

Обоснование надежности гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС

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

Ключевые слова: гидроагрегатный блок; пространственная математическая модель; конечно-элементный анализ; многослойная модель; стальная оболочка; рабочая арматура; надежность

История вопроса

На протяжении всего развития гидроэнергетики особое место отводилось формированию теоретической базы и методов обоснования параметров и режимов работы гидроагрегатных блоков. В этой связи следует отметить труды Н.В. Арефьева, В.Г. Айвазьяна, В.В. Болотова, Ю.С. Васильева, В.И. Виссарионова, А.А. Морозова, М.П. Федорова, Д.С. Щавелева и других гидроэлектроэнгинееров [1]-[8]. На кафедре Использования водной энергии под руководством Ю.С. Васильева в Политехническом институте еще с конца 70-х годов прошлого века успешно решались задачи по обоснованию параметров объектов гидроэнергетики на ЭВМ ЕС1022. Именно тогда была заложена основа математического моделирования уникальных гидроэнергетических объектов с использованием компьютерной техники.

В России в настоящее время для расчета высоконапорных гидроагрегатных блоков используется ряд документов. В 1984 г. принято «Пособие по проектированию сталежелезобетонных конструкций гидротехнических сооружений» П-780-83/Гидропроект, в котором приводится методика расчета высоконапорных водоводов и спиральных камер, примеры расчета, принципиальные схемы армирования. В 1988 г. введены в действие СНиП 2.06.08-87 и «Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (без предварительного напряжения)» П-46-89/ВНИИГ, разработан стандарт РАО «ЕЭС России» (СТО РАО «ЕЭС России» 1733282.27.14.02-2008).

Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования

По действующим нормам проектирования математическое моделирование гидроагрегатных блоков осуществляется в плоской постановке для осесимметричной задачи. Этот способ моделирования получил распространение в конце 70-х годов прошлого столетия, когда в практику расчетов вошел метод конечных элементов, реализованный в программных продуктах для ЭВМ. До сих пор этот способ моделирования в России является определяющим, хотя он уже давно отстал от возможностей современных универсальных программных комплексов конечно-элементного анализа.

Вместе с тем использование конечно-элементного анализа делает возможным исследование объектов без создания их макета, путем построения и решения задачи для математической модели, адекватной реальному сооружению. Это позволяет уменьшить период проектирования, материальные расходы и оптимизировать геометрические параметры конструкции в соответствии с основными критериями прочности [9]. Сегодня в России, так же как в Европе и Америке, есть все возможности для выполнения уникальных пространственных расчетных моделей [10]-[22]. Эти возможности реализуются в ведущих проектных организациях, таких как Мосгидропроект, ВНИИГ, канадская фирма Лавалин, где численный анализ выполняется на основе объемной параметрической геометрической модели, и на основе общего напряженного состояния модели подбираются площади расчетного армирования. Такой подход дает картину трещинообразования, но при этом не моделируется стальная оболочка и арматура водопроводящего тракта. Следует заметить, что российские нормативные документы не регламентируют детальное моделирование водопроводящих трактов высоконапорных ГЭС, работающих в условиях нелинейного поведения материала. Согласно российским нормам, расчет сталежелезобетонного элемента сводится к определению суммарного нормального усилия в данном элементе из условия разделения усилия между стальной оболочкой и арматурой:

$N_{\Sigma} = N_{cm} + N_a$, N_{Σ}, N_{cm}, N_a – суммарное усилие, усилие в стальной оболочке, усилие в арматуре соответственно.

Суммарное усилие в элементе определяется по котельной формуле:

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

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

Котельную формулу для нормальных напряжений растяжения, испытывающих давление изнутри при наступлении предельного состояния в оболочке, можно представить в виде:

$$\sigma = q \cdot r / \delta, \quad (2)$$

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

Площадь расчетной кольцевой арматуры сталежелезобетонных водоводов вычисляется по формуле:

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

где R_{si} , 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_{si} – 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 целесообразно выполнять на начальной стадии проектирования и только для водоводов.

