. Однако рассматриваемая проблема представляется актуальной при анализе прочности именно гидроупругих «гибких» (деформируемых) систем и включает в себя совершенствование алгоритма поиска собственных значений сооружения с водохранилищем. Такими системы являются гидроупругие бетонные плотины и гидротехнические затворы, в которых нелинейные эффекты практически не сказываются на динамических характеристиках.

Целью работы является учет неравномерного распределения присоединенных масс воды к напорной поверхности для адекватного определения динамических характеристик деформируемого сооружения.

Результатом решения уравнений гидроупругости является анализ собственных частот и форм колебаний сложной системы, позволяющий заранее судить о ее поведении при динамических воздействиях, когда на систему начинают действовать переносные силы инерции [15], [16].

Физический смысл инерционной составляющей гидродинамического давления на сооружение в форме Ньютона представим в виде:

$$P = m_v \frac{dv}{dt} = \int_0^h \rho_0 \frac{d\varphi(x, y, z, t)}{dt}, \quad (1)$$

где P – инерционная составляющая гидродинамического давления;

$\varphi(x, y, z, t)$ – потенциал скоростей движения воды; m_v – присоединенная масса воды.

Алгоритм решения практической инженерной задачи не должен слишком усложнять процесс получения результата, поэтому для определения присоединенной массы воды в рамках инженерной задачи, в качестве расчетной примем одну форму колебаний системы, вносящую наибольший вклад в динамическую нагрузку.

Предложим метод оценки по модальному коэффициенту участия γ_j [1]. При этом собственная частота сооружения в пустоте соответствует форме колебаний, при которой сумма модальных масс принимает максимальное значение от общей массы системы, участвующей в колебаниях. При действии возмущения в направлении по заданной оси (например X), коэффициент вклада γ_j (j – собственной формы) определяется следующим образом:

$$\gamma_j = \frac{\{\phi_j\}^T [M] \{J_x\}}{\|\phi_j\|^2}. \quad (2)$$

Здесь y_j коэффициент вклада с номером j -й формы; $\{\phi_j\}^T$ – трансформированный собственный вектор; $[M]$ – матрица масс; $\{J_x\}$ – вектор направления (по оси X); $\|\phi_j\|^2$ – модуль собственного вектора.

Далее определим относительные перемещения напорной поверхности и присоединенные массы воды по выбранной j -й форме колебаний системы. Однако прямое решение задачи гидроупругости не всегда оправдано. Во-первых, схематизация системы достаточно условна, так как невозможно задать адекватный контакт напорной поверхности с водой с помощью волновых уравнений. Во-вторых, размерность решаемой задачи возрастет в несколько раз, что значительно увеличит погрешность расчета. Для решения инженерных задач наиболее приемлем способ определения присоединенных масс воды через решение задачи стационарной теплопроводности для бассейна перед сооружением. Решение основывается на аналогии уравнений для потенциала скоростей движения жидкости $\varphi(x, y, z, t)$ и поля температур $T(x, y, z, t)$. При этом снимаются все допущения по геометрической конфигурации системы и унификации форм колебаний сооружения. Изложим краткую постановку и методику решения задачи гидроупругости с учетом одной из исследуемых форм колебаний. Опираясь на имеющиеся материалы по влиянию жидкости на напряженно-деформированное состояние гидротехнических сооружений при динамических воздействиях, при формулировании задачи примем традиционные допущения: $T(x, y, z, t)$.

1. Рассмотрим малые колебания системы «сооружение–основание–водохранилище», которые описываются линеализированными уравнениями.
2. Будем считать воду однородной, несжимаемой идеальной жидкостью.
3. Примем идентичными собственные частоты сооружения в пустоте и жидкости.

Итак, воду считаем идеальной и несжимаемой жидкостью, волнообразование на свободной поверхности не учитываем. Тогда потенциал скорости движения жидкости $\varphi(x, y, z, t)$ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi = 0. \quad (3)$$

В сравнении с уравнением теплопроводности при отсутствии источников тепла уравнение Лапласа для потенциала температур принимает вид:

$$\nabla^2 T = 0. \quad (4)$$

Границные условия при решении стационарной температурной задачи будут следующими: на свободной поверхности воды температура $T = 0$; на жестких стенках бассейна и в плоскости симметрии поток тепла $q = 0$; на грани, совпадающей с затвором, поток тепла q задается пропорционально исследуемой форме колебаний конструкции

$$q = u_o(x, y, z). \quad (5)$$

При $q=1$ получаем решение задачи Вестергарда для «жесткой» конструкции.

