

Численная оценка прочностной надежности высоконапорных водоводов при гидравлическом ударе

К.т.н., начальник отдела расчетных обоснований сооружений Г.Л. Козинец;
инженер II категории Л.П. Потехин,
ОАО «Ленгидропроект»*

Ключевые слова: водопроводящий тракт; неполный гидравлический удар; развилка напорного водовода; графический метод; металлическая оболочка; приведенные напряжения; прочность конструкции; многослойное моделирование

Обоснование прочностной надежности высоконапорных водопроводящих трактов при учете гидравлического удара представляет собой актуальную задачу. Развилки турбинных напорных водоводов являются типичным и самым сложным пространственным элементом высоконапорных деривационных гидроэлектростанций. При проектировании сталежелезобетонной развилки возникают известные сложности в определении расчетных параметров металлической оболочки и арматуры.

Научная новизна исследований заключается в обосновании изменения конструкции развилки турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1 на основе пространственного численного многослойного моделирования.

Строящаяся в Республике Северная Осетия – Алания на р. Ардон Зарамагская ГЭС-1 установленной мощностью 342 МВт является первой, самой верхней гидроэлектростанцией Ардонского каскада ГЭС. Район площадки строительства, характерный своими сложными инженерно-геологическими и топографическими условиями, вкупе с высоким напором делают сооружения Зарамагской ГЭС-1 уникальными в отечественной и мировой практике гидротехнического строительства.

Первые расчетные обоснования прочности варианта металлической конструкции развилки турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1 были выполнены в 2007 году. Величина расчетного гидродинамического напора принималась равной 520 м. Класс сооружения по степени ответственности – II. По результатам расчетов максимальные приведенные напряжения были получены в серповидном ребре и составили 290 МПа, что превосходит предел текучести стали 09Г2С, равный 260 МПа. Таким образом, металлическая конструкция развилки при напоре 520 м не позволяла обеспечить работу серповидного ребра в упругой стадии.

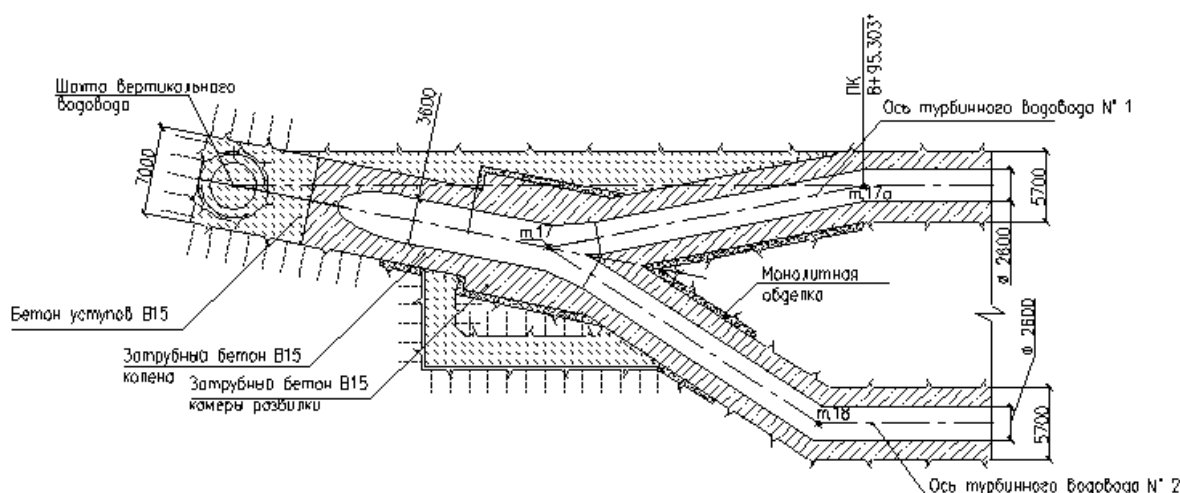


Рисунок 1. Схема развилки турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1

В связи с повышением требований к надежности и безопасности гидротехнических сооружений после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, а также ввиду уникальности высоконапорного турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1, приняты следующие решения:

- 1) повысить класс капитальности сооружения по степени ответственности до I-го;
- 2) рассматривать конструкцию водовода как сталежелезобетонную;
- 3) выполнить повторный расчет сооружения с учетом гидростатического напора при НПУ, равном 555,3 м.