В нормах компании РусГидро предпринята попытка учета бетонной оболочки при моделировании турбинных водоводов. При этом, чтобы получить напряжения в стальной оболочке, рекомендуется снизить начальный модуль упругости бетона (E_0) в продольном направлении по сравнению с модулем упругости бетона в радиальном направлении (E_r) в 7-8 раз. Таким образом, бетон водовода наделяется ортотропными свойствами. В этом случае условно моделируется наличие продольных (вдоль оси водовода) трещин. Напряжения в бетоне при таком моделировании снижаются, и по уровню пониженных напряжений выполняется расчет усилий в арматуре:

$$N_a = \frac{|\sigma_{\text{низ}} + \sigma_{\text{верх}}|}{2} \cdot h, \quad (4)$$

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 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.

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

$$A_s \geq \frac{N_{\Sigma} \cdot \gamma_{lc} \cdot \gamma_n}{\gamma_c \cdot \gamma_s \cdot R_s}. \quad (5)$$

При задании ортотропных свойств бетона напряжения в стальной оболочке вычисляются самостоятельно, площадь арматуры напрямую зависит от того, во сколько раз уменьшен модуль упругости бетона. Подобное моделирование выполняется на следующей стадии проектирования и применимо только для водоводов.

В ОАО «Ленгидропроект» реализован принципиально новый подход к построению модели. Суть этого метода заключается в подробном многослойном моделировании всех несущих элементов водопроводящих трактов. Этот способ позволяет еще на этапе проектирования получить расчетные толщины стальной оболочки и площади арматуры из условия одновременного достижения в оболочке и рабочей арматуре предельных состояний стали.

Постановка задачи пространственного моделирования объекта – гидроагрегатного блока

Построение пространственной численной математической модели на основе предварительного изучения объекта исследования (гидроагрегатного блока), уточнение его физических характеристик, расчетный анализ модели, сопоставление результатов расчетов напряжений и деформаций с данными натурных наблюдений объекта, корректировка параметров модели – все это составляет содержание метода пространственного моделирования.

Следует заметить, что математическая расчетная модель – это уменьшенная копия реального объекта, имеющая численную аппроксимацию в виде конечного числа элементов, обладающих реальными физическими свойствами и граничными условиями.

Точная математическая модель полностью замещает объект в ходе исследования. Сущность метода моделирования основывается на принципе аналогии (верификации) или возможности изучения реального объекта не непосредственно, а через рассмотрение подобной ему модели.

Математическое пространственное моделирование позволяет исследовать объект с различных позиций, отображая при этом все несущие элементы гидроагрегатного блока.

Выделим важнейшие из этих позиций:

- целостность объекта как физической системы, т.е. наличие у системы всех физических свойств, присущих каждому из составляющих элементов гидроагрегатного блока;
- задание в модели статических и кинематических граничных условий, которые обеспечивают соответствие модели реальному объекту;
- постоянный контроль реального объекта при учете влияния новых факторов эксплуатации и природных воздействий;
- калибровка или коррекция модели на появляющиеся новые факторы.

Выделенные позиции усложняют процесс моделирования, однако их учет необходим для решения практических задач по определению количественной и качественной оценки прочности и надежности объекта.

Особенностью пространственного численного моделирования является одновременный учет ряда факторов, влияющих на напряженно-деформируемое состояние объекта.

Адекватность модели – условное понятие, так как полного соответствия модели реальному объекту быть не может, что особенно характерно для уникальных гидротехнических объектов. При моделировании имеется в виду не просто копия, а соответствие натурным показателям, которые считаются существенными для исследования. Без такой проверки получение результатов моделирования неэффективно.

Всесторонний анализ выявляемых расхождений между физическим объектом и моделью, сопоставление результатов по модели с результатами натурных наблюдений помогают выработать пути коррекции моделей.

Рассмотрим общую схему процесса моделирования (см. рис.1), состоящую из четырех следующих этапов.

1. Сбор исходных данных об объекте – физической системе. Любая модель замещает оригинал в строго ограниченном смысле. Из этого следует, что для одного объекта может быть построено несколько моделей, характеризующих его с разной степенью детализации (блок параметрических моделей).

2. На втором этапе следует процесс построения численной математической модели, и модель выступает как самостоятельный объект исследования. Конечным результатом этого этапа является определение напряженно-деформированного состояния модели с учетом всех отраженных в данной модели факторов.

3. Третий этап заключается в соответствии модели оригиналу. При этом результат решения задачи прочности должен соответствовать данным натурных наблюдений или быть адекватным с разумной погрешностью.