Основываясь на аналогии между (3) и (4), приведем гидродинамическое давление при помощи линеализированного интеграла Коши-Лагранжа через потенциал температур к виду:

$$p = \rho_e \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t}. \quad (6)$$

При учете только инерционной составляющей гидродинамического давления по принципу Даламбера:

$$p = -m_v \ddot{u}(t), \quad (7)$$

где m_v – присоединенная масса воды, $\ddot{u}(t)$ – ускорение движения сооружения.

Тогда формула для пересчета присоединенной массы для i -го элемента площадью dF_i при разделении переменных примет вид:

$$m_{i,v} = -\rho_e \frac{T(x, y, z, t)}{\dot{u}} dF_i, \quad (8)$$

где $T(x, y, z)$ – функция, зависящая только от координат, τ – функция, зависящая только от времени.

Козинец Г.Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС

При колебаниях системы по гармоническому закону:

$$\ddot{u} = -\omega^2 u_0(x, y, z). \quad (9)$$

$$m_{i,v} = \rho_e \frac{T(x, y, z)\dot{\tau}}{\omega^2 u_0(x, y, z)} dF_i \quad (10)$$

Уравнение движения сооружения при заданных граничных условиях соответствует сопряжению напорной поверхности с бассейном при малых перемещениях и не зависит от времени. При выполнении условия $\dot{\tau} = \omega^2$ значения m_v удовлетворяют уравнению:

$$m_{i,v} = \rho_e \frac{T_i(x_0, y, z)}{u_{i,j}(x_0, y, z)} dF_i, \quad (11)$$

где $T_i(x_0, y, z)$ - температура в бассейне, в точке примыкания к i -му узлу напорной поверхности; $u_{i,j}(x_0, y, z)$ - относительное перемещение i -го узла для j -й формы колебаний сооружения; dF_i - площадь напорной поверхности, примыкающая к i -му узлу. Следует заметить, что при пересчете температур в точечные массы масса i -го элемента площадью dF_i увеличится на $m_{i,v}$, при этом по формуле (11) можно учесть любую из полученных в модальном анализе форм колебаний сооружения.

Тогда сосредоточенная масса в узлах смоченной поверхности для площади F , примыкающей к i -му узлу, определится по формуле:

$$m_v = m_{i,v} \cdot F. \quad (12)$$

При определении собственных частот сооружения в жидкости, необходимо считать, что сооружение колеблется в пустоте, но к его массе M прибавлена присоединенная масса воды M_v . С учетом влияния жидкости j -я собственная частота сооружения определяется по формуле:

$$f_{j,\infty} = \frac{f_j}{\sqrt{1 + (M_v / M_c)}}. \quad (13)$$

Таким образом, влияние присоединенных масс воды приводит к понижению собственных частот системы, а задачу на собственные значения для рассматриваемого сооружения с учетом взаимодействия с водой можно записать уравнением:

$$([K] - \omega^2 [M_c]) \{\vec{u}\} = 0, \quad (14)$$

где $[K]$ - матрица жесткости системы;

$[M_c] = [M] + [M_v]$ - суммарная матрица массы сооружения и массы воды;

ω и $\{\vec{u}\}$ - искомые собственная частота и собственный вектор сооружения, взаимодействующего с водой.

Решая уравнение (14) методом итерации подпространств, определим собственные частоты и формы колебаний сооружения с учетом присоединенных масс воды, что позволит оценить надежность системы при вероятном возмущающем динамическом воздействии. Для примера, с помощью изложенного алгоритма выполнено распределение присоединенных масс воды и исследованы собственные колебания арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС в пустоте и жидкости, см. рис. 1 и 2.

