

**РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫХ УЧАСТКОВ
СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ НАПОРНЫХ ВОДОВОДОВ,
УСТРАИВАЕМЫХ СПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОМОДУЛЬНОЙ
ПРОКЛАДКИ**

А.С. ЛИСИЧКИН, аспирант
ООО «ИЦ СКТЭ», Москва

Традиционные в настоящее время сталежелезобетонные напорные турбинные водоводы имеют так называемые компенсационные участки, устраиваемые в местах перехода из тела бетонной плотины в здание ГЭС с применением низко модульной («мягкой») прокладки, полностью отделяющей внутреннюю стальную оболочку от окружающего железобетона. На основе конечно-элементных моделей представлены результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния компенсационных участков напорных водоводов при различных переменных параметрах с целью обоснования необходимости установки расчетного рабочего армирования взамен конструктивного армирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонные напорные водоводы; компенсационные участки; низко модульная («мягкая») прокладка; напряженно-деформированное состояние (НДС); кольцевые растягивающие напряжения; конечно-элементные модели; расчетное рабочее и конструктивное армирование.

В последние десятилетия в практику строительства современных гидроузлов большой мощности прочно вошли напорные водоводы сталежелезобетонной конструкции большого диаметра, подводящие воду к гидроагрегатам здания ГЭС [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. При этом следует упомянуть, что турбинные напорные водоводы являются одними из наиболее ответственных сооружений гидроузлов, так их повреждения могут привести к затоплению ГЭС и прилегающей территории.

Необходимость разработки и последующей реализации новой сталежелезобетонной конструкции напорных водоводов была вызвана проблемами проектирования и строительства высоконапорных ГЭС большой мощности на территории бывшего СССР. При этом сталежелезобетонная конструкция, имеющая два несущих элемента: внутреннюю стальную оболочку и окружающую железобетонную оболочку, - оказалась более прочной и надежной, чем традиционные стальные конструкции. Для обоснования новой конструкции были проведены значительные экспериментальные и расчетные исследования [3, 4].

В случае приплотинной компоновки здания ГЭС напорный водовод из тела плотины переходит непосредственно в здание ГЭС [1, 3, 4, 5], при этом необходимо устраивать специальный компенсатор для минимизации последствий от взаимных деформаций носковой части плотины и здания ГЭС. Однако, была найдена возможность отказаться от устройства сложного компенсатора путем организации компенсационного участка между плотиной и зданием ГЭС на основе применения низко модульной («мягкой») прокладки, полностью отделяющей внутреннюю стальную оболочку от окружающего железобетона в зоне деформационного шва между плотиной и зданием ГЭС (рис. 1).