4. На четвертом этапе осуществляются практическая проверка полученных результатов и их использование для оценки состояния реального объекта и его целенаправленного преобразования. В итоге мы снова возвращаемся к проблематике объекта-оригинала.

Из этого следует, что моделирование представляет собой циклический процесс, т. е. за первым четырехэтапным циклом может последовать второй, третий и т. д. При этом знания об исследуемом объекте постоянно расширяются и уточняются, а первоначально построенная модель калибруется и совершенствуется. Другими словами проводится верификация модели.

Перечисленные этапы математического моделирования находятся в тесной взаимосвязи, и могут иметь место возвратные связи этапов. Так, на этапе построения модели может выясниться, что постановка задачи или противоречива, или приводит к слишком сложной математической модели; в этом случае исходная постановка задачи должна быть скорректирована. Наиболее часто необходимость возврата к предшествующим этапам моделирования возникает на этапе подготовки исходной информации при проектировании объекта.

Гидроагрегатные блоки имеют ограниченный срок службы и подлежат модернизации, поэтому их жизненный цикл разделен на два основных этапа.

На этапе проектирования объекта расчетное обоснование выполняется по действующим нормам проектирования, из условия задания проектных нагрузок и начальных физических характеристик материалов. На этапе эксплуатации необходима адаптация математической расчетной модели к фактическим условиям работы, с учетом периода эксплуатации сооружения, с заданием изменившихся физических характеристик материала и возникающих непроектных нагрузок.

При обосновании прочности сооружений в процессе эксплуатации необходимо учитывать ряд новых факторов, таких как:

- трещинообразование в бетоне;
- непроектное воздействие температур;
- пульсационная и вибрационная нагрузки;
- изменение физических характеристик материала;
- коррозионный износ конструкций;
- непроектные режимы эксплуатации ГЭС;
- корректировка сейсмической нагрузки.

Следует заметить, что физическая система в процессе эксплуатации претерпевает следующие основные модификации:

- 1) природные и аварийные воздействия;
- 2) замену оборудования;
- 3) ремонт и модернизацию;
- 4) пересмотр правил и условий эксплуатации.



Рисунок 1. Основные шаги численного моделирования сооружения

Козинец Г.Л. Обоснование надежности гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС

Построение модели гидроагрегатного блока

Пространственная численная модель гидроагрегатного блока строится из условия физических особенностей материалов в новой схеме построения модели, основанной на включении в модель многослойных элементов с различными параметрами. При этом численное моделирование основано на совместной работе всех составляющих элементов водопроводящего тракта, с привлечением аппарата общей трехмерной теории напряжений и деформаций. Учет физической нелинейности материалов реализован с помощью математического описания диаграмм деформирования бетона и стали, с применением шагово-итерационного метода Ньютона-Рафсона. Алгоритм пространственного моделирования водопроводящих трактов гидроагрегатных блоков можно представить в следующем виде.

1. Бетонное тело разбивается на объемные конечные элементы. Элементы бетона задаются со свойствами нелинейности.
2. Армокаркас моделируется плоскими многослойными элементами с приведенными слоями, эквивалентными кольцевой и торовой арматуры заданной жесткости.
3. Стальная оболочка моделируется плоскими однослойными элементами.
4. Оборудование моделируется распределенными точечными элементами заданной массы.
5. Моделируется зазор (при наличии мягкой прокладки) между стальной оболочкой и бетоном, исследуется НДС оболочки и бетона, результат сопоставляется с натурными данными.
6. Исследуется НДС оболочки и арматуры в условиях образования трещин в бетоне, результат сопоставляется с натурными данными.

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

Модель турбинного водовода изображена на рис. 2.

При послойном моделировании учтены все составляющие водовода:

- стальная оболочка толщиной $\delta_{ст}$, радиусом трубы r ;
- защитный слой бетона с ортотропными свойствами, заданный из условия трещинообразования;
- приведенный слой внутренней кольцевой арматуры;
- приведенный слой внутренней торовой арматуры;
- внутренний слой бетона с ортотропными свойствами, заданный из условия трещинообразования;
- приведенный слой наружной кольцевой арматуры;
- приведенный слой наружной торовой арматуры;
- защитный слой бетона с ортотропными свойствами, заданный из условия трещинообразования.