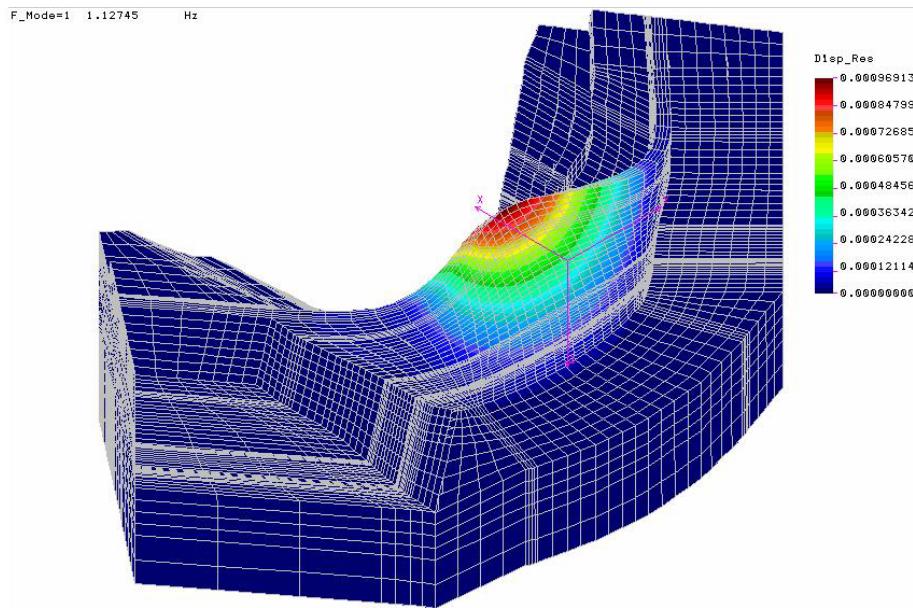


Рисунок 1. Первая форма колебаний плотины СШГЭС в пустоте – «сухой» плотины (частота – $\nu = 1,127$ Гц)

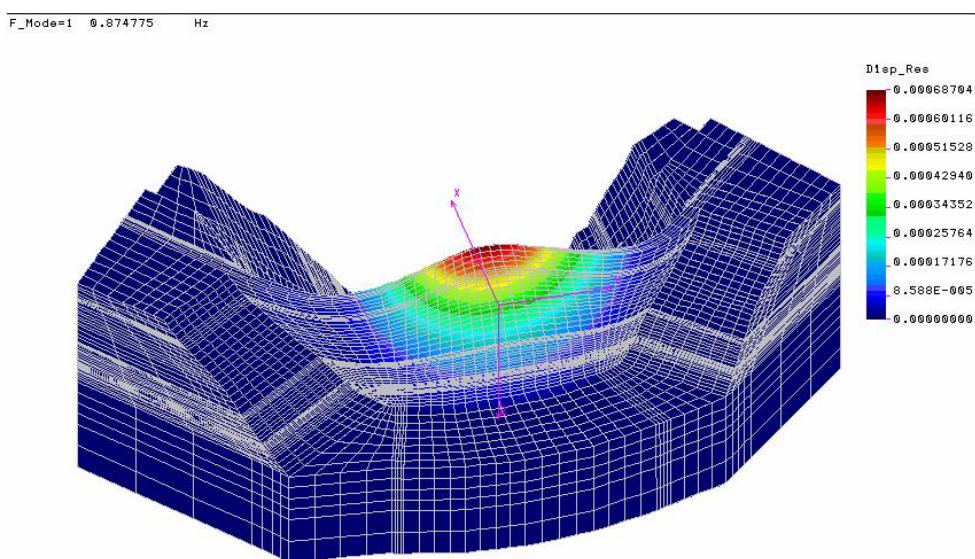


Рисунок 2. Первая форма колебаний плотины СШГЭС в жидкости – решение задачи гидроупругости при колебаниях «гибкой» плотины (частота $\nu = 0,875$ Гц)

Анализ результатов

Учет взаимодействия плотины с водой приводит к изменению форм колебаний плотины, уменьшению частот собственных колебаний ν и увеличению массы системы M на присоединенной массы воды M_v . Для плотины Саяно-Шушенской ГЭС получены следующие результаты:

