

На правах рукописи

Козинец Галина Леонидовна

**МЕТОДОЛОГИЯ ОБОСНОВАНИЯ
ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ГИДРОАГРЕГАТНЫХ БЛОКОВ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГЭС**

Специальность 05.14.08
Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт – Петербург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, академик РАН
Васильев Юрий Сергеевич

Официальные оппоненты: **Башнин Олег Ильич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник
ООО «Ракурс-инжиниринг», Научно- исследовательский
отдел, главный специалист по гидроэлектростанциям,
(г. Санкт-Петербург)

Муравьев Олег Алексеевич
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
строительный университет»,
каф. «Гидротехнических сооружений», профессор

Тягунов Михаил Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Институт электроэнергетики, каф. «Нетрадиционные и
возобновляемые источники энергии», профессор

Ведущая организация: Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе,
Сибирское отделение Российской академии наук (СО
РАН)
(г. Новосибирск)

Защита состоится «20» октября 2015г. В 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.229.17 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая, ул., д.29, Гидрокорпус -2, ауд.411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и сайте университета <https://www.spbstu.ru/science/defences.html>.

Автореферат разослан « ».....2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Сидоренко Геннадий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

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 100м, таким как Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С.Непорожнего, Чиркейская ГЭС, Ирганайская ГЭС, Зарамагская ГЭС, Бурейская ГЭС, Зейская ГЭС, аварии на которых могут приводить к особенно тяжелым последствиям.

Степень разработанности темы исследования. 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 отдельном 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.

Цель работы.

Развитие теоретических и практических методов обоснования проектных параметров высоконапорных гидроагрегатных блоков ГЭС на основе пространственных численных моделей.

В соответствии с поставленной целью решены следующие **задачи**:

1. Разработана методология численного моделирования гидроагрегатных блоков ГЭС, отражающая реальные условия эксплуатации оборудования и сооружения.

2. Выполнена классификация высоконапорных водопроводящих трактов в составе ГЭС и их основных элементов (напорные турбинные водоводы, спиральные камеры, затворы) по уровню гидродинамических нагрузок.

3. Построены новые пространственные расчетные модели гидроагрегатных блоков с учетом нагрузок от работы оборудования.

4. Разработан алгоритм пространственного моделирования турбинных водоводов и спиральных камер, как многослойных оболочек.

5. Разработан метод расчета металлоконструкций водопроводящих трактов, находящихся длительное время в эксплуатации.

6. Выполнена классификация и определены ранее не учитываемые нагрузки на гидроагрегатный блок для нормальных и экстремальных условий эксплуатации.

7. Проведены численные исследования гидроагрегатного блока, обоснованы его проектные и прочностные параметры, определены условия безаварийной работы оборудования и сооружения (на примере Саяно-Шушенской ГЭС).

Методология и методы исследования.

Методология исследования гидроагрегатных блоков состоит в разделении их на составляющие подсистемы, их изучении и последующем совместном анализе. Используются численные методы математического моделирования. Исследования выполнены с помощью универсального программного комплекса *Solid WORKS Simulation*, реализующего метод конечных элементов (МКЭ).

Научная новизна:

- предложена новая методология пространственного численного моделирования гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС с учетом работы гидроэнергетического оборудования;

- разработана новая методика расчета высоконапорных водопроводящих трактов ГЭС, как многослойных сталежелезобетонных оболочек, позволяющая оптимизировать их проектные параметры;

- предложены новые критерии прочности для оценки периода эксплуатации стальных конструкций водопроводящих трактов ГЭС;
- определены ранее не учитываемые нагрузки на гидроагрегатный блок при нормальных и нештатных режимах работы оборудования;
- построены новые расчетные численные пространственные модели гидроагрегатных блоков и их водопроводящих трактов, обосновывающие параметры проектируемых и реконструируемых ГЭС.

Достоверность проведенных исследований обеспечивается:

- результатами сопоставления расчетных значений напряжений и деформаций с данными натурных исследований;
- качественным и количественным согласием с результатами решения задач по существующим методическим документам.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методологии пространственного численного моделирования гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС для их рационального проектирования.

Практическая значимость работы и внедрение результатов.

Результаты расчетных исследований использованы при проектировании новых и реконструкции эксплуатирующихся гидротехнических сооружений: Саяно-Шушенской ГЭС; Ирганайского гидроузла; Усть-Илимской ГЭС; Зарамагской ГЭС, Гочатлинской ГЭС, Мамаканской ГЭС, Нижне-Бурейской ГЭС, Усть-Среднеканской ГЭС, Вилуйской ГЭС, Зейской ГЭС, Канкунской ГЭС, Ленинградской ГАЭС и других станций (ОАО «Ленгидропроект» г. Санкт-Петербург). На основании построенных пространственных численных моделей реализовано следующее:

1. Проект восстановления СШГЭС в части расчетных обоснований по договору № 2717 между РусГидро и ОАО «Ленгидропроект». Выполнение расчетов по тематике НИР с СШГЭС им. П.С. Непорожного.
2. НИР по проекту и выбору вариантов плотины Канкунской ГЭС. Почетный диплом РусГидро за лучшую научно-исследовательскую работу в области гидроэнергетики за 2011 г.
3. НИР по проекту Ленинградской ГАЭС. «Методика пространственного моделирования здания ГАЭС и турбинных водоводов».
4. НИР по проекту Зарамагской ГЭС-1 «Обоснование надежности высоконапорных турбинных водоводов».
5. Патент на полезную модель № 118323 «Бетонная гравитационная плотина для суровых климатических условий», 2011 г.
6. Патент на полезную модель № 121272 «Бетонная гравитационная плотина для суровых климатических условий», 2012 г.
7. Патент на полезную модель № 127089 «Узел сопряжения противofильтрационного устройства грунтовой плотины с береговыми примыканиями 2012 г.
8. Результаты работы одобрены научно-техническими советами ФГБУН гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, ОАО «Ленгидропроект», РусГидро,

Мосгидропроект, кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство» ИСФ ФГАОУ ВОСПБПУ.

Личное участие автора состоит в постановке задач, разработке и внедрении методологии обоснования проектных параметров высоконапорных гидроагрегатных блоков ГЭС, а также в построении пространственных компьютерных моделей гидроагрегатных блоков ГЭС, выполнении расчетных исследований и анализе полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Метод обоснования проектных параметров гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС на основе пространственного численного моделирования.
- 2) Классификация элементов высоконапорных водопроводящих трактов.
- 3) Методика моделирования водопроводящих трактов, как многослойных оболочек.
- 4) Уточнение критериев прочности и устойчивости стальных затворов.
- 5) Классификация нагрузок на гидроагрегатный блок.
- 6) Анализ показателей прочности материала и ранжирование нагрузок в напряжения элементов гидроагрегатных блоков при нормальных и нештатных условиях эксплуатации.

Апробация полученных результатов.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях «Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, (2004, 2005, 2006 г.г.), на Научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.Я. Панарина (СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2005 г.), на Международной конференции REMAS 2008 (СПбГПУ, Санкт-Петербург 2008), на Научно-технической конференции во ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева, на международной конференции по гидротехнике в МГУП (Москва, 2011 г.), на заседаниях кафедры ВиГС СПбПУ, 2006-2014 г.г., в Институте теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

Материалы диссертации опубликованы в 25 печатных работах, в том числе в 16 из списка изданий, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы в 101 наименовании. Объем диссертации 215 страниц основного текста, в том числе 99 рисунков и 34 таблицы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, проанализирована изученность проблемы, представлены научная новизна, практическая ценность результатов работы, приведены сведения о структуре и объеме диссертации и кратком содержании ее глав.

Первая глава посвящена анализу и развитию методологии проектирования гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС и их водопроводящих трактов. Глава содержит описание основной направленности работы.

Отмечено, 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 г., под руководством Ю.С. Васильева успешно решались задачи по определению параметров объектов гидроэнергетики на ЭВМ ЕС1022. Тем самым, была создана основа для математического моделирования и системного анализа уникальных гидроэнергетических объектов с использованием компьютерной техники. В этой связи, следует отметить труды Ю.С. Васильева, В.И. Виссарионова, А.А. Морозова, О.А.Муравьева, М.П.Федорова, Д.С.Щавелева, Г.А. Претро, Л.И.Кубышкина, М. Г. Тягунова, Н.К. Малинина, В.В. Елистратова.