Схема конструкции развилки турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1 представлена на рис. 1.

Определение величины неполного гидроудара

По тематике вычисления величины превышения давления при гидравлическом ударе выполнен ряд современных исследований [1-5]. Следует заметить, что затворы напорных водоводов работают таким образом, что минимальное время их закрытия больше фазы гидроудара τ_0 (времени, за которое ударная волна проходит путь от затвора до резервуара и возвращается в виде отраженной волны к затвору). Поэтому в турбинных водоводах имеет место неполный гидравлический удар, когда отраженная ударная волна приходит к открытому затвору. Аналитическое решение уравнений Н. Е. Жуковского для случая неполного гидравлического удара представлено в [6].

В данной работе представлены результаты оценки прочности развилки высоконапорного турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1 с учетом максимального избыточного давления, полученного графическим методом, для неполного гидравлического удара [7-12]. По результатам расчета максимальное значение избыточного давления у шарового затвора составило 0,78 МПа.

Согласно техническим условиям эксплуатации гидромеханического оборудования Зарамагской ГЭС-1 время закрытия предтурбинных шаровых затворов составляет 60 с.

График колебаний избыточного давления у затвора представлен на рис. 2.

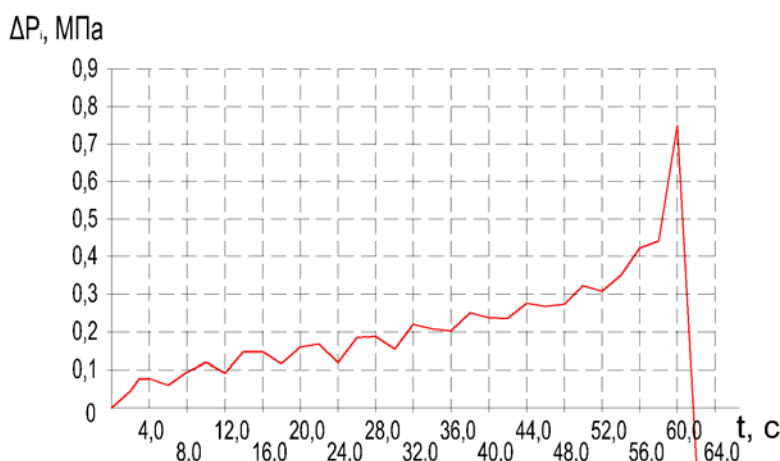


Рисунок 2. График изменения давления у шарового затвора

Таким образом, при расчетном статическом напоре в развилке $H=555,3$ м максимальный динамический расчетный напор, соответствующий случаю гидравлического удара, принят равным 633,3 м (потери напора по длине при движении ударной волны от затвора к развилке пренебрегаем в запас).

Обоснование прочности развилки турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1

Развилка турбинного водовода представляет собой геометрически сложную пространственную конструкцию. Обоснование прочностной надежности конструкции выполнено на основе метода предельных состояний.

Критериальные значения напряжений при оценке прочности металлической оболочки и серповидного ребра отражены в таблице 1.

Основные расчетные параметры конструкции развилки турбинного водовода представлены в таблице 2.