- для «сухой» плотины в пустоте: первая собственная частота $\nu = 1,127$ Гц, масса присоединенной воды $M_v = 0$ т;
- для «жесткой» плотины в воде: первая собственная частота $\nu = 0,83$ Гц, масса присоединенной воды $M_v = 2,046 \times 10^7$ т;
- для «гибкой» плотины в воде: первая собственная частота $\nu = 0,875$ Гц, масса присоединенной воды $M_v = 1,846 \times 10^7$ т, при этом:

Козинец Г.Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС

- 1) первая собственная частота математической модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС без учета присоединенных масс воды составляет 1,127 Гц, что соответствует тестовым динамическим испытаниям сооружения при отметке УВБ 540 м с применением дебалансной машины (в соответствии с отчетом ООО ТРИЭС о натурных исследованиях динамических характеристик плотины Саяно-Шушенской ГЭС, 1995 г.), по которым частота оказалась равной 1.125 Гц;
- 2) распределение присоединенных масс воды m_v в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом форм колебаний получено неравномерным по ширине створа; в середине плотины массы воды на 20% больше масс, вычисленных для «жесткой» плотины, а у берегов на 20-25% меньше (рис. 3-6).
- 3) первая собственная частота плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом неравномерного распределения присоединенных масс воды составляет 0,875 Гц.

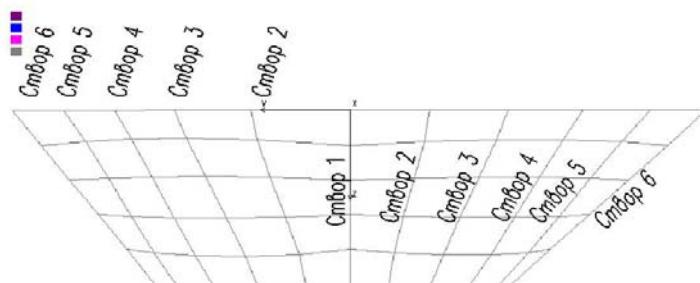


Рисунок 3. Схема расположения створов плотины Саяно-Шушенской ГЭС

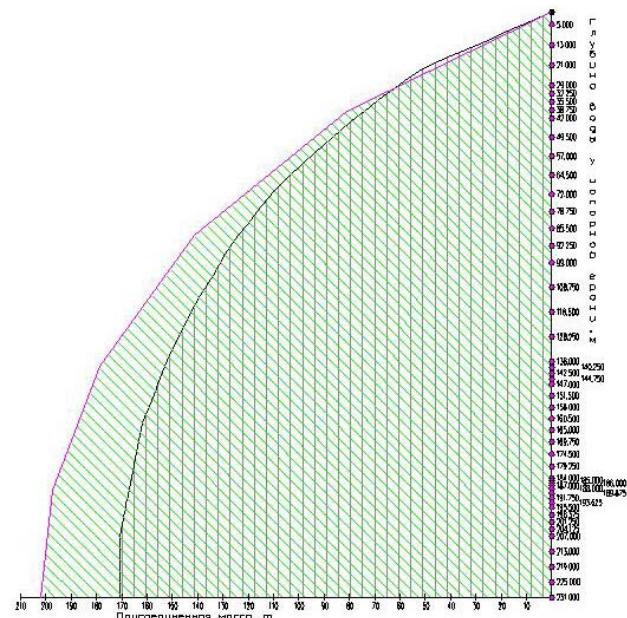
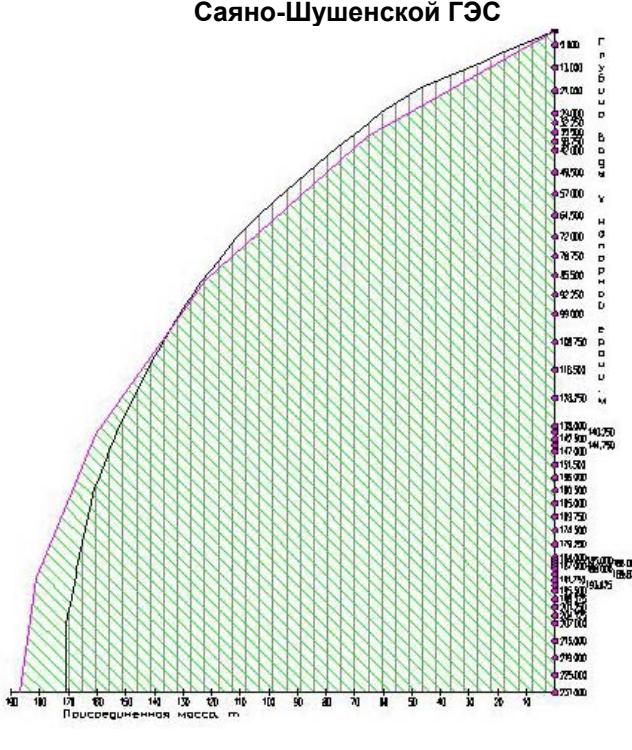