В России в настоящее время для проектирования высоконапорных гидроагрегатных блоков используется ряд документов. В 1984 г. принято к применению «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)». В 2008 г. разработан стандарт РАО «ЕЭС России» (СТО РАО «ЕЭС России» 1733282.27.14.02-2008. «Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования».

Действующие нормы проектирования предусматривают математическое моделирование гидроагрегатных блоков в плоской постановке для осесимметричной задачи. Этот способ нашел свое распространение с конца 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 остается определяющим, хотя он уже давно отстал от потребностей современного проектирования. 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.

В главе выполнена классификация водопроводящих трактов высоконапорных гидроэлектростанций. Среди представленного перечня водопроводящих трактов в работе исследованы напорные турбинные водоводы и спиральные камеры, имеющие величину параметра « PD » больше $12\text{МПа}\cdot\text{м}$ (произведение гидродинамического давления на диаметр входного сечения трубы при нормальных условиях эксплуатации - НУЭ).

В процессе проектирования гидроагрегатных блоков высоконапорных приплотинных ГЭС обосновываются параметры отдельных составляющих элементов и прежде всего водопроводящего тракта, передающего энергию движения воды на лопатки направляющего аппарата гидротурбины, рисунок 1. Водопроводящий тракт включает в себя следующие элементы: турбинный

водовод, опора турбинного водовода, спиральная камера, турбина, отсасывающие трубы.

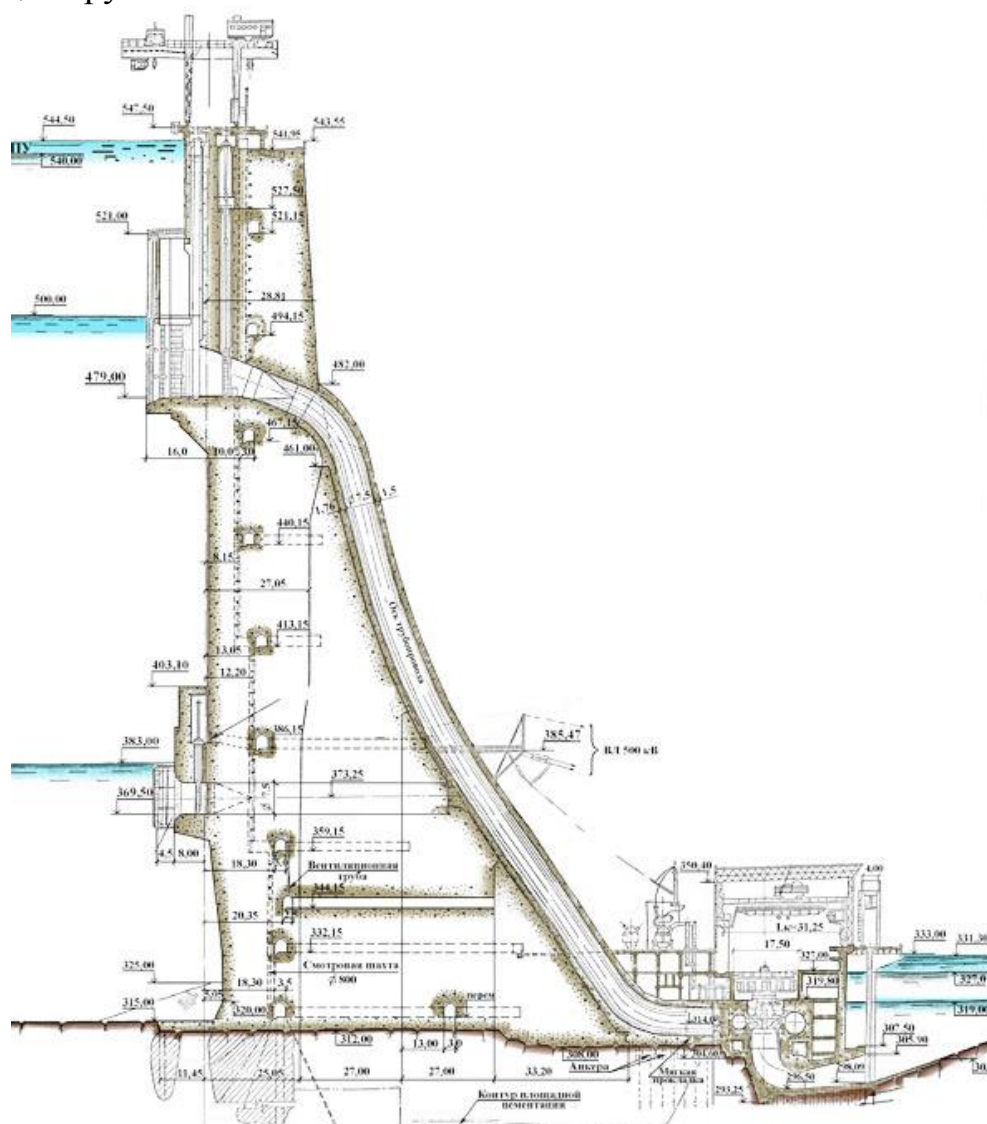


Рисунок 1 - Высоконапорный водопроводящий тракт на примере СШГЭС

Произведен анализ техногенных аварий, произошедших на высоконапорных ГЭС.

Выполнено математическое описание гидродинамических процессов в напорном трубопроводе при внезапном торможении потока воды, с учетом совместных режимов работы механического и гидротурбинного оборудования.

Для определения гидродинамического давления приняты следующие допущения:

- вода обладает упругими свойствами (справедлив закон Гука);
- материал стенок трубопровода обладают упругими свойствами;
- силами трения воды о стенки трубопровода пренебрегаем, что справедливо для больших скоростей распространения ударной волны.

В этом случае система разрешающих уравнений, описывающая неустановившееся движение жидкости в водопроводящем тракте ГЭС может быть записана в виде двух уравнений.

1. Динамического уравнения, получаемого из закона сохранения количества движения:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

где v – средняя по сечению скорость жидкости в трубопроводе, t – время, p – гидродинамическое давление, g - ускорение силы тяжести, x -координата расчетного сечения трубопровода,

2. Уравнения неразрывности потока жидкости, выражающего сохранение массы, записываемого в виде:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{g}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

где c -скорость распространения волны возмущения давления.

Теоретическое решение задачи о гидравлическом ударе дано Н.Е. Жуковским, в дальнейшем теорию гидроудара развивали Г.И. Кривченко, А.Е. Жмудь и другие ученые. Численными исследованиями переходных процессов в турбинных водоводах плодотворно занимались Н.В. Арефьев, В.В. Берлин, О.А. Муравьев, Б.А. Соколов, О.И. Башнин и др.

В первой главе представлена математическая основа расчета конструкций при решении краевых задач для системы разрешающих уравнений статического и динамического равновесия методом конечных элементов.

Фундаментальная основа численных методов раскрыта в трудах К. Вазитзу, Г. Вестергарда, А.И. Лурье, Н. Ньюмарка, С.П. Тимошенко, и получила дальнейшее теоретическое и прикладное развитие в работах Е.Вильсона, О. Зенкевича, В.В. Лалина, В.А. Постнова, А.А. Родионова, Л.А. Розина, и других.

Одной из главных задач по обеспечению надежной работы конструкции является обеспечение ее устойчивости и прочности. Теория устойчивости ведет свое начало от работ Л. Эйлера, который впервые определил критическую силу центрально сжатого упругого стержня. Математическая формулировка теории устойчивости дана А.Я. Ляпуновым, далее нашла свое отражение в трудах И.Г. Бубнова, Б.Г. Галеркина и других ученых.

Следует заметить, что критериальное значение минимального коэффициента общей устойчивости формы стальной конструкции (отношение критической к фактической нагрузке) не установлено действующими нормативными документами. Стальные конструкции водопроводящих трактов постоянно работают в условиях водной среды и подвержены коррозии. Основы представлений о процессах коррозии, были заложены в 30-х годах XX века в работах К. Вагнера и Г. Кеше. Следует заметить, что расчеты стальных конструкций регламентированы строительными Нормами только в упругой постановке. Однако коррозионно-изношенные конструкции требуют более детального обоснования прочности за пределами применимости закона Гука.

Математическая база теории пластичности изложена в работах Н.И. Безухова, Д. Друкера, А.А. Ильюшина, В.А. Копнова, Р. Хилла, и других авторов.