Таблица 1. Критериальные значения напряжений

| Сочетание нагрузок | Элемент конструкции | R_s , МПа | γ_c | γ_c | γ_p | $[\sigma]$, МПа |
|--------------------|------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------------|
| Особое | Серповидное ребро | 260 | 0,9 | 0,9 | 1,25 | 208 |
| | Металлическая оболочка | 280 | | | | 224 |

Таблица 2. Расчетные параметры развилки турбинного водовода

| | |
|---|---|
| Класс сооружения по степени ответственности | 1 |
| Диаметр водовода на участке нижнего колена | 3,6 м |
| Диаметр ветвей водовода за развилкой | 2,6 м |
| Отметка оси развилки, м | 1083,987 |
| Расчетный статический напор | 555,3 м |
| Расчетный гидродинамический напор | 633,3 м |
| Конструкция развилки | сталежелезобетонная |
| Материал конструкции | сталь С345(09Г2С), бетон В15, арматуры АIII |

Пространственная численная математическая модель турбинного водовода содержит нижний участок вертикальной шахты, нижнее колено, камеру развилки турбинного водовода и вмещающий скальный массив. Модель выполнена по методике многослойного моделирования. Суть и общая идея данной методики изложены в работах [13-14]. Учет нелинейных свойств в элементах бетонной оболочки, обусловленных трещинообразованием, выполнен согласно [15-18]. Общий вид геометрической и конечно-элементной моделей водовода представлены на рис. 3.

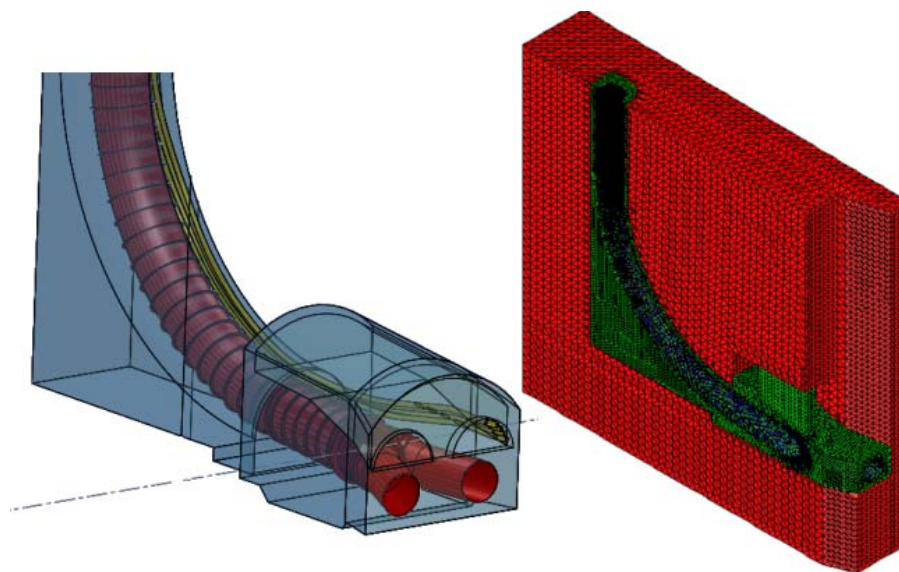


Рисунок 3. Геометрическая и конечно-элементная модели сооружения

Сопоставление результатов расчетов по нормативным методикам и методике многослойного моделирования представлено в таблице 3.

Сравнительный анализ результатов расчета показал:

- 1) площадь кольцевой расчетной арматуры по методике многослойного моделирования в 1,56 раза меньше, чем площадь арматуры, полученной по нормативным методикам;
- 2) напряжения в металле кольцевой арматуры и оболочки при многослойном моделировании практически одинаковые;
- 3) предельного состояния металл оболочки достигнет практически одновременно с металлом кольцевой арматуры, что указывает на выполнение принципов метода предельных состояний.