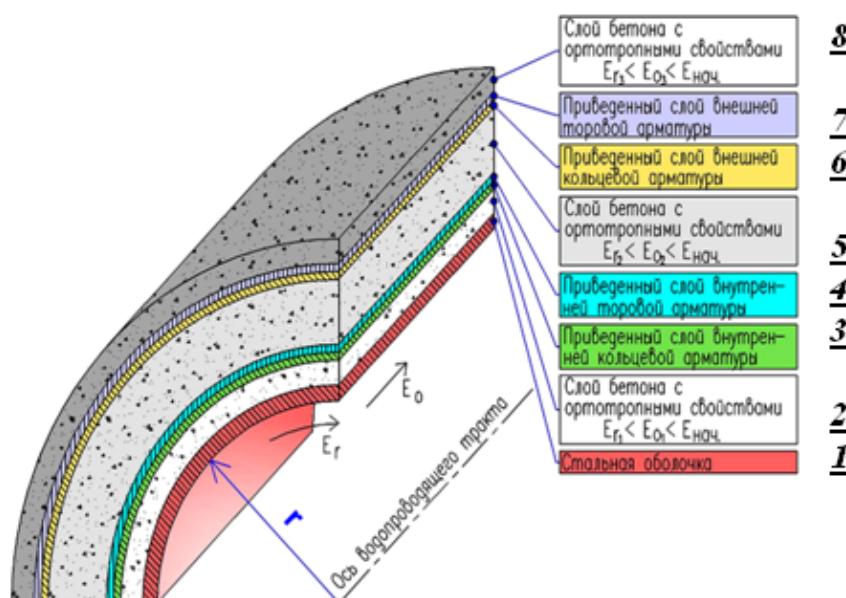


Рисунок 2. Модель турбинного водовода

Козинец Г.Л. Обоснование надежности гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС

Модель сегмента спиральной камеры представлена на рис. 3. При постепенном моделировании учтены все составляющие блока спиральной камеры:

- 1) стальная и оболочка толщиной δ_{ct} , радиусом трубы r ;
- 2) защитный слой бетона с ортотропными свойствами, заданный из условия трещинообразования;
- 3) приведенный слой внутренней кольцевой арматуры;
- 4) приведенный слой внутренней торцовой арматуры;
- 5) защитный слой бетона с ортотропными свойствами, заданный из условия трещинообразования;
- 6) объемный бетон блока спиральной камеры без трещин.

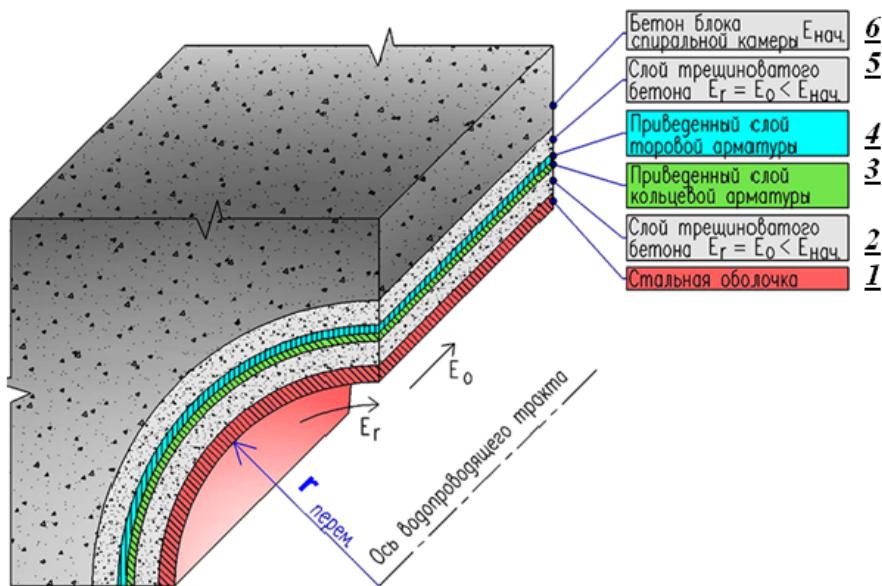


Рисунок 3. Модель сегмента спиральной камеры

Обоснование надежности высоконапорного водопроводящего тракта на примере гидроагрегатного блока Саяно-Шушенской ГЭС

Расчетные исследования представлены на примере гидроагрегатного блока Саяно-Шушенской ГЭС. Построение расчетной математической модели основано на имеющемся проектном материале, действующих нагрузках на сооружение, данных контрольно-измерительной аппаратуры, при учете температурных воздействий.

