

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАГРЕГАТНЫХ БЛОКОВ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГЭС

Г.Л. Козинец

ОАО «Ленгидропроект»
197227 Санкт-Петербург, пр. Испытателей, д. 22
Тел.: (812) 395-29-01, факс: (812) 394-44-26, e-mail: galina4410@yandex.ru

Заключение совета рецензентов: 10.07.15 Заключение совета экспертов: 13.07.15 Принято к публикации: 16.07.15

В статье представлена история проблемы обоснования надежности гидроузлов, математического моделирования уникальных гидроэнергетических объектов. Выполнена оценка параметров стальной оболочки и арматуры турбинных водоводов высоконапорных ГЭС по нормативным документам. Представлена методика многослойного пространственного моделирования водопроводящих трактов и определены ее преимущества.

Ключевые слова: гидроагрегатный блок, математическая модель, конечно-элементный анализ, турбинный водовод, многослойная модель, водопроводящий тракт, стальная оболочка, арматура, бетон.



SUBSTANTIATION OF PROJECT PARAMETERS OF HYDRAULIC UNITS OF HIGH-HEAD TURBINES

G.L. Kozinets

"Lenhydroproject" LLC
22 Ispytateley Ave., St.-Petersburg, 197227, Russia
Tel.: (812) 395-29-01, fax: (812) 394-44-26, e-mail: galina4410@yandex.ru

Referred: 10.07.15 Expertise: 13.07.15 Accepted: 16.07.15

This paper presents a history of substantiation of hydraulic units reliability, mathematical simulation of unique hydro-power objects. Based on legal regulations, the authors performed parameters evaluation of a steel case and armature of penstocks of high-head turbines. A method of multi-layer spatial simulation of water pathways is presented in the paper, its advantages are determined.

Keywords: hydraulic unit, mathematical model, finite-element analysis, penstock, multi-layer model, water pathway, steel case, armature, concrete.



Галина Леонидовна
Козинец
Galina L. Kozinets

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство» СПбСТУ, начальник отдела расчетных обоснований ОАО «Ленгидропроект».

Образование: Ленинградский политехнический институт (1986).

Область научных интересов: разработка методов и математических моделей гидроагрегатных блоков ГЭС для рационального проектирования.

Публикации: 25, 3 патента РФ.

Information about the author: Ph.D., Assistant Professor at the chair "Hydroeconomics and Hydraulic Construction" at SPbSTU, Head of Calculation Substantiations Department at "Lenhydroproject" LLC.

Education: Leningrad Polytechnical Institute (1986).

Research area: development of methods and mathematical models of hydraulic units for rational design.

Publications: 25, including 2 patents of RF.

Введение

Современное развитие крупной гидроэнергетики в мире ориентируется, как правило, на высоконапорные ГЭС с высокой единичной мощностью гидротурбинного оборудования. Уникальные параметры элементов высоконапорных водопроводящих трактов позволяют обеспечить высокие технико-экономические характеристики гидроузла и производства электроэнергии. Одной из важнейших проблем при проектировании таких объектов является обеспечение прочности и безопасной эксплуатации элементов водопроводящего тракта, оборудования, гидроагрегатного блока и сооружения в целом. Аварийные ситуации на гидроузлах всегда сопряжены с огромными материальными, экологическими и социальными ущербами, поэтому разработка принципиально новых проектных и технических решений по обоснованию параметров гидроагрегатных блоков на основе современных компьютерных методов пространственного математического моделирования элементов и сооружений и их внедрение в практику проектирования представляет собой крайне важную и актуальную проблему. В этой связи компанией «РусГидро» в апреле 2010 г. принята «Программа безопасной эксплуатации гидроэнергетических объектов», которая получила приоритетное развитие на ближайшее десятилетие. Особое внимание в этой программе уделяется высоконапорным гидроэлектростанциям с напором выше 100 м, таким как Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного, Чиркейская ГЭС, Ирганайская ГЭС, Зарамагская ГЭС, Бурейская ГЭС, Зейская ГЭС, аварии на которых могут приводить к особенно тяжелым последствиям.