Таблица 3. Сопоставление результатов расчетов

| | Методика расчета армирования | | | | |
|---|----------------------------------|----------------------------|--|-----------------|---|
| | Инженерный расчет | Модель МКЭ | | | |
| | | СНИП | Нормы Рус-Гидро, Зарубежные стандарты | | Пространственное многослойное моделирование |
| | | | E_n | $\frac{E_n}{K}$ | |
| Fa, см ² | 63,0 | 206,35 | 62,31 | 40,21 | |
| К-т приведения | 1,0 | 3,28 | 0,99 | 0,64 | |
| Напряжения во внутр. кольцевой арматуре σ_s , МПа | $\sigma_s \leq [\sigma_s]$ | $\sigma_s \leq [\sigma_s]$ | | 205,20 | |
| Напряжения во внутр. продольной арматуре σ_s , МПа | - | - | | 98,6 | |
| Напряжения в стальной оболочке σ_{si} , МПа | $\sigma_{si} \leq [\sigma_{si}]$ | 74,25 | 133,65 | 201,6 | |

По результатам расчетов исходной конструкции на особое сочетание нагрузок с учетом гидравлического удара максимальные значения приведенных напряжений в металлической оболочке составили $\sigma_{\max} = 201,6$ МПа, что не превышает критериального значения $[\sigma_{si}] = 224$ МПа (см. табл. 1). Приведенные напряжения в металлической оболочке представлены на рис. 4.

Поле напряжений в серповидном ребре представлено на рис. 4. Напряжения в стали серповидного ребра развилки составили $\sigma_{\max} = 311,7$ МПа, что превышает критериальное значение $[\sigma] = 208$ МПа (см. табл. 1). Таким образом, исходный вариант конструкции не позволяет обеспечить требуемую прочность серповидного ребра развилки при гидравлическом ударе.

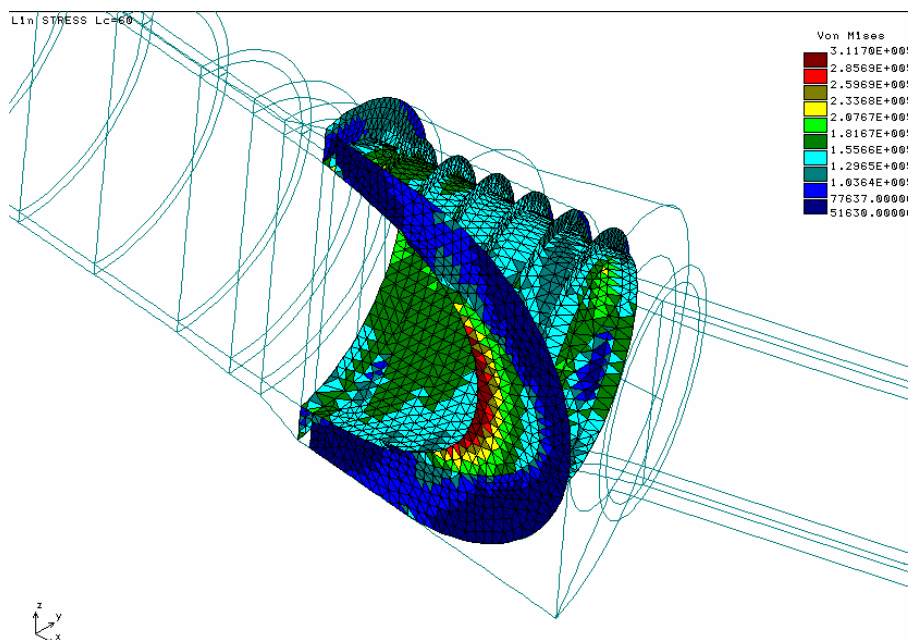


Рисунок 4. Приведенные напряжения в металлической оболочке и серповидном ребре развилки при гидроударе (исходная модель), кПа

Приведенные напряжения во внутренней кольцевой арматуре развилки составили $\sigma_{\max} = 205,2$ МПа, что не превышает критериального значения $[\sigma_s] = 292$ МПа.

Приведенные напряжения во внутренней продольной арматуре развилки составили $\sigma_{\max} = 98,6$ МПа, что не превышает критерияльного значения $[\sigma_s] = 292$ МПа.

Поля напряжений в кольцевой и продольной арматуре развилки представлены на рис. 5.

