

ОСОБЕННОСТИ АРМИРОВАНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ НАПОРНЫХ ВОДОВОДОВ

О.Д. РУБИН *, доктор технических наук,

С.Е. ЛИСИЧКИН **, доктор технических наук,

А.С. ЛИСИЧКИН **, инженер

*ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (ОАО «НИИЭС»), 125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7А, info@niies.ru

**ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике» (ООО «ИЦСКТЭ»), 125362, г. Москва, ул. Свободы, д. 35, cskte@mail.ru

Сталежелезобетонные напорные водоводы, подводящие воду к агрегатам ГЭС (ГАЭС), включают внутреннюю стальную и железобетонную оболочки. В пределах компенсационных участков на контакте соседних сооружений, через которые проходят напорные водоводы, внутренняя стальная оболочка отделяется от железобетонной оболочки низко модульной прокладкой. Действующие нормативные документы не содержат конкретных указаний по расчетному определению армирования компенсационных участков напорных водоводов. Предлагается методика назначения армирования (с разработкой схем армирования) компенсационных участков на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных напорных водоводов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонные напорные водоводы ГЭС (ГАЭС); компенсационные участки; внутренняя стальная оболочка; железобетонная оболочка; методика численного моделирования; конечно-элементные модели; напряженно-деформированное состояние; кольцевая арматура; схемы армирования.

Высоконапорные гидроэлектростанции большой мощности, как правило, включают в себя напорные водоводы большого диаметра. В практике отечественного гидротехнического строительства широкое применение нашла сталежелезобетонная конструкция напорных водоводов.

В отличие от стальной конструкции напорных водоводов (имеющей единственный несущий элемент – непосредственно стальную оболочку) сталежелезобетонная конструкция имеет два несущих элемента: внутреннюю стальную оболочку и наружную железобетонную оболочку. Действующие нормативные документы предусматривают совместную работу внутренней стальной оболочки и наружной железобетонной оболочки.

Условие прочности имеет следующий вид:

$$N \leq (A_{so} R_{so} + A_s R_s), \quad (1)$$

где N – растягивающее усилие на 1 м.п стенки водовода; A_{so} , A_s – площади сечения внутренней стальной оболочки и кольцевой арматуры; R_{so} , R_s – расчетные

сопротивления листовой стали внутренней оболочки и кольцевой арматуры. Растягивающее усилие N на предварительной стадии проектирования может определяться по «котельной» формуле. Более точно растягивающее усилие может определяться численными методами на основе конечно-элементных моделей. Так, водоводы Богучанской ГЭС диаметром 10 м имеют следующие параметры на наиболее нагруженном низовом участке: толщина внутренней стальной оболочки 40 мм; внутренний ряд кольцевой арматуры диаметром 40 мм класса А-III с шагом 200 мм; внешний ряд кольцевой арматуры диаметром 40 мм класса А-III с шагом 200 мм.

На наиболее нагруженном низовом участке водоводы действующей Загорской ГАЭС диаметром 7,5 м имеют толщину внутренней стальной оболочки 10 мм; внутренний ряд кольцевой арматуры диаметром 40 мм класса А-III с шагом 200 мм; внешний ряд кольцевой арматуры диаметром 40 мм класса А-III с шагом 100 мм. На том же участке водоводы строящейся Загорской ГАЭС-2 имеют толщину внутренней стальной оболочки 30 мм и один ряд кольцевой арматуры из арматуры класса А500С диаметром 40 мм с шагом 125 мм.

По своей протяженности напорные водоводы имеют так называемые компенсационные участки, которые служат для уменьшения негативного влияния на водовод взаимных смещений на контакте двух сооружений при пересечении водоводом вертикального деформационного шва между этими сооружениями (то есть при выходе водовода из одного сооружений и входе в другое сооружение). В случае приплотинной компоновки здания ГЭС компенсационный участок напорного водовода устраивается в зоне деформационного шва между носковой частью плотины и зданием ГЭС (при выходе водовода из плотины и при входе в здание ГЭС). В случае отдельного расположения здания ГЭС (ГАЭС) компенсационный участок напорного водовода устраивается при выходе водовода из водоприемника и при входе в здание ГЭС (ГАЭС).