В связи с этим, в работе предложена инженерная методика расчета работающих металлоконструкций и реализована на примере затвора, с учетом локальных зон коррозии.

На сегодняшний день расчеты прочности гидроагрегатных блоков и их водопроводящих трактов ведутся по методу предельных состояний, предусматривающему одновременное выполнение критериев прочности, как во внутренней стальной оболочке, так и в арматуре железобетонной части.

Существующие методики моделирования комплексного материала адаптированы только для строительных конструкций, часть из них разработаны за рубежом и положены в основу действующих международных норм по проектированию, использование которых в Российской Федерации не регламентировано, или крайне ограничено, так как в российских Нормах заложены гипотезы и подходы, отличающиеся от тех, что реализованы в международных стандартах. Прежде всего, это касается критериев прочности и устойчивости, которые принимаются при анализе работоспособности сооружения.

Вместе с тем, численное моделирование пространственных водопроводящих трактов и спиральных камер зданий ГЭС, в условиях изменения в процессе эксплуатации физических свойств неоднородного материала в полной мере не изучено и не регламентировано в российских нормах. Вследствие этого, перечисленные актуальные проблемы разделены на две группы – относящиеся к сфере действия норм и выходящие за формальные рамки их действия.

В выводах по главе сформулирована новая научная идея математического моделирования гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС.

Во второй главе выполнена постановка задачи по обоснованию проектных параметров гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС на основе пространственного численного математического моделирования, в рамках которой оптимизируются площади расчетного армирования и толщина несущей стальной оболочки.

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

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;
- контроль за физическим объектом, при учете влияния новых факторов эксплуатации и природных воздействия;
- калибровка или коррекция модели на появляющиеся новые факторы.

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. 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.

Схема цикла математического моделирования объекта представлена на рисунке 2. При обосновании прочности сооружений в процессе эксплуатации предлагаются способы учета новых факторов:

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

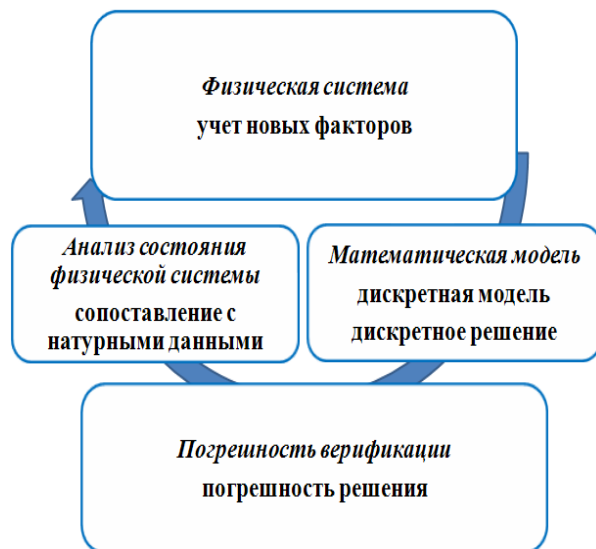


Рисунок 2 - Схема цикла математического моделирования

При проведении исследований прочности моделирование высоконапорных водопроводящих трактов выполнялось из условия совместной работы стальной оболочки, бетона и арматуры. На рисунке 3 представлена схема нагрузок на гидроагрегатный блок, гидростатическое давление воды, гидротурбинное, крановое и распределенное на отметках здания ГЭС оборудование.

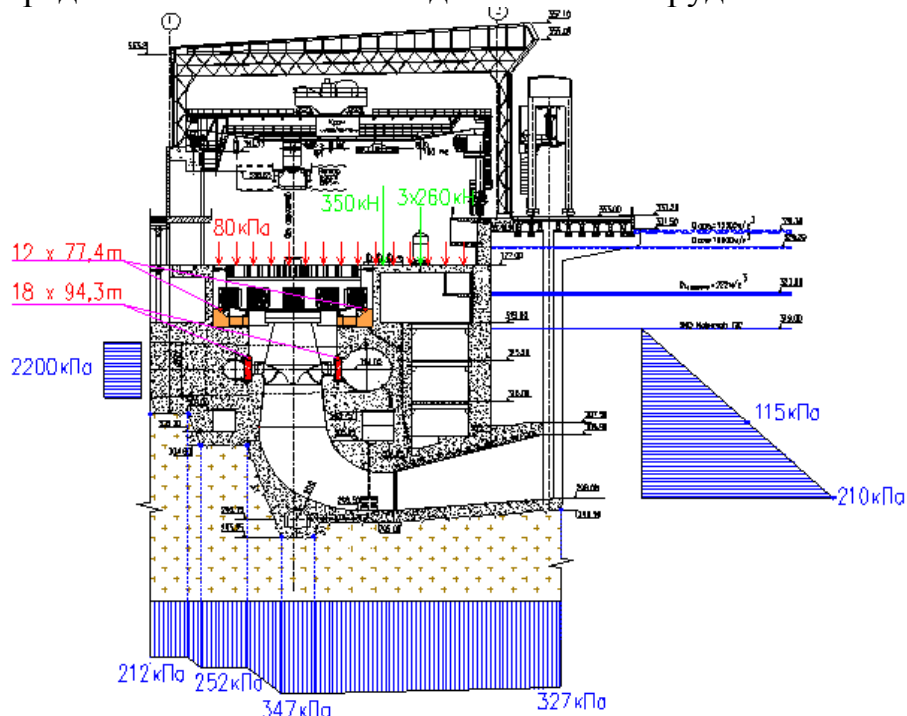


Рисунок 3 - Схема нагрузок на гидроагрегатный блок (эпюры давлений представлены условно)

Осуществлена 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: $N_{\Sigma} = N_{CT} + N_A$. Здесь приняты обозначения: N_{Σ} - суммарное усилие, N_{CT} - усилие в стальной оболочке и N_A - усилие в арматуре.

Суммарное усилие в элементе равно: $N_{\Sigma} = q \times r$, где q , r - давление воды внутри трубы, радиус трубы.

Нормальные напряжения растяжения, при наступлении предельного состояния в оболочке, определяются по формуле: $\sigma = q \times r / \delta$. Здесь σ - суммарные нормальные напряжения растяжения, δ - суммарная толщина стальной оболочки и арматуры.

Площадь расчетной кольцевой арматуры сталежелезобетонных водоводов определяется из соотношения:

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

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, A_s , A_{si} - расчетное сечение арматуры и стальной оболочки, 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:

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

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:

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

где $\sigma_{\text{низ}}$ и $\sigma_{\text{верх}}$ - напряжения в нижней и верхней частях сечения, 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 моделировании 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. Разработана методика численного пространственного многослойного моделирования высоконапорных водопроводящих трактов. Предложен перечень типов элементов и граничных условий для моделирования многослойных пространственных систем. Выполнено сравнение новой методики с методами расчета водопроводящих трактов по действующим нормам проектирования.

Выполнена постановка задачи моделирования высоконапорных водопроводящих трактов, как пространственных многослойных оболочек.

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 конструкций выполнен при решении краевых задач для системы разрешающих уравнений, включающих:

- уравнения равновесия:

$$[\Phi]^T(\sigma) = (G), \quad (6)$$

- геометрические уравнения (Коши):

$$(\varepsilon) = [\Phi] \cdot (u), \quad (7)$$

- определяющие (физические) уравнения - Закон Гука:

$$(\sigma) = [D] \cdot (\varepsilon), \quad (8)$$

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 x 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 металлоконструкции принят однородный конечный элемент, жесткость которого представлена в виде «матрицы» жесткости стали $[K_{ст}]$.

В основу конечно-элементной модели сталежелезобетона принят неоднородный конечный элемент, жесткость которого определена в виде суммы жесткостей стали, арматуры и бетона:

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

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

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

где $[K]$ - глобальная матрица жесткости конечно-элементной модели конструкции; $\{U\}$ - глобальный вектор узловых обобщенных перемещений (степеней свободы); $\{F\}$ - глобальный вектор обобщенных внешних сил.