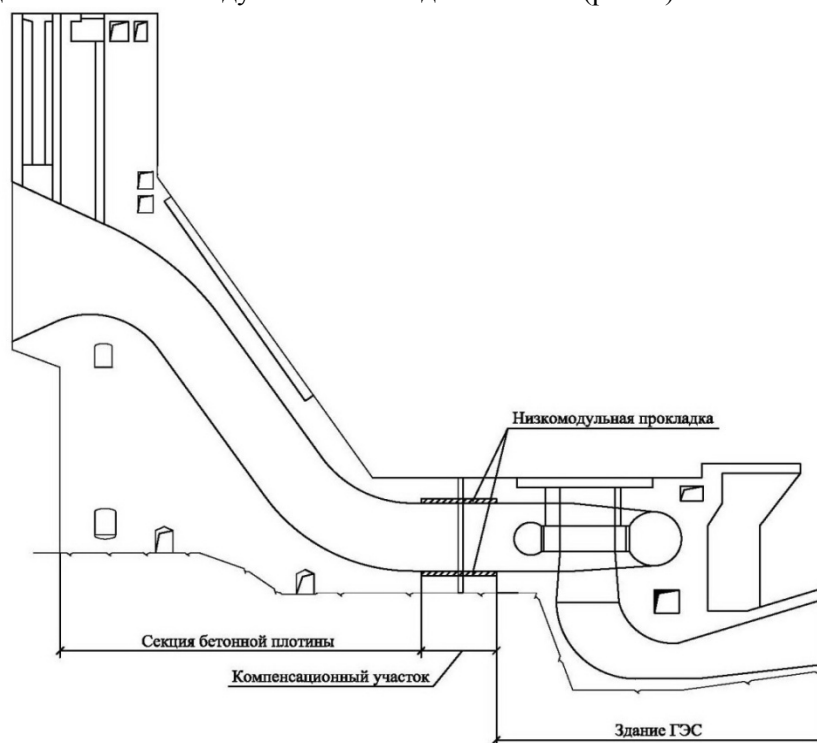


Рис. 1. Расположение компенсационного участка напорного водовода

В случаях деривационных типов зданий ГЭС (когда подводка воды к зданию ГЭС осуществляется посредством протяженных водоводов, расположенных либо на открытой поверхности, либо под землей [2, 4, 8]) на участках входа деривационных водоводов внутрь здания ГЭС также целесообразно устраивать компенсационные участки с применением «мягкой» прокладки.

В качестве ярких примеров применения сталежелезобетонных напорных водоводов с компенсационными участками на основе «мягкой» прокладки следует упомянуть Красноярскую, Саяно-Шушенскую, Чиркейскую, Богучанскую, Бурейскую ГЭС, Загорскую ГАЭС [1, 2, 3, 4, 5]. По предложению российских специалистов компенсационные участки сталежелезобетонных водоводов с приме-

нением «мягкой» прокладки были реализованы на крупнейшей в мире ГЭС «Три Ущелья» [7]. В табл. 1 приведены данные о компенсационных участках напорных водоводов.

Таблица 1

Параметры водоводов ряда ГЭС на участках с «мягкой» прокладкой

№ п / п	Название ГЭС	Напор, м	Диаметр водоводов D, м	Длина L участка с «мягкой» прокладкой, м	Отношение L/D	Толщина «мягкой прокладки», мм
1	Усть-Илимская ГЭС на Ангаре	110	7,85	11,0	1,40	50
2	Братская ГЭС на Ангаре	106	7,0	4,0	0,57	50
3	Саяно-Шушенская ГЭС на Ангаре	270	7,05	11,0	1,56	60
4	Зейская ГЭС на р. Зея	135	7,77	12,3	1,58	50
5	Курпсайская ГЭС на р. Нарын	111	7,0	12,8	1,83	50
6	Ташкумырская ГЭС на р. Нарын	70	7,6	6,55	0,86	50
7	Юмагузинская ГЭС на р. Белая	65	3,2	5,0	1,56	30
8	Бурейская ГЭС на р. Буря	140	8,5	12,0	1,41	50
9	Богучанская ГЭС на р. Ангара	75,6	10,0	10,5	1,05	50
10	Г/у «Три Ущелья» на р. Янцзы (КНР)	140	12,4	12,0	0,97	50

Автором был выполнен анализ конструктивных решений компенсационных участков напорных водоводов. Как это следует из представленных в табл.1 данных, в практике гидроэнергетического строительства применялось соотношение длины компенсационного участка к диаметру водовода L / D в диапазоне от 0,57 до 1,83. Как отмечалось выше, в период разработки и обоснования сталежелезобетонной конструкции напорных водоводов был выполнен значительный объем экспериментальных исследований. Вместе с тем не имеется данных об экспериментальных исследованиях компенсационных участков напорных водоводов. Действующие нормативные документы, касающиеся вопросов проектирования сталежелезобетонных напорных водоводов, не содержат конкретных указаний по расчетам и конструированию компенсационных участков с применением низко модульной прокладки.

При этом существует традиционное представление о том, что в пределах компенсационных участков напорных водоводов давление воды полностью воспринимается внутренней стальной оболочкой и совершенно не передается на окружающую железобетонную часть, отделенную «мягкой» прокладкой. С учетом изложенных предпосылок в пределах компенсационных участков водоводов кольцевое армирование определяется не по расчету, а назначается конструктивно. Тем не менее, результаты расчетных исследований, представленные ниже, показывают, что, в действительности, внутреннее давление воды в определенной степени передается через низко модульную прокладку на окружающий железобетон, а также, в особенности, в области, примыкающей к зонам опирания внутренней стальной оболочки на железобетон (в начале и окончании низко модульной прокладки).