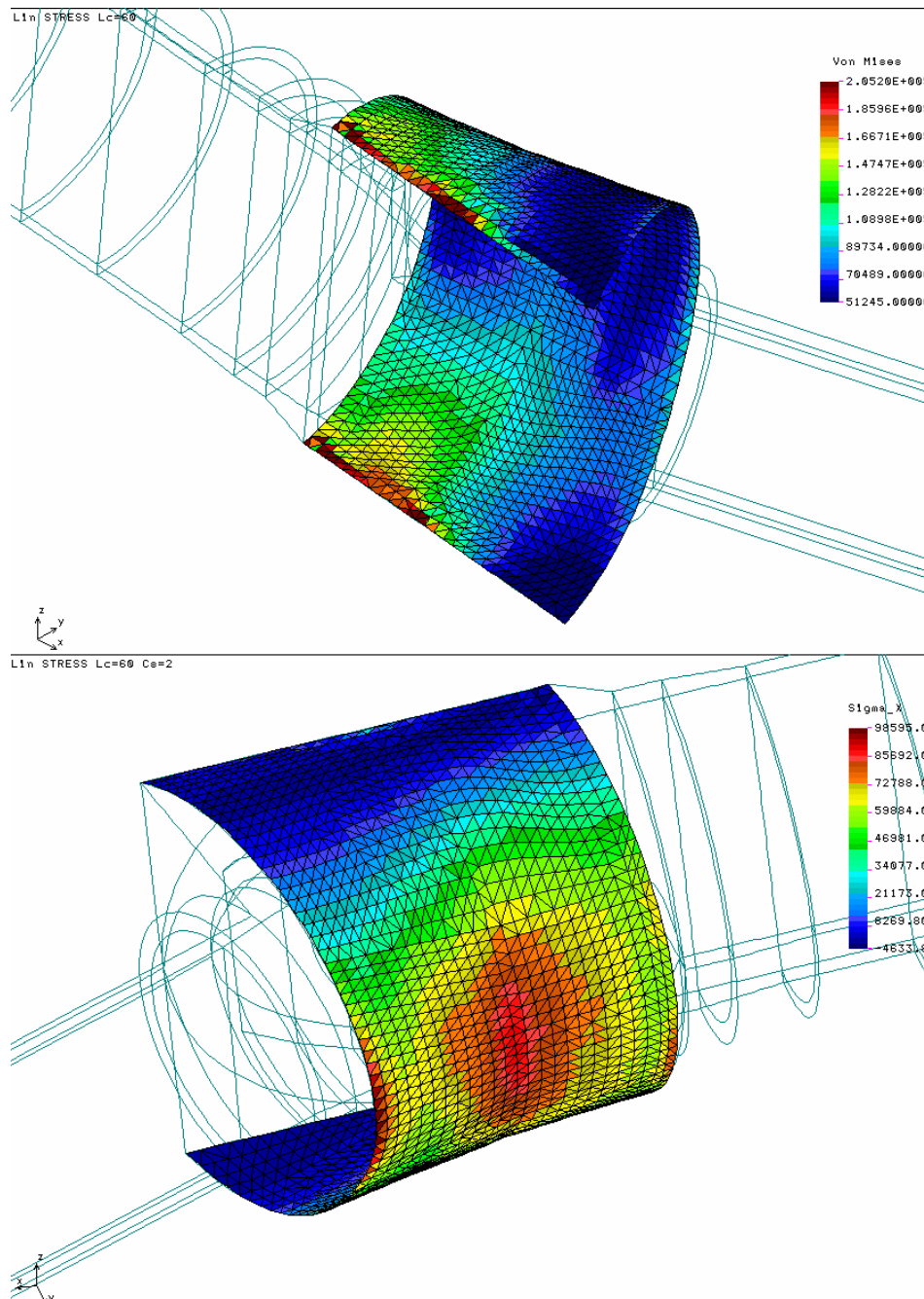


Рисунок 5. Приведенные напряжения в кольцевой (вверху) и продольной (внизу) арматуре развилки при гидроударе (исходная модель), кПа