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: $[K_i]\{\Delta u_i\} = \{F_i^a\} - \{F_i^r\}$, где $[K_i]$ - матрица жесткости системы элементов, $\{\Delta u_i\}$ - вектор приращений перемещений узлов, $\{F_i^a\}$ - вектор узловых сил, $\{F_i^r\}$ - вектор невязки узловых сил, соответствующий вектору перемещений узлов конструкции $\{u_i\}$, индекс i - соответственно номер итерации. Последовательность вычислений следующая:

- 1) на каждом шаге 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 решения;
- 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 высоконапорных 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 равной нагруженности 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 рисунке 4. При послойном моделировании учтены все составляющие водовода, а именно:

1. Стальная оболочка, толщиной $\delta_{ст}$, радиусом трубы r .
2. Защитный слой бетона с ортотропными свойствами.
3. Приведенный слой внутренней кольцевой арматуры.
4. Приведенный слой внутренней торовой арматуры.
5. Внутренний слой бетона с ортотропными свойствами.
6. Приведенный слой наружной кольцевой арматуры.
7. Приведенный слой наружной торовой арматуры.
8. Защитный слой бетона с ортотропными свойствами.

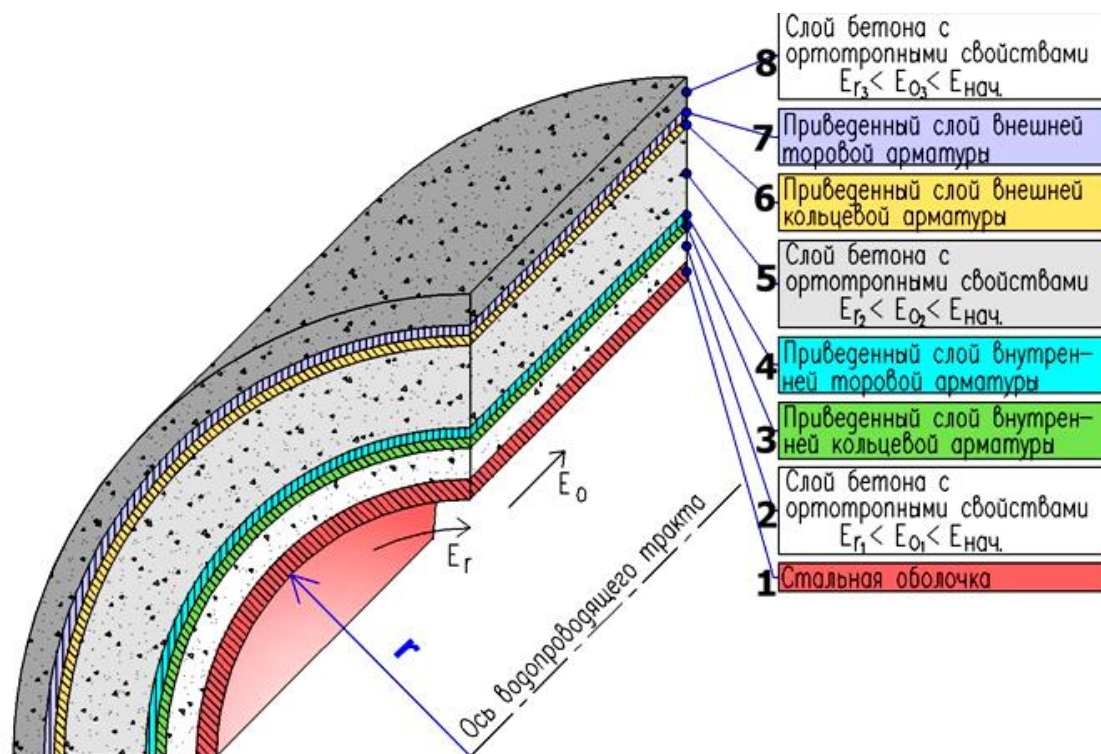


Рисунок 4 - Сегмент турбинного водовода

Модель водопроводящего тракта, расположенного в массивном бетоне (сегмента спиральной камеры или турбинного водовода в бетонном массиве-бычке) представлена на рисунке 5. 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.

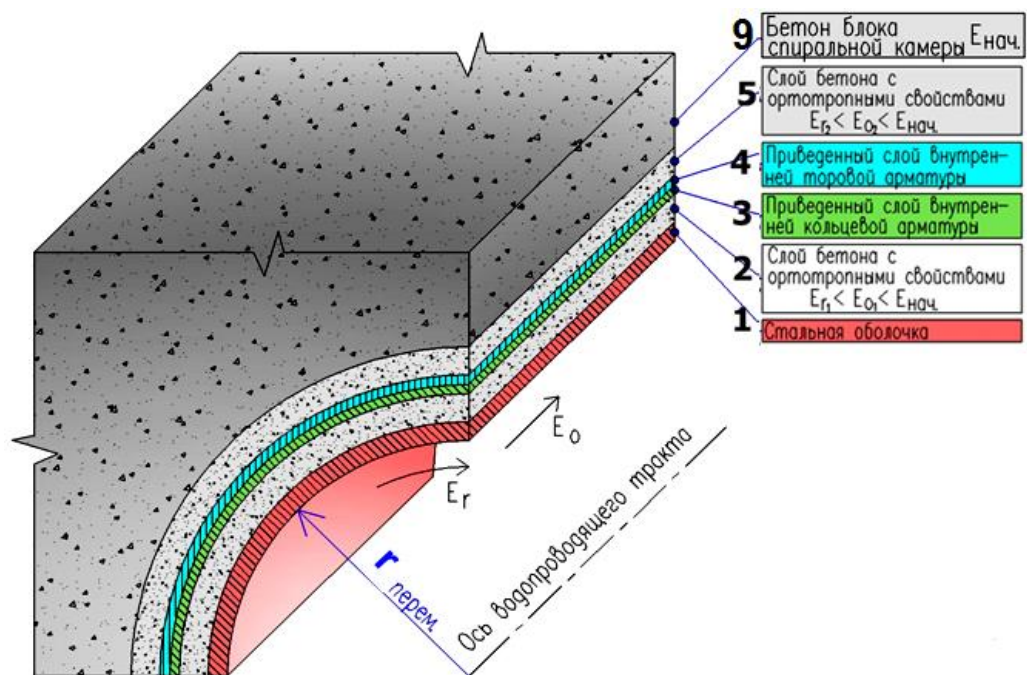


Рисунок 5 – Сегмент водопроводящего тракта в массивном бетоне

В выводах по главе обоснована оптимальность нового способа моделирования высоконапорных водопроводящих трактов, как многослойных оболочек, на примерах проектирования высоконапорных водоводов Ирганайской, Саяно-Шушенской и Зарамагской ГЭС.

В третьей главе рекомендованы новые критерии прочности и устойчивости коррозионно-изношенных стальных конструкций водопроводящих трактов.

В мировой практике при оценке коррозионного износа определяют процентный износ от проектной толщины металла. Эта методика реализует традиционно сложившийся подход, базирующийся на предположении, что средняя скорость коррозии, определенная на момент прогнозирования, сохранится и в будущем. При этом, в областях значительного коррозионного износа наблюдаются концентрации напряжений, значения которых, как правило, приближаются к пределу текучести. В отечественной практике оценка прочности коррозионно-изношенного механического оборудования и конструкций традиционно проводится в линейно упругой постановке с усреднением реальных толщин деталей. При этом, в областях локальной коррозии не учитываются концентрации напряжений, значения которых, как правило, приближены к пределу текучести металла. В этой связи, для инженерных расчетов по оценке прочности и долговечности, работающих коррозионно-изношенных конструкций, в данной работе после линейно - статического реализован нелинейный физический анализ, с отражением локальных пластических деформаций в зонах наибольшей коррозии металла. Физическая нелинейность задана диаграммой деформирования стали. Получен график зависимости напряжений от размеров зоны пластических деформаций, определен новый экстремум функции и коэффициент корреляции напряжений на наступление предельного состояния конструкции $k = \frac{\sigma_o}{\sigma_m} = 0,86$ для затвора основного

сегментного Усть-Илимской ГЭС (рисунок 6). Схема этапов расчета коэффициента корреляции напряжений представлена на рисунке 7.

Результаты расчета НДС подтверждают выполнение условия прочности и жесткости металлоконструкции при коррозионном износе, соответствующем началу наступления пластических деформаций металла. Исследование работоспособности коррозионно-изношенных конструкций проведено с учетом поэтапного уменьшения фактических толщин металла. При достижении максимальных напряжений предела текучести, выполнен нелинейный анализ для выявления зоны пластических деформаций.