1. Достигнуто полное геометрическое и физическое соответствие модели реальному сооружению.
2. Конечно-элементная модель гидроагрегатного блока включает стальную оболочку водопроводящего тракта, арматурные слои, гидротурбинное оборудование (см. рис. 4).
3. Статические граничные условия заданы по нижней грани грунтового массива.
4. Бетон агрегатного блока отделен от плотины температурным швом 50 мм.
5. Взаимодействие между плотиной и зданием ГЭС осуществлено через стальную оболочку водовода и общее грунтовое основание.

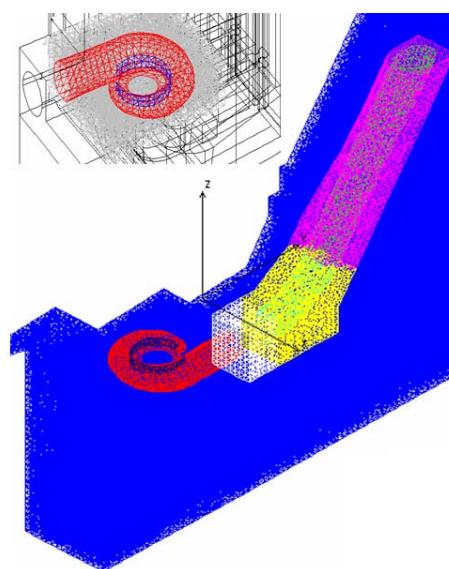


Рисунок 4. Объемная конечно-элементная модель гидроагрегатного блока

Обоснование параметров нижней части турбинного водовода гидроагрегатного блока представлено на рис. 5. Напор при гидроударе задан 298 м.

На базе нового метода моделирования водопроводящего тракта, выполненного на основании проектных и натурных данных, заданы многослойные элементы, соответствующие внешним и внутренним слоям кольцевой арматуры и стальной оболочки. В результате расчета с учетом гидравлического удара получены напряжения в арматуре и стальной оболочке (см. рис. 5). Выполнен анализ прочности конструкции и обоснованы параметры турбинного водовода.

Сравнительный анализ результатов расчета эксплуатируемого объекта – турбинного водовода Саяно-Шушенской ГЭС – показал:

- 1) площадь кольцевой расчетной арматуры по методике многослойного моделирования в 1,6 раза меньше, чем площадь арматуры по инженерному расчету и по нормам расчета компании РусГидро;
- 2) напряженное состояние металла оболочки выше, чем в кольцевой арматуре, в 1,1 раза;
- 3) предельного состояния металла оболочки и металла кольцевой арматуры достигнет одновременно, что указывает на выполнение принципов метода предельных состояний.

		Модель МКЭ		
Инженерный расчет СНиП		Нормы РусГидро, зарубежные стандарты		Пространственное Моделирование
$A_s \geq \frac{N_s \cdot \gamma_e \cdot \gamma_s \cdot A_{st} \cdot R_s}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b}$	$N_s = q \cdot r$	$A_s \geq \frac{N_s \cdot \gamma_e \cdot \gamma_s \cdot R_s}{\gamma_c \cdot \gamma_b \cdot R_b}$	$N_s = \frac{ \sigma_{st} + \sigma_{mp} }{2} \cdot h$	Многослойные элементы
Внутреннее кольцевое армирование, F см²	184,6	409,79	137,33	153,92
σ во внутр. кольцевой арматуре, МПа		$\sigma_s \geq \frac{\gamma_e \cdot \gamma_s \cdot R_s}{\gamma_c \cdot \gamma_b} = 224 \text{ МПа}$		144,4
Внешнее кольцевое армирование, F см²	-	196,71	112,67	113,08
σ во внешн. кольцевой арматуре, МПа	-	224,0		102,9
Стальная оболочка, F см²		250		
σ в стальной оболочке, МПа	266,6	71,98	232,21	157,1

Рисунок 5. Обоснование параметров турбинного водовода СШГЭС

Выходы

1. Предложен новый способ моделирования водопроводящих трактов в составе высоконапорных гидроагрегатных блоков.
2. Способ многослойного моделирования предполагает получение расчетных напряжений всех элементов водопроводящего тракта в трехмерной модели.
3. Многослойное моделирование при рациональном подборе параметров модели необходимо для численной оценки распределения напряжений между стальной оболочкой и арматурой.
4. Одновременное достижение предельного состояния металла оболочки и кольцевой арматуры позволит обеспечить выполнение критериев прочностной надежности водопроводящего тракта и гидроагрегатного блока в целом.