С этой целью автором были выполнены специальные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов при изменении ряда параметров: отношения длины компенсационного участка L к диаметру D водовода; толщины «мягкой» прокладки; модуля деформации «мягкой» прокладки. Расчетные исследования НДС компенсационного участка проводились на основе конечно-элементных моделей фрагмента сталежелезобетонного напорного водовода, включающего компенсационный участок, при действии внутреннего давления воды. При этом моделировалась внутренняя стальная оболочка толщиной 2,5 см и диаметром $D = 4$ м; окружающая железобетонная оболочка толщиной 1,0 м; «мягкая» прокладка длиной L от 2,0 до 6,0 м (от $0,5D$ до $1,5D$) и толщиной от 2,5 до 5,0 см. Таким образом, в расчетных исследованиях были приняты соотношения длины участка L с низко модульной прокладкой к диаметру D водовода 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5 при переменной толщине «мягкой» прокладки от 2,5 до 5,0 см. Также изменялся модуль деформаций «мягкой» прокладки в диапазоне от 1,0 МПа до 10,0 МПа. Расчетные схемы фрагмента сталежелезобетонного напорного водовода (включающего компенсационный участок) представлены на рис. 2.

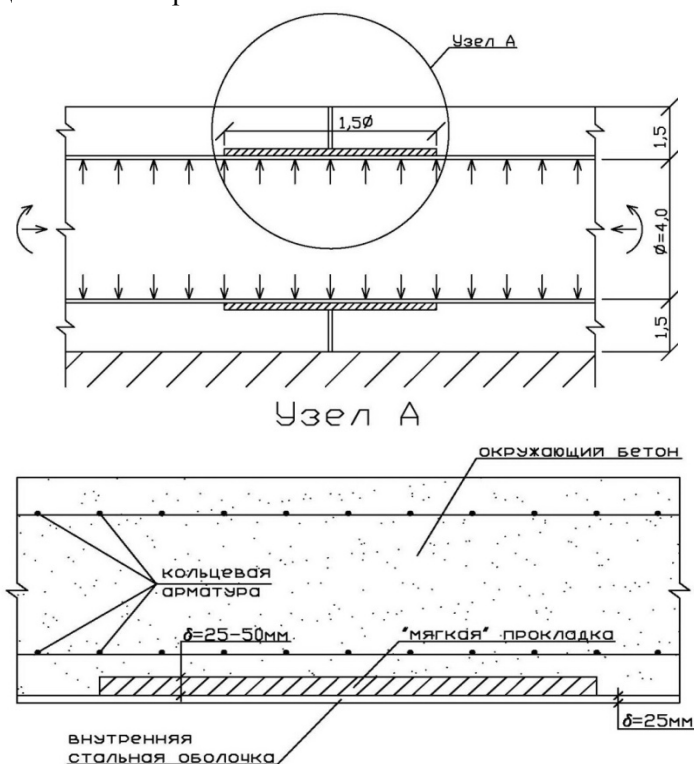


Рис.2. Схема фрагмента сталежелезобетонного напорного водовода, включающего компенсационный участок

Результаты расчетов НДС напорного водовода в зоне компенсационного участка в виде цветowych полей кольцевых напряжений представлены графически на рис. 3.