В практике отечественного гидростроительства широкое применение нашло решение компенсационного участка (например, между плотиной и зданием ГЭС) с применением мягкой прокладки, отделяющей стальную оболочку от бетона, за счет которого можно избежать устройства сложного компенсатора (рис. 1). При этом в пределах компенсационного участка на водоводе предусматриваются специальные замыкающие звенья, и оставляется штраба в бетоне на этом участке. Замыкание водовода (приваривание его последнего замыкающего звена в пределах компенсационного участка) и омоноличивание компенсационного участка осуществляется в последнюю очередь непосредственно перед началом эксплуатации при частично наполненном водохранилище, после реализации основной части взаимных деформаций (в том числе осадок), имеющих место в строительный период и при нагружении напорной грани сооружения гидростатической нагрузкой.

Следует особо отметить, что действующие нормативные документы не содержат конкретных указаний по расчетам сталежелезобетонных водоводов в зонах компенсационных участков, в том числе по определению количества арматуры.

Авторами предложено определять требуемую площадь сечения кольцевой арматуры компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов на основе результатов численного моделирования данных участков.

При этом площади сечения кольцевой арматуры внутреннего и внешнего рядов определяется по зависимостям:

$$A_{s,вн} = N_{вн} / R_s; A_{s,нап} = N_{нап} / R_s; \quad (2)$$

где $N_{вн}$ и $N_{нар}$ – кольцевые растягивающие усилия, действующие во внутренней и внешней зонах железобетонной оболочки водовода.

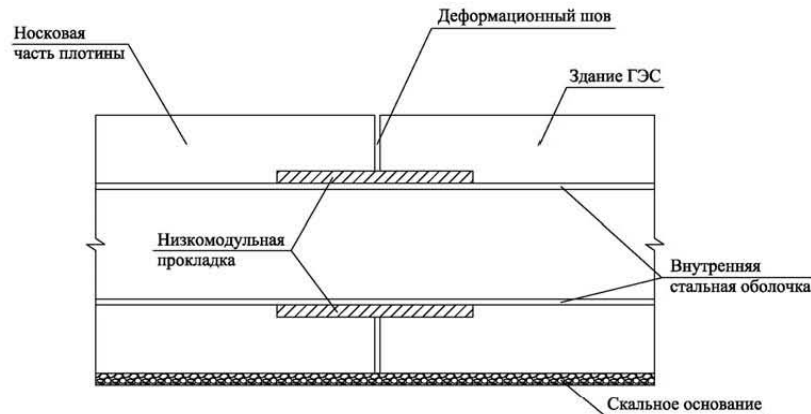


Рис. 1. Компенсационный участок напорного водовода

Значения усилий $N_{вн}$ и $N_{нар}$ предлагается определять путем анализа полученных результатов расчетов напряженного состояния железобетонной оболочки на основе конечно-элементных моделей компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов. Для этой цели выполняется интегрирование полученных кольцевых растягивающих напряжений по площади расчетного сечения железобетонной оболочки (рис. 2). При этом кольцевое растягивающее усилие во внутреннем ряду железобетонной оболочки (в диапазоне от $R_{вн}$ до $R_{ср}$) определяется по следующей формуле:

$$N_{вн} = \sum \sigma_{\theta i} \cdot b \cdot \Delta r_i . \quad (3)$$

Усилие во внешнем ряду железобетонной оболочки (в диапазоне от $R_{ср}$ до $R_{нар}$) определяется по следующей зависимости:

$$N_{нар} = \sum \sigma_{\theta i} \cdot b \cdot \Delta r_i , \quad (4)$$

где $\sigma_{\theta i}$ – кольцевые напряжения в соответствующих элементах конечно-элементной модели компенсационного участка, b – протяженность расчетного участка, принимаемая равной 1 м; Δr_i – высота данного конечного элемента; $R_{вн}$, $R_{нар}$ – внутренний и наружный радиусы водовода; $R_{ср} = 0,5(R_{вн} + R_{нар})$.

Авторами была усовершенствована методика численного моделирования сталежелезобетонных напорных водоводов [1, 2, 3, 4]. При этом учитывался опыт исследований напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных напорных водоводов [5, 6, 7, 8], в том числе взаимодействие стальных элементов с бетоном [9, 10, 11].