Таким образом, исходная конструкция развилки не позволяет добиться прочности серповидного ребра в соответствии с нормами. С целью снижения уровня напряжений в серповидном ребре рассмотрены следующие варианты изменения конструкции развилки:

- 1) увеличение площади поперечного сечения серповидного ребра;
- 2) приварка вертикальной стяжки между верхней и нижней оболочками;
- 3) организация бычка-контрфорса шириной 3,0 м.

Результаты расчетов вариантов конструкций для изменяемых элементов развилки представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчетов изменяемых элементов развилки

| Варианты конструкции | Ширина, см | Стяжка σ_{\max} , МПа | Серповидное ребро σ_{\max} , МПа | [σ], МПа | Концентратор напряжений в ребре, см |
|--|------------|------------------------------|---|-------------------|-------------------------------------|
| Исходная геометрия | - | - | 311,7 | 208,0 | 47 |
| 1. Увеличение площади поперечного сечения серповидного ребра | 50 | - | 207,9 | | - |
| 2. Устройство стяжек, толщина 10 см | 25 | 209,2 | 266,10 | | 20 |
| | 30 | 192,8 | 252,05 | | 16 |
| | 35 | 180,65 | 241,91 | | 12 |
| | 45 | 161,50 | 224,80 | | 8 |
| 2.1. Стержень $\varnothing 12$ см | 12 | 163,2 | 258,74 | | 32 |
| 3. Создание бетонного бычка над развилкой | 300 | - | 204,45 | | - |

Увеличение поперечного сечения серповидного ребра за счет уширения его по направлению вдоль потока полностью исключает концентраторы напряжений. Однако уширение ребра внутри водного потока негативно влияет на гидравлический режим водовода, приводит к увеличению потерь напора, а также нецелесообразно с экономической точки зрения, так как исходный профиль ребра на момент выполнения расчета был уже изготовлен.

Усиление ребра различными видами стяжек позволяет добиться локализации зоны концентрации напряжений до 8 см, не исключая ее полностью. Таким образом, устройство стяжек неэффективно.

Усиление развилки при помощи бычка-контрфорса, позволяющего передать часть нагрузки с развилки турбинного водовода на скальный массив свода, позволило добиться снижения напряжений в серповидном ребре до критериального уровня, не затрагивая исходную металлическую конструкцию развилки.

Таким образом, к исполнению рекомендован вариант с развилкой, усиленной бетонным бычком. Приведенные напряжения по Мизесу в металлической оболочке развилки и серповидном ребре представлены на рис. 6. Максимальные значения приведенных напряжений в серповидном ребре составили 204,45 МПа, что не превышает критериального значения $\sigma_{\max(\text{расч})} = 208,0 \text{ МПа}$. Максимальные значения приведенных напряжений в металлической оболочке составили 147,0 МПа, что не превышает критериального значения $\sigma_{\max(\text{расч})} = 224,0 \text{ МПа}$.

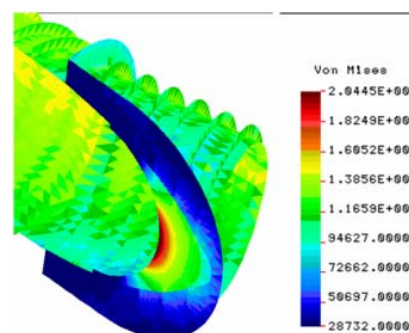


Рисунок 6. Приведенные напряжения по Мизесу в металлической оболочке развилки и серповидном ребре при гидроударе (при усилении развилки бычком), кПа

Заключение

Гидравлический удар является особой нагрузкой, резко ухудшающей напряженное состояние несущих элементов высоконапорных водопроводящих трактов. В данной работе на примере сталежелезобетонной развилки турбинного водовода Зарамагской ГЭС-1 определена величина избыточного давления, выполнен расчет прочности конструкции с учетом гидравлического удара, подобраны варианты ее усиления.