В настоящее время проектирование высоконапорных гидроагрегатных блоков и их водопроводящих трактов регламентируется нормативно-методическими документами, разработанными, в основном, в 70-80-х годах XX-го века. При этом действующая нормативная база, обеспечивая в целом достаточно высокий технический уровень проектных решений, но основанный на раздельном моделировании элементов, конструкций и процессов в гидроагрегатном блоке, не соответствует современным требованиям проектирования и расчетных обоснований высоконапорных гидроэнергетических объектов. Подобный фрагментарный подход не учитывает в полной мере влияния на водопроводящий тракт гидродинамических нагрузок от движущегося потока воды и работающего оборудования, не позволяет проводить комплексное расчетное обоснование элементов и конструкций в трехмерной постановке, затрудняет оценку остаточного ресурса прочности конструкций эксплуатируемого объекта при отклонениях от проектных решений. Современные компьютерные технологии и программные комплексы позволяют решать многовариантные задачи на основе пространственного математического моделирования элементов, конструкций, процессов водопроводящего тракта с

учетом широкого спектра факторов, ранее не рассматриваемых, либо учитываемых упрощенно.

В настоящее время пока не сложилось единого нормативного и методологического подхода к проектированию гидроэнергетических объектов, особенно высоконапорных, на основе пространственного численного моделирования, позволяющего оценить работоспособность гидроагрегатных блоков при экстремальных воздействиях.

Перечисленные проблемы являются существенными препятствиями на пути повышения безопасности гидроэлектростанций в целом и обеспечении выдачи гарантированной мощности потребителю.

Следует отметить, что основанная А.А. Морозовым в Ленинградском Политехническом институте кафедра «Использование водной энергии» положила начало формированию научной базы для исследований гидроагрегатных блоков. Начиная с 1964 года, под руководством Ю.С. Васильева успешно решались задачи по определению параметров объектов гидроэнергетики на ЭВМ ЕС1022. Тем самым была создана основа для математического моделирования уникальных гидроэнергетических объектов с использованием компьютерной техники. В этой связи следует отметить труды Н.В. Арефьева, Ю.С. Васильева, В.И. Виссарионова, Л.И. Кубышкина, А.А. Морозова, М.П. Федорова, Д.С. Щавелева, Б.А. Соколова [1-6].

Вместе с тем, использование современных программных комплексов делает возможным исследование объектов без создания их макета, путем решения задачи для математической конечно-элементной модели, адекватной реальному сооружению, что позволяет уменьшить период проектирования, материальные расходы и оптимизировать проектные параметры конструкции в соответствии с критериями прочности [7, 8].

Оценка параметров турбинных водоводов по нормативным документам

Российские нормативные документы не регламентируют детальное моделирование водопроводящих трактов высоконапорных ГЭС, работающих в условиях нелинейного поведения бетона, расчет сталежелезобетонного элемента сводится к определению суммарного нормального усилия в данном элементе из условия разделения усилия между стальной оболочкой и арматурой: $N_{\Sigma} = N_{\text{ст}} + N_{\text{а}}$, где N_{Σ} , $N_{\text{ст}}$, $N_{\text{а}}$ – суммарное усилие, усилие в стальной оболочке, усилие в арматуре соответственно.

Суммарное усилие в элементе определяется по котельной формуле:

$$N_{\Sigma} = q r, \quad (1)$$

где q – давление воды внутри трубы, r – радиус трубы.

Котельную формулу для нормальных напряжений растяжения при наступлении предельного состояния в оболочке можно представить в виде

$$\sigma = qr/\delta, \quad (2)$$

где σ – суммарные нормальные напряжения растяжения; δ – суммарная толщина стальной оболочки и арматуры.

Площадь расчетной кольцевой арматуры сталежелезобетонных водоводов вычисляется по формуле

$$A_s \geq \frac{N_{\Sigma} \gamma_{lc} \gamma_n - \gamma_c \gamma_s A_{st} R_{st}}{\gamma_c \gamma_s R_s}, \quad (3)$$

где R_{st} , R_s – расчетные сопротивления стали оболочки и арматуры соответственно; γ_{lc} , γ_n , γ_c , γ_s – коэффициенты сочетаний нагрузок, условий работы, надежности по назначению для класса сооружения, условий работы арматуры соответственно; A_s , A_{st} – расчетное сечение арматуры и стальной оболочки соответственно; N_{Σ} – суммарное усилие в элементе.

Расчет арматуры выполняется из условия достижения в стальной оболочке предельного состояния по пределу текучести. Такой расчет целесообразен на начальной стадии проектирования и только для водоводов.