Литература

1. Арефьев Н. В., Соколов Б. А. Расчет гидравлического удара явным методом конечных разностей // Труды ЛПИ. Вып. 361, 1978. С. 30-32.
2. Васильев Ю. С., Кубышкин Л. И. Компьютерные технологии проектирования гидроэнергетических объектов // Энергетика, гидротехника. Сб. научных трудов. Труды СПбГТУ №475. Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 30-42.
3. Васильев Ю. С. Основы и методы расчетов оптимальных параметров водопроводящих сооружений ГЭС // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Л., 1973. 31 с.
4. Гвоздев А. А., Карпенко Н. И. Работа железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // Строительная механика и расчет сооружений. 1965. № 2. С. 20 – 23.
5. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.:Стройиздат, 1996. 416 с.
6. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н. О построении более совершенной модели деформирований железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // II Всероссийская (Международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – пути развития». 5-9 сентября, 2005, Москва. С. 431-444.
7. Балан Т. А., Клованич С. Ф. Определяющие соотношения для бетона при сложном, непропорциональном нагружении и нагреве // Строительная механика и расчет сооружений. 1987. №2. С. 39-44.
8. Клованич С. Ф., Мироненко И. Н. Расчет железобетонных конструкций на основе теории пластичности бетона // Збірник наукових статей «Дороги і мости». Київ: ДерждорНДІ. 2006. Вип. 6. С. 43-54.
9. Козинец Г. Л. Алгоритм расчета сталежелезобетонных водоводов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №6 (24). С. 41-49.
10. Козинец Г. Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой на примере арочной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5(23). С. 43-48.
11. Прокопович И. Е., Зедгенидзе В. А. Прикладная теория ползучести. М.: Стройиздат, 1980. 240 с.
12. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
13. Мурашев В. И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. М.: Машстройиздат, 1958. 268 с.
14. Городецкий А. С., Здоренко В. С. Расчет железобетонных балок-стенок с учетом образования трещин методом конечных элементов // Сопротивление материалов и теория сооружений. Киев: Будивельник, 1975. Вып. 57. С. 59-66.
15. Бидный Г. Р., Клованич С. Ф., Осадченко К. А. Расчет железобетонных конструкций при сложном нагружении методом конечных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 1986. №5. С. 22–26.
16. Кишиневская Е. В., Ватин Н. И., Кузнецов В. Д. Перспективы применения нанобетона в монолитных большепролетных ребристых перекрытиях с постнапряжением // Инженерно-строительный журнал. 2009. №2(4). С. 54-58.
17. 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.
18. Sasowsky K. C., Gardner T. W. Watershed configuration and geographical information systems parameterization for SPUR model for hydrologic simulations // Water Resour. Bull. 1991. №7(1). Pp. 7-18.
19. Ventura S.J., Chrisman N. R., Connors K., Gurda R. F., and Martin R. W. A land information system for soil erosion control planning // J. Soil Water Conserv. 1988. No. 43. Pp. 230-233.
20. 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.
21. Cervenka V. Constitutive Models for Cracked Reinforced Concrete // ACI Journal. 1985. Vol. 82. №6. Pp. 877–882.
22. 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., 2012

doi: 10.5862/MCE.31.4

Reliability validation of hydropower units of high-head developments

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

Key words

hydropower unit; three-dimensional mathematical model; finite-element analysis; multilayer model; steel casing; principal reinforcement; reliability

Abstract

Throughout the development of the hydropower special attention was paid to the formation of a theoretical framework and methods of parameters and operating modes of powerhouses study. Under current design standards mathematical modeling of powerhouse is performed in two-dimensional for the axisymmetric problem. Up to now this method of simulation in Russia is the determining, although it has long lagged behind the capabilities of modern universal software of finite element analysis.