В главе выполнен численный анализ коэффициентов запаса устойчивости эксплуатируемых конструкций при использовании численной пространственной математической модели.

Устойчивость системы определена из условия устойчивости ее составляющих элементов при допущении, что потеря устойчивости одного является начальным этапом потери устойчивости всей системы.

Алгоритм решения задачи устойчивости использован в предположении малых перемещений упругой системы, когда все приложенные к системе внешние нагрузки, растут пропорционально переменному параметру λ_ϵ .

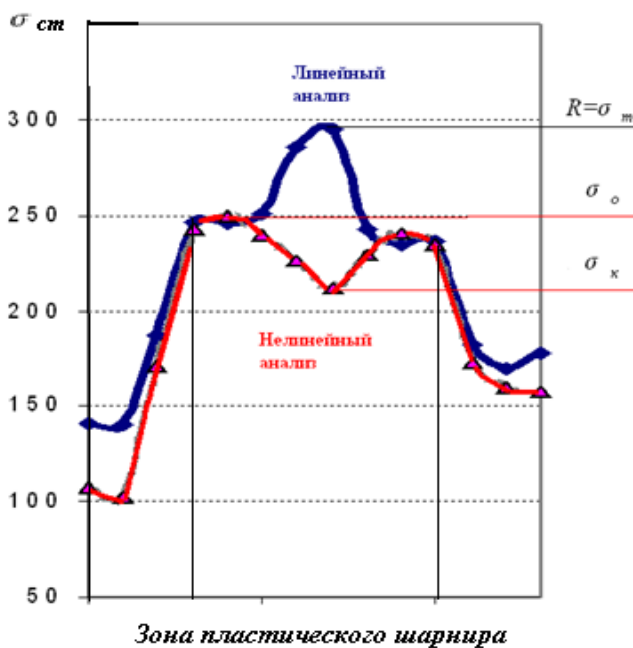


Рисунок 6 – График зависимости напряжений от размеров зоны пластических деформаций

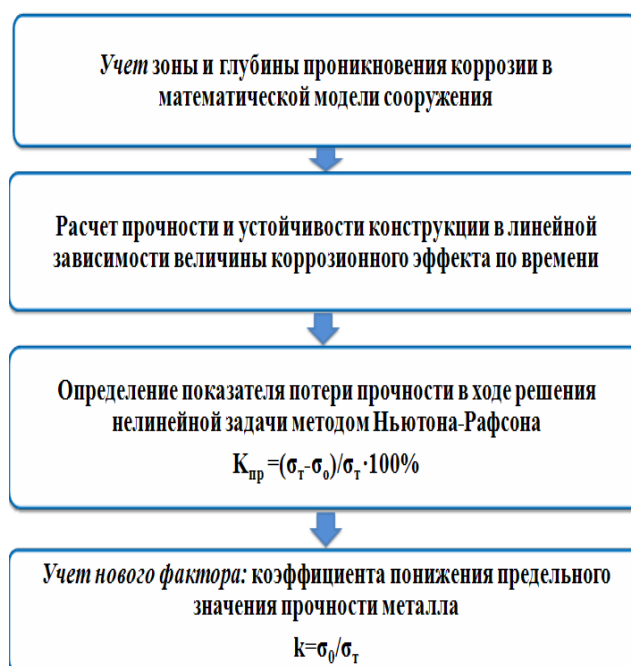


Рисунок 7 – Схема этапов расчета коэффициента корреляции напряжений k

Минимальное значение параметра λ_b , при котором матрица жесткости системы $[K]$ перестает быть положительно определенной является критическим, а соответствующее значение λ_b можно назвать коэффициентом запаса устойчивости k_y . При расчете конструкций на сочетание постоянной и временной нагрузок использовано уравнение: $(K - \lambda_n G_n - \lambda_\epsilon G_\epsilon)U = 0$, где K -

матрица жесткости системы, G_n - матрица геометрической жесткости от постоянной нагрузки (собственный вес), G_b - матрица геометрической жесткости от временной нагрузки, U – глобальный вектор узловых перемещений. Критический параметр к постоянной нагрузке всегда остается постоянным и равен $\lambda_n=1$, таким образом, в процессе расчета вычисляется только критический параметр к временной нагрузке λ_b или коэффициент запаса устойчивости системы, для которого справедливо $\lambda_b > 1$. При $\lambda_b = 1$ система находится в состоянии предельного равновесия.

Для статистических исследований к анализу параметра устойчивости выполнены расчеты 35 металлоконструкций. На рисунке 6 представлена диаграмма зависимости коэффициента запаса устойчивости для плоских и сегментных затворов. Предложено внести в действующие нормативные документы для металлических гидротехнических конструкций минимальное нормативное значение коэффициента запаса устойчивости формы λ_b в пределах от 1,6 до 3,0, полагая что при $\lambda_b < 1,6$ конструкция имеет недостаточную жесткость, а при $\lambda_b > 3,0$ завышенную жесткость и металлоемкость.

В выводах по главе отмечено, что в нормы проектирования предложены новые критерии прочности и устойчивости коррозионно-изношенных стальных конструкций водопроводящих трактов.

В четвертой главе на примере Саяно-Шушенской ГЭС разработана новая пространственная математическая модель гидроагрегатного блока с учетом гидротурбинного оборудования.

1. В математической модели учтены особенности деформирования бетона, при условии образования и наличия трещин.

2. Выполнено многослойное моделирование водоводов и спиральных камер как многослойных оболочек. Учтено наличие в модели всех слоев арматуры.

3. Заданы граничные условия модели.

4. Классифицированы и определены нагрузки основных и особых сочетаний.

Математическое численное моделирование водопроводящих трактов выполнено в следующей последовательности:

1. Для аппроксимации металлической оболочки спиральной камеры и внутреннего кольца арматуры, в задачу введены четырехслойные плоские элементы. В состав многослойных элементов включены слои, моделирующие стальную оболочку, защитный слой трещиноватого бетона между стальной оболочкой и арматурой, внутреннее кольцо арматуры, слой трещиноватого бетона. Толщина каждого слоя принята в соответствии с проектом.

2. Бетонная оболочка водовода задана с использованием объемных конечных элементов с нормативными физическими характеристиками и нелинейными свойствами.

3. Наружная кольцевая арматура водоводов смоделирована при использовании трехслойных пластинчатых элементов. В элементы включены внешнее кольцо арматуры и два слоя трещиноватого бетона моделирующих зоны трещинообразования.

Для вычисления общих расчетных перемещений и напряжений $U_{расч}$, $\sigma_{расч}$ и расчетных напряжений в стальной оболочке $\sigma_{об.ст}$, арматуре $\sigma_{арм}$ и бетоне $\sigma_{бет}$ заданы следующие расчетные параметры модели: модули упругости, коэффициенты Пуассона, плотности, коэффициенты температурного расширения, коэффициенты теплопроводности, толщины и размеры элементов:

$$U_{расч}, \sigma_{расч} \begin{cases} \sigma_{об.ст}(E_{ст}, \nu_{ст}, \rho_{ст}, \alpha_t, k_{ст}, \delta_{об.ст.} (перем.)) \\ \sigma_{арм}(E_{ст}, \nu_{ст}, \rho_{ст}, \alpha_t, k_{ст}, \delta_{приварм} (перем.)) \\ \sigma_{бет}(E_{бет} (перем.), \rho_{бет}, \alpha_t, k_{бет}, \delta_{разм.эл.}) \end{cases}$$

Выполнена классификация нагрузок:

1. Собственного веса сооружения и оборудования $G, M_{оборуд.}$
2. Изменения гидравлических режимов в водопроводящем тракте $P_{з.у.}$
3. Пульсационных нагрузок при работе турбины $Q_{пульс.}$
4. Вибрационных нагрузок на опорные элементы статора турбины.
5. Нагрузок от электромагнитных небалансов $R_{эл.м.}$
6. Изменения температуры водопроводящего тракта $F(t)$.
7. Влияния нагрузки от плотины $Q_{гидр.}$
8. Сейсмического воздействия.

Условие предельных состояний: $\gamma_{1с} F < R \frac{\gamma_c}{\gamma_n}$, где $\gamma_{1с}$ - коэффициент сочетаний нагрузок; F – расчетное значение обобщенного силового воздействия; R – расчетное значение обобщенной несущей способности; γ_c - коэффициент условий работы; γ_n - коэффициент надежности по назначению.