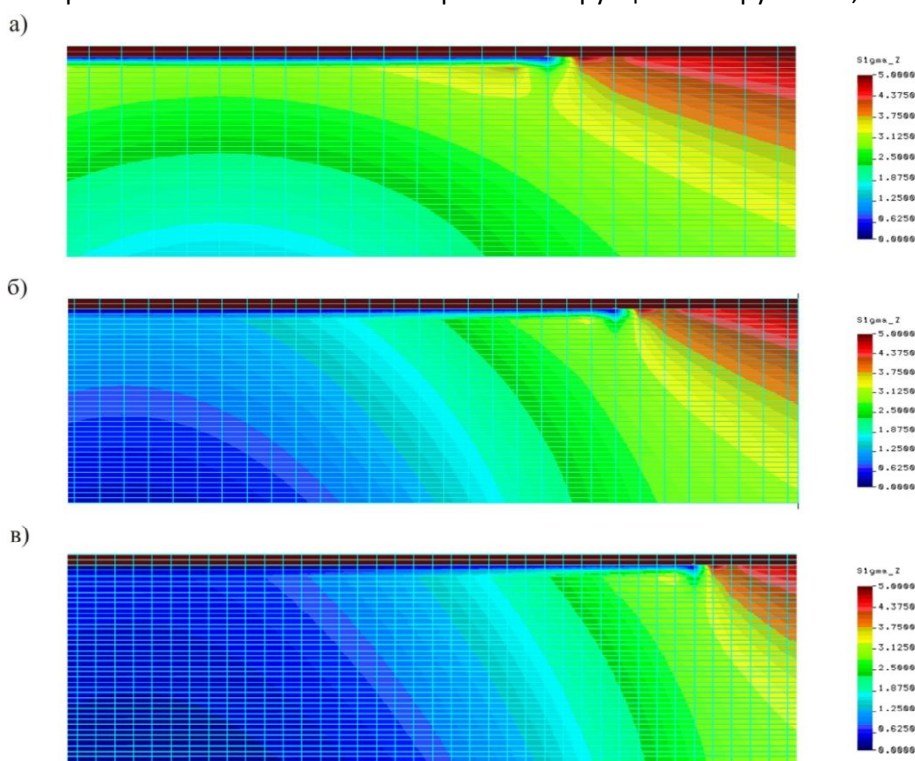


Рис. 3. Распределение кольцевых напряжений в зоне компенсаторного участка при соотношениях длины L к диаметру D : а) 0,5; б) 1,0; в) 1,5.

Анализ полученных результатов показал, что геометрические параметры компенсационного участка существенно влияют на величину области кольцевых растягивающих напряжений в железобетоне, окружающем низко модульную прокладку. Так при соотношении длины L участка с низко модульной прокладкой к диаметру D водовода, равном 0,5, практически на всей внутренней поверхности компенсационного участка действует значительное кольцевое растяжение от 6,75 МПа до 5,0 МПа (на наружной поверхности – от 3,75 МПа до 2,41 МПа), существенно превышающее прочность бетона при растяжении (1 МПа) и требующее повсеместной установки расчетной кольцевой арматуры.

При соотношении длины L участка с низко модульной прокладкой к диаметру D водовода, равном 1,0, кольцевое растяжение на внутренней поверхности в центре пролета «мягкой» прокладки (в зоне минимальных значений напряжений) снижается до 1,51 МПа. В то же время в начале «мягкой» прокладки растяжение остается значительным (6,09 МПа). Соответствующие напряжения на внешней поверхности железобетона составляют 0,27 МПа и 3,74 МПа. Таким образом, на значительной протяженности компенсационного участка требуется расчетное кольцевое армирование.

Картина напряженного состояния существенно изменяется при увеличении соотношения длины L участка с низко модульной прокладкой к диаметру D водовода до 1,5. Кольцевое растяжение в центральном сечении пролета зоны «мягкой» прокладки снижается до нулевых значений на внешней поверхности и до 0,41 МПа – на внутренней поверхности. Тем не менее, в сечении на начальном участке размещения «мягкой» прокладки кольцевые растягивающие напряжения изменяются от 6,35 МПа до 4,04 МПа. В четверти пролета кольцевые растягивающие напряжения изменяются от 1,67 МПа до 0,64 МПа. Таким образом, расчетное кольцевое армирование также требуется на значительной протяженности компенсационного участка.

Соответствующие эпюры кольцевых растягивающих напряжений в железобетонной части компенсационного участка напорного водовода представлены на рис. 4.