По нормам РусГидро, в модель включается бетонная оболочка, и площадь расчетной кольцевой арматуры сталежелезобетонных водоводов вычисляется по формуле

$$A_s \geq \frac{N_{\Sigma} \gamma_{lc} \gamma_n}{\gamma_c \gamma_s R_s}. \quad (4)$$

При этом чтобы получить напряжения в стальной оболочке, рекомендуется снизить начальный модуль упругости бетона в радиальном направлении, то есть наделить бетон водовода ортотропными свойствами, в предположении продольных (вдоль оси водовода) трещин. Напряжения в бетоне при таком моделировании снижаются, и по уровню пониженных напряжений выполняется расчет усилий в арматуре:

$$N_a = \frac{|\sigma_{\text{низ}} + \sigma_{\text{верх}}|}{2} h, \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{низ}}$ и $\sigma_{\text{верх}}$ – напряжения низа и верха сечения бетонной оболочки; h – толщина бетонной оболочки.

Предлагаемая нормами РусГидро схема моделирования является приближенной, так как снижение модуля упругости бетона на фиксированную величину достаточно условно. Кроме того, такая схема применима лишь для турбинных водоводов, а пространственные блоки спиральных камер не входят в условия данной схематизации и остаются не охваченными. В этой связи предложен принципиально новый подход к построению модели. Суть метода заключается в подробном многослойном моделиро-

вании всех несущих элементов водопроводящих трактов. Этот способ позволяет еще на этапе проектирования получить оптимальные толщины стальной оболочки и площади арматуры из условия их совместной работы.

Постановка задачи пространственного многослойного моделирования

Пространственная численная модель водопроводящего тракта строится из условия физических особенностей материалов при включении в модель многослойных элементов оболочки с различными геометрическими и физическими параметрами на каждом слое. При этом численное моделирование основано на совместной работе всех составляющих элементов водопроводящего тракта с привлечением аппарата общей трехмерной теории напряжений и деформаций.

С математической точки зрения, расчет сооружения выполняется при решении краевых задач для системы разрешающих уравнений, включающих

– уравнения равновесия:

$$[\Phi]^T \{\sigma\} = \{G_v\}, \quad (6)$$

– геометрические уравнения (Коши):

$$\{\epsilon\} = [\Phi] \{u\}, \quad (7)$$

– определяющие (физические) уравнения – закон Гука:

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\}, \quad (8)$$

где $[\Phi]$ – матрица дифференциальных операторов; $\{G_v\} = \{X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z)\}$ – вектор-функция объемных сил; $[D]$ – матрица механических характеристик материала размером 6×6 . Разрешающие уравнения относительно неизвестных перемещений:

$$[\Phi]^T [D] [\Phi] \{u\} = \{G_v\}. \quad (9)$$

Уравнения дополнены граничными условиями – кинематическими и статическими.

В основу конечно-элементной модели сталежелезобетона принят неоднородный конечный элемент оболочки, жесткость которого $[K]$ определена в виде суммы жесткостей стали $[K_{ст}]$, арматуры $[K_a]$ и бетона $[K_б]$:

$$[K] = [K_{ст}] + [K_a] + [K_б]. \quad (10)$$

Уравнения равновесия узлов системы в предположении физической линейности задачи, когда свойства материалов не зависят от достигнутого уровня напряжений и деформаций, имеют вид

$$[K] \{U\} = \{F\}. \quad (11)$$

Учет физической нелинейности трещиноватого бетона, расположенного между стальной оболочкой и слоями арматуры, реализован с помощью задания диаграммы деформирования бетона с применением шагово-итерационного метода Ньютона – Рафсона.

Метод описывается итерационными вычислениями уравнения

$$[K_i]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^r\}, \quad (12)$$

где $[K_i]$ – матрица жесткости системы элементов; $\{\Delta u_i\}$ – вектор приращений перемещений узлов; $\{F^a\}$ – вектор узловых сил; $\{F_i^r\}$ – вектор невязки узловых сил, соответствующий вектору перемещений узлов конструкции $\{u_i\}$; индекс i – номер итерации.