На основе указанной методики были выполнены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния и прочности (с определением армирования) компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов применительно к следующим параметрам: диаметр водовода 4 м; протяженность компенсационного участка 6,0 м (1,5 диаметра водовода); толщина внутренней стальной оболочки

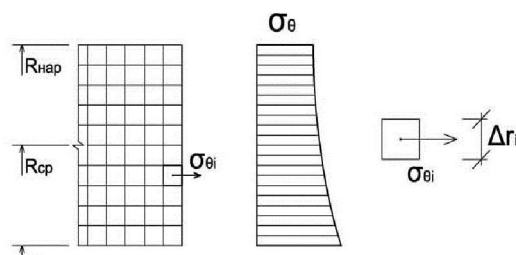


Рис. 2. Эпюры кольцевых растягивающих напряжений

на основной протяженности водовода 16 мм, в пределах компенсационного участка - 25 мм; толщина низко модульной прокладки 50 мм; толщина железобетонной оболочки из бетона класса В25 - 1 м; два ряда армирования из арматуры класса А-III; внутреннее давление 2 МПа.



Рис. 3. Разработанная схема сталежелезобетонного напорного водовода

Гидротехническое строительство. – 1999. – №1. – С. 37- 44.

3. Лисичкин А.С. Расчетные исследования компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов, устраиваемых с применением низко модульной прокладки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2013. – № 3. – С. 43-49.

4. O.D. Rubin, S.E. Lisichkin, B.A. Nikolaev, N.M. Kamnev. Characteristics of calculating and designing concrete-encased steel penstocks // Hydrotechnical Construction Consultants bureau. – Vol. 33, No. 1, New York, January, 1999, pp.40- 48.

5. Wu Hailin, Qin Shihe, Zhou Yihong. Research optimization of connection form between the dam and the powerhouse at the dam toe // Journal of Hydroelectric Engineering. – 2010. – № 29. – Pp. 156 -160.

6. Козинец Г.Л., Лисичкин С.Е., Богаченко С.В., Ивонтьев А.В. Численное моделирование сталежелезобетонных гидротехнических сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 4. – С. 50-56.

Анализ результатов расчетов показал, что в железобетонной оболочке компенсационного участка, отделенной от стальной оболочки прокладкой, возникают кольцевые растягивающие напряжения, превышающие прочность бетона на растяжение.

С использованием разработанных зависимостей (2)-(4) определено требуемое количество арматуры. Так на основной протяженности сталежелезобетонного водовода (при толщине стальной оболочки 16 мм) предложено установить кольцевую арматуру класса А-III диаметром 25 мм с шагом 200 мм у внутренней и у наружной грани железобетонной оболочки (рис. 3.а). В пределах первой четверти длины компенсационного участка (при толщине стальной оболочки 25 мм) предложено установить кольцевую арматуру класса А-III диаметром 22 мм с шагом 200 мм у внутренней грани и диаметром 20 мм с тем же шагом 200 мм - у наружной грани (рис. 3.б). В пределах второй четверти длины компенсационного участка предложено установить кольцевую арматуру класса А-III диаметром 20 мм с шагом 200 мм у внутренней грани и диаметром 16 мм с тем же шагом 200 мм - у наружной грани (рис. 3.в).

Л и т е р а т у р а

1. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е. Расчет прочности напорных водоводов Богучанской ГЭС // Сб. трудов ВНИИГ им.Б.Е.Веденева, т. 232, 1996. – С.433-445.

2. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Николаев Б.А., Камнев Н.М. Особенности расчета и проектирования сталежелезобетонных напорных водоводов // Гидротехническое строительство. – 1999. – №1. – С. 37- 44.

7. Zhang Wei, Wu Hegao, Wu Hailin. Study on Connection Structure Between Dam and Hydropower Station// *Water Resources and Power*. – 2005. – №23. – Pp. 36 - 39.
8. Снежко В.Л. Влияние конструкции проточной части напорных водоводов на их надежность // *Отраслевые аспекты технических наук*. – 2011. – №5. – С. 28-31.
9. Румянцева И.А. Экспериментальные исследования работы разных видов выштамповок на сдвиг // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2014. – № 5. – С. 74-79.
10. А.С. 1557289. 5E04C5/03. Арматура для бетона. / Э.Л. Айрумян, Беляев В.Ф., Румянцева И.А., Росляков В.Ф., Кузнецов Н.А., Голованов С.Б., Алексеев В.А. // *БИ*. 1990. №14. –160 с.
11. Николаев В.Б., Климов Е.А. Использование стальной облицовки в качестве рабочей арматуры в железобетонных конструкциях ГЭС и АЭС // *Гидротехническое строительство*. – 2014. – № 4.– С. 17-19.