Условие прочности при расчете по предельным состояниям первой группы:
 $\sigma_{об.ст.} \leq 240$ МПа (276 МПа) - сталь 09Г2С оболочки для основных(особых)сочетаний нагрузок;

$\sigma_{арм} \leq 292$ МПа $\sigma_{max} \leq 292$ МПа $\sigma_{max} \leq 240$ МПа (сталь оболочки) - (320 МПа) (арматура А-III) - для основных (особых) сочетаний нагрузок.

Выполнено геометрическое и физическое соответствие модели реальному сооружению. Построение расчетной математической модели основано на имеющемся проектном материале, действующих нагрузках на сооружении, данных контрольно-измерительной аппаратуры. Модель гидроагрегатного блока включает стальную оболочку водопроводящего тракта, арматурные слои, гидротурбинное оборудование, рисунок 8.

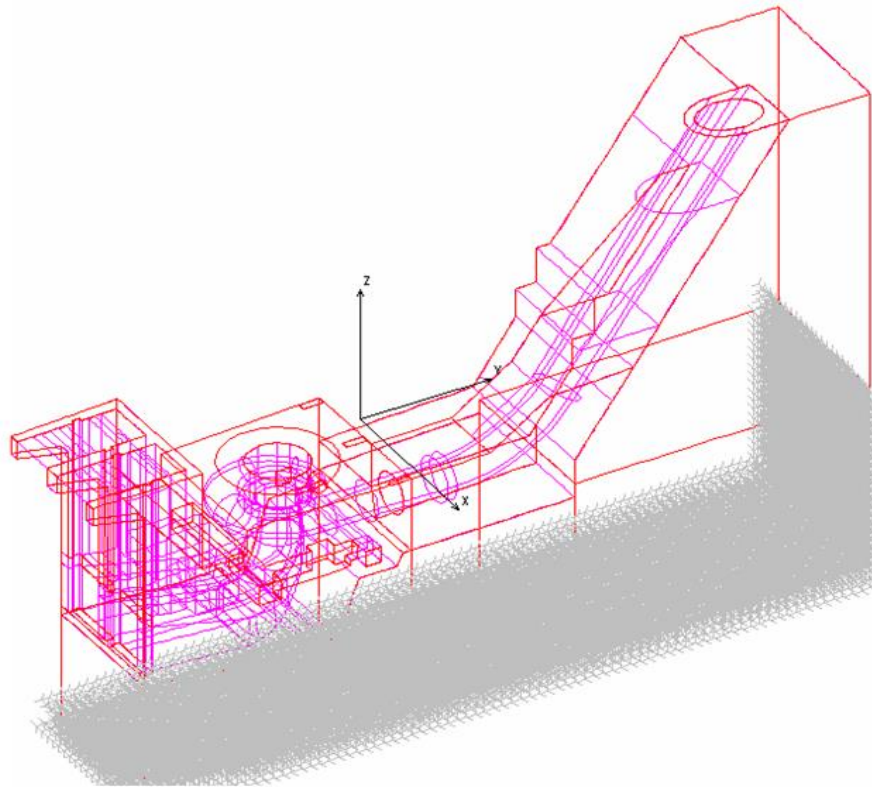


Рисунок 8 – Водопроводящий тракт в составе математической модели гидроагрегатного блока

Бетон агрегатного блока отделен от плотины температурным швом 50мм. Взаимодействие между плотиной и зданием ГЭС осуществлено через стальную оболочку водовода и общее грунтовое основание. Нагрузки на модель заданы с учетом всех сил, сосредоточенных и распределенных на отметках. Нагрузки от генераторного оборудования заданы в узлах модели элементами точечных масс.

Статические граничные условия заданы по нижней грани грунтового массива.

Граничные условия динамического равновесия системы:

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = F(t); \quad F(t) = -F_g(t) = -[M]w_g(t), \text{ где}$$

$\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$, $w_g(t)$ - ускорение, скорость, перемещения, ускорение грунта зависящие от времени, $F(t)$ - вектор узловых сил, зависящих от времени, $[M]$ – матрица масс, $[C]$ – матрица диссипации.

Выполнен расчет гидродинамической составляющей нагрузки и получен график зависимости пульсаций давления от оптимального времени закрытия лопаток направляющего аппарата и затвора водоприемника, при котором обеспечивается безаварийная эксплуатация гидроагрегатного блока.

Установлено максимальное повышение давления - 0,35 МПа (35 м. вод.ст.), соответствующее времени закрытия лопаток направляющего аппарата в течение 16,5 сек. и одновременном закрытии затвора водоприемника 120 сек. в режиме максимальной мощности генератора при напоре $H=219,0$ м. (рисунок 9).



Рисунок 9 - График зависимости пульсаций давления от времени

В выводах по главе отмечено, что на примере Саяно-Шушенской ГЭС разработана новая пространственная математическая модель гидроагрегатного блока, имеющая в своем составе: нижнюю часть сталежелезобетонного водовода, анкерную опору, агрегатный блок, скальный массив, оборудование на отметках.

Пятая глава содержит новые подходы к обоснованию работоспособности гидроагрегатных блоков в фактических и экстремальных условиях эксплуатации. Численный анализ представлен на примере гидроагрегатного блока Саяно-Шушенской ГЭС. Учтены новые экстремальные нагрузки: повышение давления при одновременном закрытии лопаток направляющего аппарата и опускании затвора водоприемника; сейсмическое воздействие; вибрации, силы при аварийном торможении агрегата и замыкании полюсов генератора; замена гидротурбинного оборудования.

При этом решались следующие задачи:

- определение напряженно-деформированного состояния гидроагрегатного блока для всех возможных сочетаний нагрузок эксплуатационного, аварийного, ремонтного режимов работы станции;
- анализ напряжений в металлической оболочке спиральной камеры и напряжений, воспринимаемых проектной арматурой;
- сравнение результатов расчетов, полученных на пространственной конечно-элементной модели, с данными натурных наблюдений;
- определение запасов прочности и работоспособности.

Определена максимальная область объемного трещинообразования в бетонном блоке спиральной камеры в случае гидравлического удара, рисунок 10.

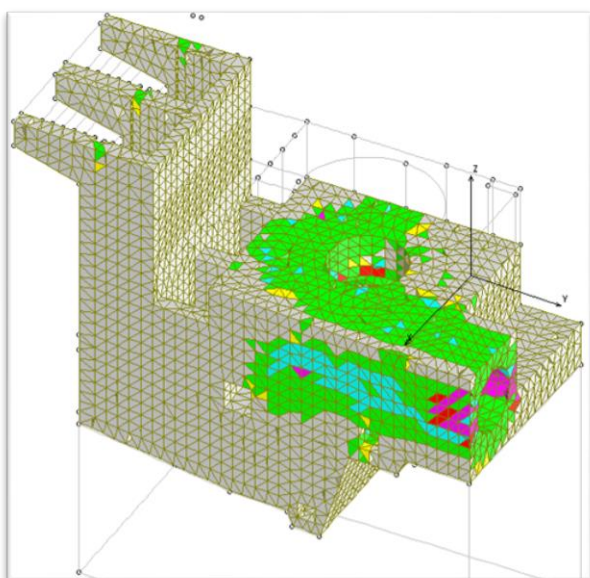


Рисунок 10- Область объемного трещинообразования в агрегатном блоке

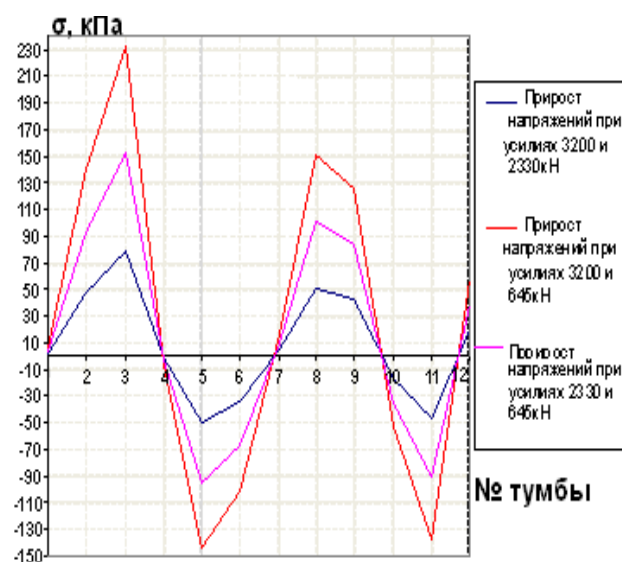


Рисунок 11 –График зависимости увеличения напряжений от № подстаторной тумбы

Анализ напряженно-деформированного состояния гидроагрегатного блока выполнен в сопоставлении с данными натурных измерений: 1) напряжений в арматуре; 2) напряжений в металлической оболочке; 3) деформаций сооружения; 4) трещин в бетоне; 5) биения вала турбины.