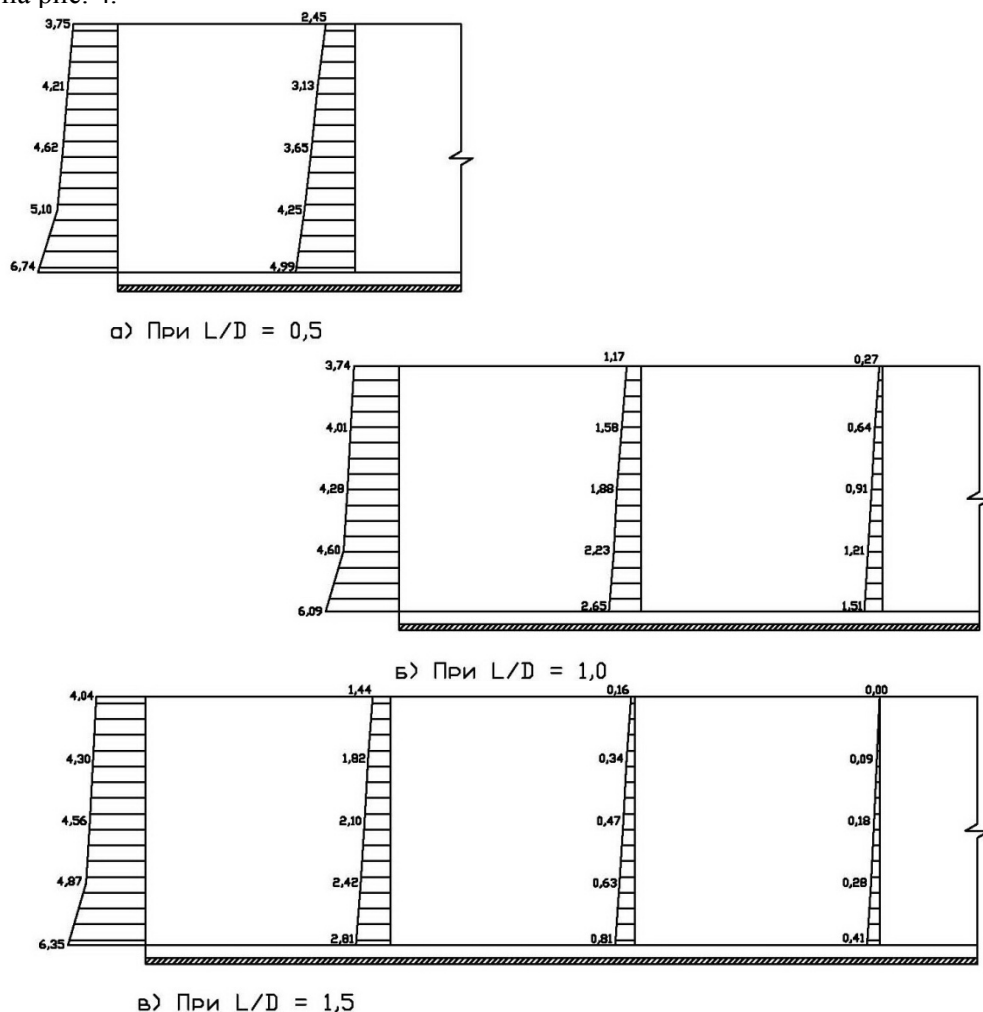


Рис. 4. Эпюры кольцевых растягивающих напряжений (МПа) в поперечных сечениях железобетонной части компенсационных участков напорных водоводов: а) при $L/D=0,5$; б) при $L/D=1,0$; в) при $L/D=1,5$.

Также было исследовано влияние модуля деформации «мягкой» прокладки на напряженное состояние конструкций компенсационного участка.

На основе результатов выполненных расчетных исследований НДС компенсационного участка напорного водовода были определены области действия значительных растягивающих напряжений, требующих расчетного кольцевого армирования при различной протяженности компенсационного участка. Таким образом, определены границы областей расчетного и конструктивного армирования в пределах компенсационного участка напорного водовода. Требуется дальнейшее совершенствование методов расчета компенсационных участков, а также положений нормативных документов и схем армирования компенсационных участков сталежелезобетонных напорных водоводов.

Литература

1. *Volynchikov A.V.* Structural aspects of the Boguchany project on the Angara river, The International Journal of Hydropower & Dams, Issue 3 (No.3), 2007, pp.58-62.

Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2013, № 3

2. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. – М.: ЭНАС, 2008. - 352 с.
3. Лисичкин С.Е., Козинец Г.Л., Ивонтьев А.В., Пономарев Д.И., Богаченко С.В., Лисичкин А.С. Расчетные исследования напорных водоводов и спиральных камер высоконапорных ГЭС// Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, т.264, СПб, 2011. - С. 110-118.
4. Лисичкин С.Е., Пономарев Д.И., Мукашов Р.З., Богаченко С.В., Лисичкин А.С. Обоснование проектных решений сталежелезобетонных напорных водоводов ГЭС и ГАЭС на основе конечноэлементных моделей// Материалы Межд. научно-практ. конф. «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения». Ч. III. «Безопасность гидротехнических сооружений».- М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2011.-С. 147-154.
5. Kosterin N.V. and Vasiliyev A.V. The multipurpose Bureya dam project in Russia// The International Journal of Hydropower & Dams, Issue 3 (No.3), 2007, pp.54-57.
6. Hachem F.E. and Schleiss A.J. The design of steel-lined pressure tunnels and shafts// The International Journal of Hydropower & Dams, Issue 3 (No.3), 2009, pp.142-151.
7. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Nikolaev B.A., Lyapin O.B. Calculated estimate of the strength of large-diameter high-pressure conduits at The Three Gorges hydro development// Hydrotechnical Construction Consultants bureau. - Vol. 33, No.4, New York, October, 1999, pp. 241-247.
8. Osadchuk V.A. and Landau Y.A. The Tashlyk pumped-storage plant: a key element in the Ukrainian power system// The International Journal of Hydropower & Dams, Issue 3 (No.3), 2007, pp.108-111.

References

1. Volynchikov, A.V. (2007). Structural aspects of the Boguchany project on the Angara river, *Hydropower & Dams*, Issue Three (No.3), 2007, pp.58-62.
2. Sinyugin, V.Yu., Magruk, V.I., Rodionov, V.G. (2008). *Gidroakkumuliruyushhie'lektrostantsii v sovremennoye'lektroe'nergetike*, М.: ЭНАС, , 352 s.
3. Lisichkin, S.E., Kozinec, G.L., Ivont'ev, A.V., Ponomarev, D.I., Bogachenko, S.V., Lisichkin, A.S. (2011). Raschetnye issledovaniya napornyh vodovodov i spiral'nykh kamer vysokonapornyh GJeS, *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva*, vol.264, SPb., pp. 110-118.
4. Lisichkin, S.E., Ponomarev, D.I., Mukashov, R.Z., Bogachenko, S.V., Lisichkin, A.S. (2011). Obosnovaniye proektnykh resheniy stalezhelezobetonnykh napornykh vodovodov GE'S i GAE'S na osnove konechno-yelementnykh modelej, *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy razvitiya melioratsii i vodnogo khozyajstva i puti ix resheniya»*, part. III, «Bezopasnost' gidrotexnicheskix sooruzhenij», М.: ФГБОУ ВПО МГУП, pp. 147-154.
5. Kosterin, N.V. and Vasiliyev, A.V. (2007). The multipurpose Bureya dam project in Russia, *Hydropower & Dams*, Issue Three (No.3), pp.54-57.
6. Hachem F.E. and Schleiss, A.J. (2009). The design of steel-lined pressure tunnels and shafts, *Hydropower & Dams*, Issue Three (No.3), pp.142-151.
7. Rubin, O.D., Lisichkin, S.E., Nikolaev, B.A., Lyapin, O.B. (1999). Calculated estimate of the strength of large-diameter high-pressure conduits at The Three Gorges hydro development, *Hydrotechnical Construction Consultants bureau*. Vol. 33, No.4, New York, October, 1999, pp. 241-247.
8. Osadchuk, V.A. and Landau, Y.A. (2007). The Tashlyk pumped-storage plant: a key element in the Ukrainian power system, *Hydropower & Dams*, Issue Three (No.3), pp.108-111.

ANALYSIS RESEARCHES OF COMPENSATION PARTS OF STEEL-AND-REINFORCED CONCRETE PRESSURE HEAD CONDUITS, ARRANGED WITH APPLICATION OF THE LOW-MODULAR LAYING

Lisichkin A.S.

JSC IITs SKTE, Moscow

Iron-reinforced concrete pressure head turbine conduits traditional now have the so-called compensation sites arranged in places of transition from a body of a concrete dam in the building of hydroelectric power station with application of low-modular ("soft") laying, completely separating an internal steel cover from surrounding reinforced concrete. Results of settlement researches (on the basis of finite elements models) of stress-strain state of compensation sites of pressure head conduits are presented at various variable parameters for the purpose of justification of need of installation of settlement working reinforcing instead of constructive reinforcing.

KEYWORDS: Iron-reinforced concrete pressure head conduits; compensation sites; low-modular ("soft") laying; stress-strain state; ring stretching tension; finite elements models; settlement working and constructive reinforcing.