Последовательность вычислений следующая:

1) в течение каждого шага нагружения и итерации вычисляется матрица жесткости $[K_i]$ и вектор невязки узловых сил $\{F_i^r\}$, соответствующие вектору перемещений $\{u_i\}$ (для начальной итерации $\{u_i\} = \{0\}$; $\{F_i^r\} = \{0\}$);

2) вычисляется вектор приращений перемещений узлов $\{\Delta u_i\}$;

3) определяется вектор перемещений $\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\}$;

4) повторяются предыдущие шаги итерации до сходимости (12);

5) Условием сходимости является или $\|F\| - \|F_i^r\| < v_F$ или $\|\Delta u_i\| < v_u$, где v – погрешность вычислений при каждом приращении нагрузок.

Последовательность пространственного моделирования водопроводящих трактов можно представить в следующем виде:

1) Массивный бетон пространственной модели гидроагрегатного блока разбивается на объемные конечные элементы. Элементы бетона задаются со свойствами нелинейности.

2) Сталежелезобетонный водопроводящий тракт моделируется плоскими многослойными элементами оболочки с приведенными слоями, эквивалентными начальным диаметрам кольцевой и торовой арматуры и с внутренним слоем стальной оболочки начальной толщины.

3) В процессе решения задачи начальные толщины всех слоев модели меняются до получения оптимальных параметров, основанных на условии равнотенности стальной оболочки и внутреннего слоя арматуры при выполнении принципов предельных состояний.

Алгоритм пространственного моделирования справедлив как для турбинных водоводов, так и для блоков спиральных камер.

Сегмент турбинного водовода изображен на рис. 1.

При послойном моделировании учтены все составляющие водовода:

1. Стальная оболочка толщиной $\delta_{ст}$, радиусом трубы r .

2. Защитный слой бетона с ортотропными свойствами ($E_{r1} < E_{01} < E_{нач.}$).

3. Приведенный слой внутренней кольцевой арматуры.

4. Приведенный слой внутренней торовой арматуры.

5. Внутренний слой бетона с ортотропными свойствами ($E_{r2} < E_{02} < E_{нач.}$).

6. Приведенный слой наружной кольцевой арматуры (при ее наличии).

7. Приведенный слой наружной торовой арматуры (при ее наличии).

8. Защитный слой бетона с ортотропными свойствами ($E_{r3} < E_{03} < E_{нач.}$).