Расчет от воздействия токов короткого замыкания статора выполнен для трех сочетаний, в которых P_0 задана соответственно величинам моментов при коротком замыкании статора, действующим на фундамент с учетом вынужденных колебаний при меняющейся во времени гармонической нагрузки с частотой w по формуле: $P=P_0 \sin(wt)$. В каждом сочетании учтена радиальная нагрузка от механических и электромагнитных небалансов при номинальном режиме ротора. Расчет от воздействия токов короткого замыкания ротора выполнен с учетом максимальной нагрузки от магнитного притяжения при замыкании половины полюсов ротора и сдвигающей силы на двух тумбах статора. Значения максимальных амплитудных перемещений опорных элементов статора от динамической нагрузки при токах короткого замыкания составляют 500 мкм, при этом растягивающие напряжения достигают 230 МПа, что соответствует 8% от общего уровня напряжений (рисунок 11).

Результаты НДС стальной оболочки нижнего участка водовода и анкерной опоры сведены в таблицу 1.

Получены напряжения в стальной оболочке и слоях арматуры спиральной камеры при гидравлическом ударе с повышением давления на $\Delta P=0,35$ МПа к расчетному $P= 2,19$ МПа, $P_{г.у.}=P+\Delta P=2,54$ МПа (рисунок 12).

Таблица 1- Результаты НДС стальной оболочки нижнего участка водовода и анкерной опоры

НДС стальной оболочки водовода	Н.У.Э	Г.У.	Сейсм.
Нижний участок 09Г2, МПа	117	157	122
Анкерная опора 138-ИЗ, МПа	250	289	262
Поперечное перемещение, мм	24	31	25
Продольное перемещение НПУ/УМО, мм	4/2,3	4,8	4,2
Относитн. прод. перем., (УМО-НПУ), мм	1,7	2,5	1,9

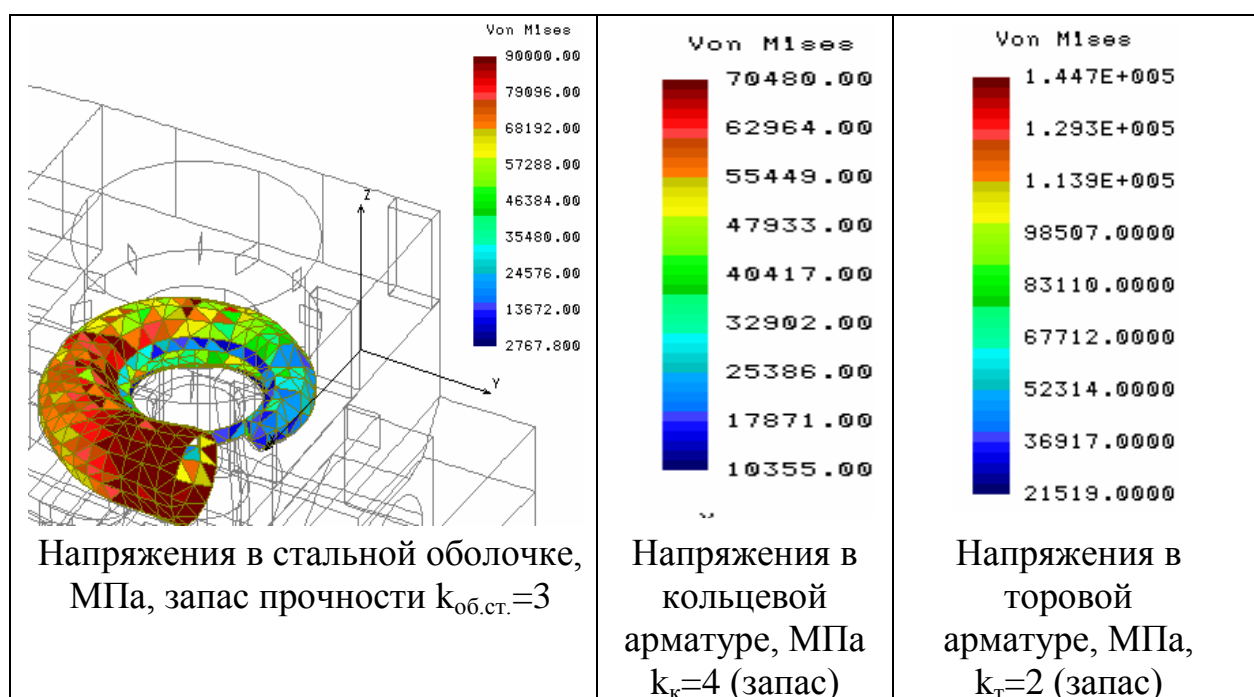


Рисунок 12–Приведенные напряжения в стальной оболочке и слоях арматуры спиральной камеры

Кроме того, на численной пространственной модели впервые определены и сопоставлены с нормативными данными величины биения вала турбины, смещения горизонтальной оси водовода. Выполнена оценка сейсмостойкости гидроагрегатного блока; генерация спектров ответа на отметках установки оборудования; запасы прочности элементов агрегатного блока при замене гидротурбинного оборудования и вибрациях опорных элементов подстаторных тумб; ранжирование нагрузок в напряжения стальной оболочки спиральной камеры при нормальных и экстремальных условиях эксплуатации, рисунок 13 и рисунок 14.

Выводы по главе содержат рекомендации безопасной работы гидроагрегатного блока в нормальных и экстремальных условиях эксплуатации (на примере Саяно-Шушенской ГЭС).

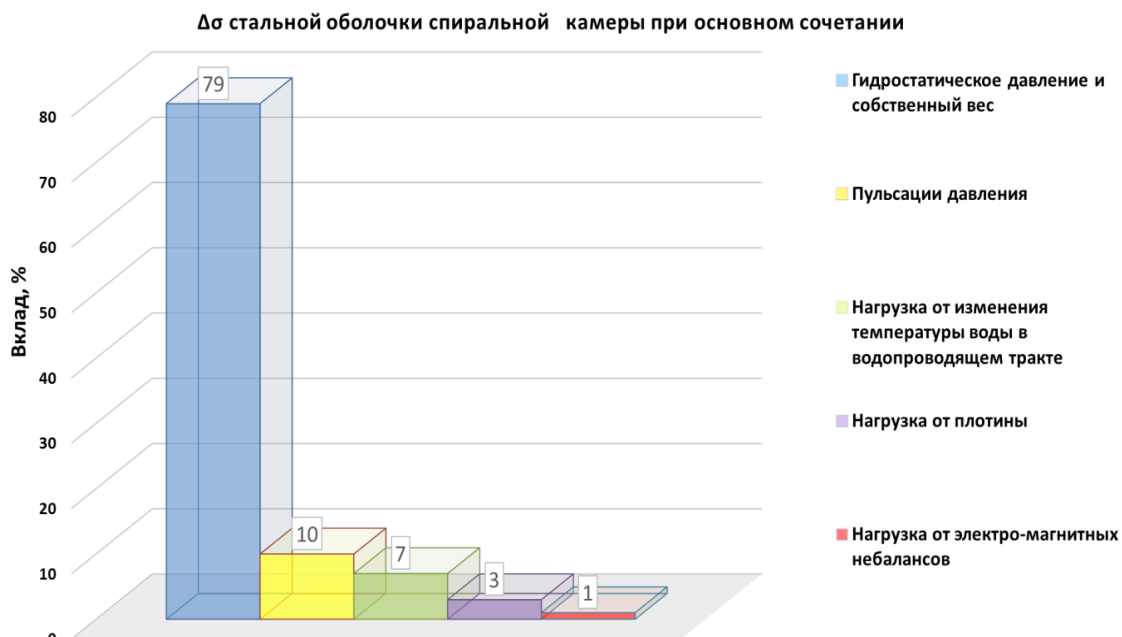


Рисунок 13 – Ранжирование нагрузок в напряжения спиральной камеры при нормальной эксплуатации