The article presents analysis of the mathematical modeling methods for powerhouses of high-head hydroelectric power plants. Statement of the problem of three-dimensional modeling of the object – powerhouse is given. The procedure for multilayer three-dimensional modeling of water-conveyance conduits is presented. Outlined are the advantages of detailed numerical models of powerhouses in the context of their reliability verification.

References

1. Arefyev N. V., Sokolov B. A. *Trudy LPI* [Proceedings of Leningrad Polytechnical Institute]. 1978. No. 361. Pp. 30-32. (rus)
2. Vasilyev Yu. S., Kubyshkin L. I. *Trudy SPbGTU* [Proceedings of Saint-Petersburg State Technical University]. 1998. No. 475. Pp. 30-42. (rus)
3. Vasilyev Yu. S. *Osnovy i metody raschetov optimalnykh parametrov vodoprovodyashchikh sooruzheniy GES. Avtoreferat* [Calculation methods fundamentals of optimal parameters of hydropower station water passageways. Dissertation abstract]. Leningrad, 1973. 31 p. (rus)
4. Gvozdev A. A., Karpenko N. I. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and analysis of structures]. 1965. No. 2. Pp. 20-23. (rus)
5. Karpenko N. I. *Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, 1996. 416 p. (rus)
6. Karpenko N. I., Karpenko S. N. *II Vserossiyskaya (Mezhdunarodnaya) konferentsiya po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton – puti razvitiya»* [II all-Russian conference on concrete and reinforced concrete "Concrete and reinforced concrete - paths of development"]. Moscow, 2005. Pp. 431-444. (rus)
7. Balan T. A., Klovanich S. F. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and analysis of structures]. 1987. No.2. Pp. 39-44. (rus)
8. Klovanich S. F., Mironenko I. N. *Zbirnik naukovikh statey «Dorogi i mosti»* [Collection of articles "Roads and bridges"]. Kiev, 2006. No. 6. Pp. 43-54. (rus)
9. Kozinets G. L. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 6 (24). Pp. 41-49. (rus)
10. Kozinets G. L. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 5 (23). Pp. 43-48. (rus)
11. Prokopovich I. Ye., Zedgenidze V. A. *Prikladnaya teoriya polzuchesti* [Creep applied theory]. Moscow, 1980. 240 p. (rus)
12. Rabotnov Yu. N. *Polzuchest elementov konstruktsiy* [Creep in structure elements]. Moscow, 1966. 752 p. (rus)
13. Murashev V. I. *Treshchinostoykost, zhestkost i prochnost zhelezobetona* [Fracture strength, rigidity and strength of reinforced concrete]. Moscow, 1958. 268 p.
14. Gorodetskiy A. S., Zdorenko V. S. *Soprotivleniye materialov i teoriya sooruzheniy* [Strength of materials and theory of structures]. 1975. No. 57. Pp. 59-66.

15. Bidnyy G. R., Klovanich S. F., Osadchenko K. A. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and analysis of structures]. 1986. No. 5. Pp. 22–26. (rus)
16. Kishinevskaya Ye. V., Vatin N. I., Kuznetsov V. D. Magazine of Civil Engineering. 2009. No. 2(4). Pp. 54–58.
17. 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.
18. Sasowsky K. C., Gardner T. W. Watershed configuration and geographical information systems parameterization for SPUR model for hydrologic simulations. *Water Resour. Bull.* 1991. No. 7(1). Pp. 7-18.
19. Ventura S.J., Chrisman N. R., Connors K., Gurda R. F., Martin R. W. A land information system for soil erosion control planning. *J. Soil Water Conserv.* 1988. No. 43. Pp. 230-233.
20. Cervenka V. *Inelastic Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Panels Under Inplane Loads*: Ph.D....dis / Dept. Civ. Eng. Univ. Colorado. Bouder, 1970. 20 p.
21. Cervenka V. Constitutive Models for Cracked Reinforced Concrete. *ACI Journal*. 1985. Vol. 82. No. 6. Pp. 877–882.
22. Darwin D., Pecknold D. A. Nonlinear Biaxial Stress-Strain Low for Concrete. *J. Eng. Mech. Div. ASCE*. 1977. Vol. 103. EM2. Pp. 229–241.

Full text of this article in Russian: pp. 30-37