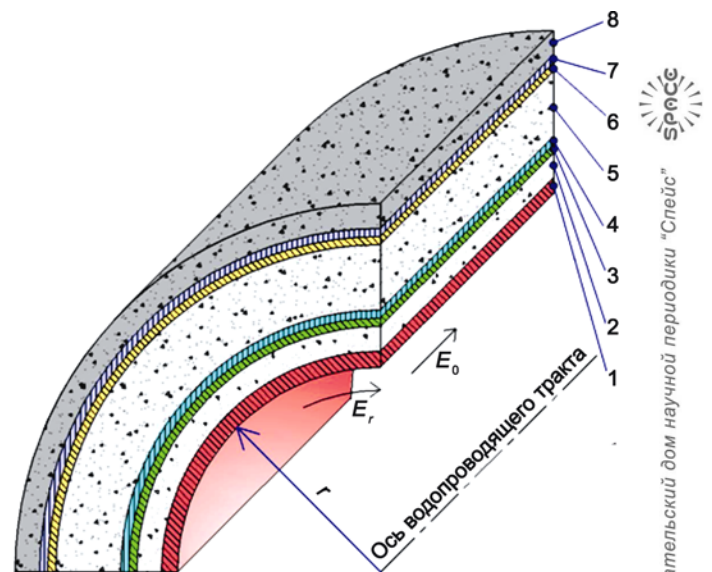


Рис. 1. Сегмент турбинного водовода
Fig. 1. Penstock segment

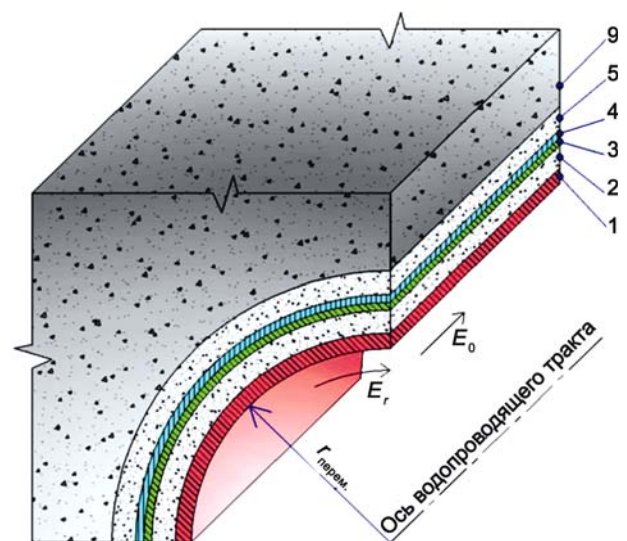


Рис. 2. Сегмент водопроводящего тракта в массивном бетоне
Fig. 2. Water channel segment in massive concrete

Модель водопроводящего тракта, расположенного в массивном бетоне (сегмента спиральной камеры или турбинного водовода в бетонном массиве-бычке), представлена на рис. 2. При послойном моделировании учтены все составляющие водопроводящего тракта, переходящие в спиральную камеру с п.1 по п.5 и добавлен п.9 – бетон блока спиральной камеры без трещин.

Выводы

Основные преимущества метода многослойного моделирования:

1. Новый способ моделирования водопроводящих трактов предполагает решение задачи в пространственной постановке для обоснования надежности любых ГЭС.

2. Численное моделирование основано на совместной работе всех составляющих элементов водопроводящего тракта.

3. На основании полученных значений расчетных напряжений в стальной оболочке и арматуре осуществляется рациональный подбор толщин оболочки и арматуры на этапе проектирования гидроагрегатного блока.

Список литературы

1. Арефьев Н.В., Соколов Б.А. Расчет гидравлического удара явным методом конечных разностей // Труды ЛПИ. 1978. Вып. 361. С. 30-32.
2. Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И. Решение гидроэнергетических задач на ЭВМ (Элементы САПР и АСНИ). М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И. Компьютерные технологии проектирования гидроэнергетических объектов // Энергетика, гидротехника. Сб. научных трудов. Труды СПбГТУ № 475. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 30-42.
4. Васильев Ю.С. Основы и методы расчетов оптимальных параметров водопроводящих сооружений ГЭС / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1973.
5. Экономика гидротехнического и водохозяйственного строительства / Под ред. Щавелева Д.С. М.: Стройиздат, 1986.
6. Морозов А.А. Использование водной энергии. Л.-М., 1948.
7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996.
8. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. О построении более совершенной модели деформирования железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии. II Всероссийская (Международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития». 5-9 сентября, 2005, М. С. 431-444.

References

1. Aref'ev N.V., Sokolov B.A. Rasčet hidravličeskogo udara âvnyim metodom konečnyh raznostej // Trudy LPI. 1978. Vyp. 361. S. 30-32.
2. Vasil'ev Ŭ.S., Vissarionov V.I., Kubyškin L.I. Rešenje gidroènergetičeskikh zadač na ÈVM (Èlementy SAPR i ASNI). M.: Ènergoatomizdat, 1987.
3. Vasil'ev Ŭ.S., Kubyškin L.I. Komp'ûternye tehnologii proektirovaniâ gidroènergetičeskikh ob'ektov // Ènergetika, gidrotehnika. Sb. naučnyh trudov. Trudy SPbGTU № 475. SPb.: Izd-vo SPbGTU, 1998. S. 30-42.
4. Vasil'ev Ŭ.S. Osnovy i metody rasčetrov optimal'nyh parametrov vodoprovodâših sooruzenij GÈS / Avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. L., 1973.
5. Èkonomika gidrotehničeskogo i vodohozâjstvennogo stroitel'stva / Pod red. Šaveleva D.S. M.: Strojizdat, 1986.
6. Morozov A.A. Ispol'zovanie vodnoj ènergii. L.-M., 1948.
7. Karpenko N.I. Obšie modeli mehaniki železobetona. M.: Strojizdat, 1996.
8. Karpenko N.I., Karpenko S.N. O postroenii bolee soveršennoj modeli deformirovanii železobetona s trešinami pri ploskom naprâžennom sostoâanii. II Vserossijskaâ (Meždunarodnaâ) konferenciâ po betonu i železobetonu «Beton i železobeton – puti razvitiâ». 5-9 sentâbrâ, 2005, M. S. 431-444.

Транслитерация по ISO 9:1995