Проведенный анализ, по нашему мнению, может быть рекомендован для расчетного обоснования параметров турбинных водоводов высоконапорных деривационных гидроэлектростанций.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. На основании графического метода показано, что максимальная величина повышения давления в напорном водоводе Зарамагской ГЭС-1 при неполном гидравлическом ударе достигает 78 м, а гидродинамический напор – 633,3 м.
2. Расчет прочности развилки турбинного водовода при особом сочетании нагрузок с учетом гидравлического удара, выполненный методом многослойного моделирования, показал, что напряжения в серповидном ребре достигают 311,7 МПа и превышают предел текучести стали.
3. По результатам анализа напряженного состояния предложены варианты усиления конструкции развилки, заключающиеся в уширении серповидного ребра, установке стяжек внутри водовода, устройстве бычка-контрфорса.
4. В качестве окончательного принят вариант усиления развилки бетонным бычком, передающим части гидродинамической нагрузки на скальный массив без изменения гидравлического режима работы водовода.
5. Сталежелезобетонная конструкция развилки, усиленная бетонным бычком, внедрена в рабочий проект высоконапорного водопроводящего тракта Зарамагской ГЭС-1.

Литература

1. Арефьев Н. В., Соколов Б. А. Расчет гидравлического удара явным методом конечных разностей // Труды ЛПИ. 1978. Вып. 361. С. 30-32.
2. Гиргидов А. Д. Оценка уменьшения гидравлического удара при введении в трубопровод деформируемых тел // Гидротехническое строительство. 2009. №11. С. 29-32.
3. Ушпурас Е. Использование методов FAST и CSM для анализа неопределенностей при моделировании гидравлического удара // Атомная энергия. 2010. Т. 109, Вып. 3. С. 171-176.
4. Джафаров Т. Д., Калбиев Р.К., Бархалов Р.Р. Возможные причины аварии на ГЭС, обусловленные гидроударом // Энергетик. 2011. №9. С. 18-20.
5. Хохлов А. В., Хохлов В. А. Перепускные устройства как эффективное средство защиты от гидравлического удара // Гидротехническое строительство. 2001. №5. С. 33-35.
6. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.: Либроком, 2011. 110 с.
7. Риман Б. Сочинения. О распространении плоских волн конечной амплитуды. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. 543 с.
8. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И. Гидравлика. М.: Госэнергоиздат, 1954. 484 с.
9. Куколевский И. И. Гидравлический удар в простом трубопроводе // Сборник научных трудов МВТУ им. Баумана. 1949. №5. С. 14-40.
10. Сурин А. А. Гидравлический удар в водопроводных трубах и борьба с ним. М.: Трансжелдориздат, 1946. 372 с.
11. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа(гидравлика). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
12. Мостков М. А., Башкиров А. А. Расчеты гидравлического удара. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. 200 с.
13. Козинец Г. Л. Алгоритм расчета сталежелезобетонных водоводов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №6 (24). С. 41-49.
14. Козинец Г. Л. Обоснование надежности гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2012. №5 (31). С. 30-37.
15. Mangold G. D. Entrapped or empowered by technology? The implementation and implications of computer technologies for agriculture // Resource. 1995. Vol. 2, №5. Pp. 9-11.
16. Cervenka V. Inelastic Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Panels Under Inplane Loads: Ph.D....dis/Dept. Civ. Eng. Univ. Colorado. Boulder, 1970. 20 p.
17. Cervenka V. Constitutive Models for Cracked Reinforced Concrete // ACI Journal. 1985. Vol. 82. №6. Pp. 877-882.
18. Darwin D., Pecknold D.A. Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete // J. Eng. Mech. Div. ASCE. 1977. Vol. 103. EM2. Pp. 229-241.