Рисунок 4. Эпюра распределения точечных масс в створе 1 и 2



Выходы

1. В работе предложен новый способ определения присоединенных масс воды позволяющий учитывать неравномерное распределение масс воды на напорной поверхности любого профиля.
2. На примере арочной плотины Саяно-Шушенской ГЭС показано численное соответствие частот для построенной пространственной модели плотина-основание с частотами фактического сооружения, построены кривые присоединенных масс воды, определены собственные частоты плотины без учета и с учетом влияния воды.
3. Результаты работы используются в ОАО «Ленгидропроект» при оценке прочности бетонных плотин и гидротехнических затворов при сейсмических воздействиях [17].

Литература

1. Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Оценка сейсмостойкости сооружений и оборудования АЭС в рамках нормативной методики // Энергетическое строительство. 1987. №1. С. 19-22.
2. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 249 с.
3. Кульмач П. П. Гидродинамика гидротехнических сооружений (Основные плоские задачи). М. : Изд-во АН СССР. 1963. 190 с.
4. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1988. 712 с.
5. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М. : Машиностроение, 1985. 472 с.
6. American National Standard. Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants // ANSI. 1974. No. 18.5. P. 398 p.
7. DIN 19704-1, DIN 19704-2, DIN19704-03. Stahlwasserbauten- Teil: Berechnungsgrundlagen: 1998-05.
8. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures // ASCE Standard, Sept. 1986. P. 120.
9. Westergaardt H. M. Pressures on Dams during Earthquakes // Proc. ASCE. 1931. Vol. 57, No. 9. P.1303-1318.
10. Скворцова А. Е., Судакова В. Н. Цейтлин Б. В. Расчет сейсмических колебаний конструкций, взаимодействующих с жидкостью // Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения : Труды 4-й Международной конференции. СПб. : Нестор, 2001. С. 274-277.
11. Абдикаримов Р. А., Эшматов Х., Бобаназаров Ш. П., Ходжаев Д. А., Эшматов Б. Х. Математическое моделирование и расчет гидротехнических сооружений типа плотины-пластины с учетом сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 59-70.
12. Абдикаримов Р. А., Жгутов В. М. Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих изотропных пластин и оболочек гладко-переменной толщины (асимметричные случаи) // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8(18). С. 47-55.
13. Абдикаримов Р. А., Жгутов В. М. Математические модели задач нелинейной динамики вязкоупругих ортотропных пластин и оболочек переменной толщины // Инженерно-строительный журнал. 2010. №6(16). С. 38-47.
14. Гиргидов А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 21-27.
15. Шейнин И. С. Колебания конструкций гидросооружений в жидкости : Справочное пособие по динамике гидросооружений. Ч. 1. Л. : Энергия, 1967. 310 с.
16. Шульман С. Г. Расчеты сейсмостойкости гидросооружений с учетом влияния водной среды. Л. : Энергия, 1976. 336 с.
17. Козинец Г. Л. Проблема учета присоединенных масс воды в расчетах затворов на сейсмостойкость // XXIX Неделя науки СПбГПУ : Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.1 . СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2006. С. 145.

* Галина Леонидовна Козинец, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)395-23-79; эл. почта: galina4410@yandex.ru

doi: 10.5862/MCE.23.7

Determination the dynamic performance of structures contacting with water, on the example of the arch concrete dam of Sayano-Shushenskaya HPP

G.L. Kozinets,

JSC Lenhydroproject RusHydro, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)395-23-79; e-mail: galina4410@yandex.ru

Key words

hydrodynamic pressure; Westergaardt's problem; dynamic disturbance; associated water mass; Laplace equation; Dalembertian principle; temperature potential; eigenvalues of frequency and oscillation mode

Abstract

The article deals with the topical problem of determining associated water masses in the context of structure oscillation modes by means of solving the temperature problem.