References

1. Rubin, OD, Lisichkin, SE (1996). Raschet prochnosti napornyh vodovodov Boguchanskoj GJeS. *Sb. Trudov VNIG im. BE Vedeneeva*, Vol. 232, pp. 433-445.
2. Lisichkin, SE, Rubin, OD, Nikolaev, BA, Kamnev, NM (1999). Osobennosti rascheta i proektirovaniya stalezhelezobetonnyh napornyh vodovodov. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*, №1, pp. 37-44.
3. Lisichkin, AS (2013). Raschetnye issledovaniya kompensacionnyh uchastkov stalezhelezobetonnyh napornyh vodovodov, ustraivaemyh s primeneniem nizkomodul'noj prokladki. *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktziy i Sooruzheniy*, № 3, pp. 43-49.
4. Rubin, OD, Lisichkin, SE, Nikolaev, BA, Kamnev, NM (1999). Characteristics of calculating and designing concrete-encased steel penstocks. *Hydrotechnical Construction Consultants Bureau*. Vol.33, No. 1, New York, January, pp.40- 48.
5. Wu Hailin, Qin Shihe, Zhou Yihong (2010). Research optimization of connection form between the dam and the powerhouse at the dam toe. *Journal of Hydroelectric Engineering*, №29, pp. 156 -160.
6. Kozinec, GL, Lisichkin, SE, Bogachenko, SV, Ivont'ev, AV (2011). Chislennoe modelirovanie stalezhelezobetonnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij. *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktziy i Sooruzheniy*, № 4, pp. 50-56.
7. Zhang Wei, Wu Hegao, Wu Hailin (2005). Study on connection structure between dam and hydropower station. *Water Resources and Power*, №23, pp. 36 - 39.
8. Snezhko, VL (2011). Vlijanie konstrukcii protochnoj chasti napornyh vodovodov na ih nadezhnost'. *Otraslevye aspekty tehniceskikh nauk*, №5, pp. 28-31.
9. Rumjanceva, IA (2014). Jeksperimental'nye issledovaniya raboty raznyh vidov vyshtampovok na sdvig. *Stroitel'naya Mehanika Inzhenernyh Konstruktziy i Sooruzheniy*, № 5, p. 74-79.
10. A.S. 1557289. 5E04S5/03 (1990). Armatura dlja betona. Ajrumjan, EL, Beljaev, VF, Rumjanceva, IA, Rosljakov, VF, Kuznetsov, NA, Golovanov, SB, Alekseev, VA. *BI*. №14, p. 160.
11. Nikolaev, VB, Klimov, EA (2014). Ispol'zovanie stal'noj oblicovki v kachestve rabochej armatury v zhelezobetonnyh konstrukcijah GJeS i AJeS. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. № 4, p. 17-19.

FEATURES OF REINFORCEMENT OF CONCRETE-ENCASED STEEL PENSTOCKS

O.D. Rubin*, S.E. Lisichkin**, A.S. Lisichkin**

*Scientific Research Institute of Energy Structures (Open Joint-stock Company),

**Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Energy (Limited Liability Company)

Concrete-encased steel penstocks that lead the water to the hydroelectric units of the Hydropower Plants (HPP or PSPP) include internal steel shell and a reinforced concrete shell. Within the areas of compensation on track adjacent structures through which the penstocks passes, internal steel shell separated from the reinforced concrete shell by low-modulus spacer. Existing regulatory documents do not provide specific guidance on the calculated definition of reinforcement of compensatory plots of penstocks. The technique destination of the reinforcement (with the development of reinforcement scheme) of the compensatory plots on the basis of numerical modeling of the stress-strain state of concrete-encased steel penstocks is proposed.

KEY WORDS: Concrete-encased steel penstocks HPP (PSPP); compensatory plots; internal steel shell; reinforced concrete shell; method of numerical modeling; FE models; stress-strain state; circular reinforcement; reinforcement scheme.