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

© Козинец Г.Л., Потехин Л.П., 2012

doi: 10.5862/MCE.32.4

Numerical evaluating strength reliability of penstocks under hydraulic hammer

G.L. Kozinets,*JSC "Lenhydroproject", Saint-Petersburg, Russia
+7(812)395-23-79; e-mail: galina4410@yandex.ru***L.P. Potekhin,***JSC "Lenhydroproject", Saint-Petersburg, Russia*

Key words

water conduit; partial hydraulic hammer; penstock fork; shock wave; water hammer phase; graphical method; metal shell; reduced stresses; structural strength

Abstract

The paper presents a graphical method for estimating the excess pressure in penstocks under partial hydraulic hammer.

Based on the proposed method, the maximum design load under hydraulic hammer in a high-pressure penstock of the Zaramagskaya HPP-1 was determined. Strength of metal shell and crescent rib of the penstock fork was evaluated under a specific load combination typical for hydraulic hammer. Variants of the fork structure reinforcement were considered.

Comparison of strength reliability was performed for the variants of steel and composite steel-concrete construction of penstock fork.

References

1. Arefyev N. V., Sokolov B. A. *Trudy LPI* [Proceedings of Leningrad Polytechnical Institute]. 1978. No. 361. Pp. 30-32. (rus)
2. Girgidov A. D. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2009. No. 11. Pp. 29-32. (rus)
3. Ushpuras E. *Atomnaya energiya* [Nuclear energy]. 2010. Vol. 109. Issue 3. Pp. 171-176. (rus)
4. Dzhabarov T. D., Kalbiev R. K., Barkhalov R. R. *Energetik* [Energetic]. 2011. No. 9. Pp. 18-20. (rus)
5. Khokhlov A. V., Khokhlov V. A. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2001. No. 5. Pp. 33-35. (rus)
6. Zhukovskiy N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh* [On the water hammer in water pipes]. Moscow: Librokom, 2011. 110 p. (rus)
7. Riman B. Sochineniya. *O rasprostraneni ploskikh voln konechnoy amplitudy* [Works. On the propagation of plane waves of finite amplitude]. Moscow: gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1948. 543 p. (rus)
8. Agroskin I. I., Dmitriev G. T., Pikalov F. I. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow: Gosenergoizdat, 1954. 484 p. (rus)
9. Kukolevskiy I. I. *Sbornik nauchnykh trudov MVTU* [Scientific works collection of MSTU mane Bauman]. 1949. No. 5. Pp. 14-40. (rus)
10. Surin A. A. *Gidravlicheskiy udar v vodoprovodnykh trubakh i borba s nim* [Water hammer in water pipes and control]. Moscow: Transzheldorizdat, 1946. 372 p. (rus)
11. Girgidov A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)* [Fluid and gas mechanics (hydraulics)]. Saint-Petersburg: SPSPU, 2007. 545 p. (rus)
12. Mostkov M. A., Bashkirov A. A. *Raschety gidravlicheskogo udara* [Water hammer calculations]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1952. 200 p. (rus)
13. Kozinets G. L. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 6 (24). Pp. 41-49. (rus)
14. Kozinets G. L. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 5 (31). Pp. 30-37. (rus)
15. Mangold G. D. Entrapped or empowered by technology? The implementation and implications of computer technologies for agriculture. *Resource*. 1995. Vol. 2. No. 5. Pp. 9-11.

16. Cervenka V. *Inelastic Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Panels Under Inplane Loads*. Ph.D....dis/Dept. Civ. Eng. Univ. Colorado. Boulder. 1970. 20 p.
17. Cervenka V. Constitutive Models for Cracked Reinforced Concrete. *ACI Journal*. 1985. Vol. 82. No. 6. Pp. 877–882.
18. Darwin D., Pecknold D. A. Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete. *J. Eng. Mech. Div. ASCE*. 1977. Vol. 103. EM 2. Pp. 229-241.

Full text of this article in Russian: pp. 29-35