The problem is considering the non-uniform distribution of associated water masses on upstream face in order to adequately determine the dynamic performance of a deformed structure. The method is implemented for the oscillation mode making the greatest contribution into the seismic load.

The results of solving this problem for the arch concrete dam of Sayano-Shushenskaya HPP are presented as an example.

The frequencies obtained for the constructed three-dimensional model "dam-foundation" are found to numerically correlate well with the frequencies of the actual dam structure. Associated water mass curves are constructed, dam frequency eigenvalues are determined with and without allowance for water effect.

References

1. Birbraer A. N., Shulman S. G. *Energeticheskoe stroitelstvo*. 1987. No. 1. Pp. 19-22. (rus)
2. Birbraer A. N. *Raschet konstruktsiy na seysmostoykost* [Seismic stability calculation of structures]. Saint-Petersburg : Nauka, 1998. 249 p. (rus)
3. Kulmach P. P. *Gidrodinamika gidrotekhnicheskikh sooruzheniy (Osnovnye ploskie zadachi)* [Hydrodynamics of hydraulic structures (The main plane problems)]. Moscow : Izd-vo AN SSSR. 1963. 190 p. (rus)
4. Rabotnov Yu. N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of deformable solid body]. Moscow : Nauka, 1988. 712 p. (rus)
5. Timoshenko S. P., Yang D. Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Oscillations in engineering]. Moscow : Mashinostroenie, 1985. 472 p. (rus)
6. American National Standard. *Earthquake Instrumentation Criteria for Nuclear Power Plants*. ANSI. 1974. No. 18.5. 398 p.
7. DIN 19704-1, DIN 19704-2, DIN19704-03. *Stahlwasserbauten- Teil: Berechnungsgrundlagen: 1998-05*. (ger)
8. *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures*. ASCE Standard, Sept. 1986. 120 p.
9. Westergaardt H. M. Pressures on Dams during Earthquakes. *Proc. ASCE*. 1931. Vol. 57, No. 9. Pp.1303-1318.
10. Skvortsova A. E., Sudakova V. N. Tseytin B. V. *Nauchno-tehnicheskie problemy prognozirovaniya nadezhnosti i dolgovechnosti konstruktsiy i metody ikh resheniya* : Trudy 4-y Mezhdunarodnoy konferentsii [Scientific and technical problems of prediction the reliability and durability of structures and]. Saint-Petersburg : Nestor, 2001. Pp. 274-277. (rus)
11. Abdikarimov R. A., Eshmatov Kh., Bobanazarov Sh. P., Khodzhaev D. A., Eshmatov B. Kh. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3(21). p. 59-70. (rus)

Kozinets G.L. Determination the dynamic performance of structures contacting with water, on the example of the arch concrete dam of Sayano-Shushenskaya HPP

12. Abdikarimov R. A., ZHgutov V. M. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 8(18). p. 47-55. (rus)
13. Abdikarimov R. A., ZHgutov V. M. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 6(16). p. 38-47. (rus)
14. Girgidov A. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 3(21). p. 21-27. (rus)
15. Sheynin I. S. *Kolebaniya konstruktsiy gidrosooruzheniy v zhidkosti : Spravochnoe posobie po dinamike gidrosooruzheniy* [Oscillations of hydraulic structures in fluid. Handbook on dynamics of hydraulic structures]. Part 1. L. : Energiya, 1967. 310 p. (rus)
16. Shulman S. G. *Raschety seysmostoykosti gidrosooruzheniy s uchetom vliyaniya vodnoy sredy* [Calculations of seismic stability of hydraulic structures subject to aqueous medium influence]. L. : Energiya, 1976. 336 p. (rus)
17. Kozinets G. L. *XXIX Nedelya nauki SPbGPU : Materialy Vserossiyskoy mezhvuzovskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [XXIX Week of Science of SPbSPU: Proceedings]. Part 1 . Saint-Petersburg : Izd-vo Politekhn. un-ta. 2006. P. 145. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 43-48