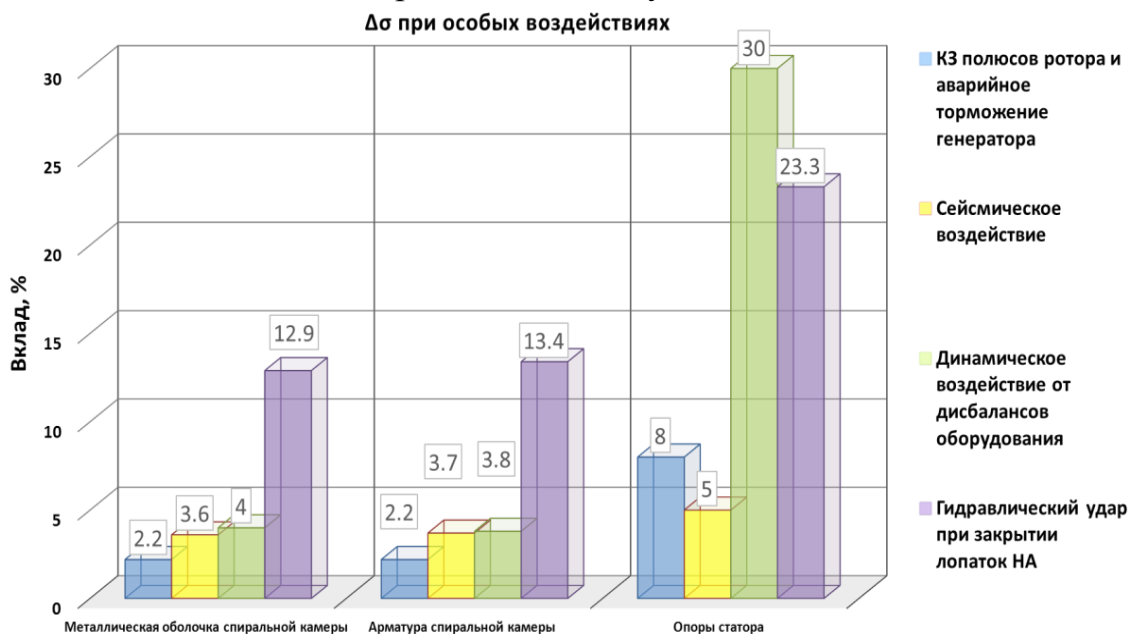


Рисунок 14 – Ранжирование нагрузок в напряжения спиральной камеры при экстремальных воздействиях

Заключение

В работе разработана методология обоснования проектных параметров гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС, направленная на развитие теоретических и прикладных методов пространственного моделирования гидроэлектростанций и их рационального проектирования.

Решены задачи, связанные с повышением безопасности высоконапорных гидроэлектростанций в целом, что способствует выдаче гарантированной мощности потребителю.

Областью исследования и математического моделирования явились гидроагрегатный блок и турбинные водоводы высоконапорных ГЭС, в которых,

на основе нового метода пространственного моделирования водопроводящих трактов, как многослойных оболочек и блоков спиральных камер выполнены комплексные исследования.

Исследования направлены на обоснование прочности по предельным состояниям, на анализ вклада нагрузок в напряжения несущих элементов, обеспечение правильности проектных решений и обоснование безопасности ГЭС.

Видом возобновляемой энергии является энергия водного потока, воздействующего непосредственно на водопроводящий тракт исследуемых в диссертации объектов, и вносящая наибольший вклад в значения напряжений элементов сооружения, воспринимающих давление воды.

Таким образом, в работе решены следующие задачи:

1) Созданы и внедрены в практику проектирования новые методики математического численного моделирования высоконапорных гидроагрегатных блоков, позволяющие существенно повысить эффективность их проектирования и исследований прочности.

2) Для системного решения задач исследования создана и впервые представлена классификация высоконапорных водопроводящих трактов ГЭС, с выделением наиболее опасных по уровню гидродинамических нагрузок объектов исследования – напорных турбинных водоводов, спиральных камер, затворов.

3) Разработана и внедрена новая методика моделирования водопроводящих трактов, как многослойных оболочек, направленная на оптимизацию параметров арматуры и стальной оболочки на базе расчета их напряженно-деформированного состояния.

4) Получены и Рекомендованы в Нормы проектирования зависимости для расчета коэффициентов запаса прочности и устойчивости стальных конструкций затворов, находящихся в эксплуатации, позволяющие делать качественный и количественный анализ влияния коррозии на долговечность конструкций.

5) Определена и представлена классификация ранее не учитываемых нагрузок на гидроагрегатный блок для нормальных и экстремальных условий эксплуатации, позволяющая наглядно провести систематизацию нагрузок для расчетов прочности сооружений.

6) Впервые на основе расчета гидродинамического давления в напорном водопроводящем тракте определено рациональное время закрытия лопаток направляющего аппарата и затвора водоприемника для обеспечения безаварийного режима работы Саяно-Шушенской ГЭС.

7) Построены новые пространственные численные модели гидроагрегатных блоков с учетом гидротурбинного оборудования, позволяющие выполнять в реальном времени комплекс исследований по напряжениям и деформациям от нагрузок различных сочетаний.

8) Впервые выполнены и системно проанализированы численные исследования гидроагрегатного блока, получены запасы прочности материала и ранжирование нагрузок в напряжения элементов.

9) Разработанные в диссертационной работе новые методики пространственного численного моделирования использованы для обоснования проектных решений проектируемых, строящихся и действующих гидроэлектростанций: Ирганайская ГЭС, Зарамагская ГЭС, Гоцатлинская ГЭС, Саяно-Шушенская ГЭС, Мамаканская ГЭС, Усть-Среднеканская ГЭС, Ленинградская ГАЭС, Канкунская ГЭС.

Задачами дальнейших исследований, на наш взгляд, являются:

А. Развитие методологии обоснования проектных параметров гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС применительно к деривационным схемам создания напора.

Б. Обоснование безопасности гидроагрегатных блоков ГЭС при воздействии аварийных факторов: внешних (сейсмических и др.) и внутренних динамических колебаний.

Публикации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Козинец Г.Л. Оценка прочности и долговечности коррозионно-изношенных металлоконструкций гидротехнических затворов. - Гидротехническое строительство. 2007. №1, - С. 31-39.
2. Козинец Г.Л. Оптимизация конструкций ригелей переменного профиля гидротехнических затворов. - Гидротехническое строительство. 2007. №3, - С. 42-46.
3. Козинец Г.Л., Лисичкин С.Е., Богаченко С.В., Ивонтьев А.В. Численное моделирование сталежелезобетонных гидротехнических сооружений «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений», № 4, 2011 г., - С. 50-56.
4. Козинец Г.Л., Потехин Л.П. Расчетное обоснование прочности и работоспособности сталежелезобетонной спиральной камеры здания Саяно-Шушенской ГЭС. - Гидротехническое строительство. 2011. №7, - С.36-42.
5. 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. http://www.engstroy.spb.ru/index_2011_05/kozinets.html.
6. Козинец Г.Л., Алгоритм расчета сталежелезобетонных водоводов, Инженерно-строительный журнал. 2011. №6 (24). С.41-49. http://www.engstroy.spb.ru/index_2011_06/kozinets.html.
7. 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. т. 264С-Пб., 2011. - С.110-118.
8. Козинец Г.Л., Обоснование надежности гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2012. №5 (31). - С. 30-37. http://www.engstroy.spb.ru/index_2012_05/kozinets.html.
9. Козинец Г.Л., Вульфович Н.А., Денисов Г.В., Потехин Л.П., Расчетное обоснование массивной гравитационной плотины Канкунской ГЭС с расширенными полостями.- Гидротехническое строительство. 2012. №8, - С. 22-26.
10. Козинец Г.Л., Потехин Л.П. Численная оценка прочностной надежности высоконапорных водоводов при гидравлическом ударе, Инженерно-строительный журнал. 2012. №6 (32). - С. 29- 35. http://www.engstroy.spb.ru/index_2012_06/kozinets.html.

11. Козинец Г.Л., Математическое пространственное моделирование гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС. - Гидротехническое строительство. 2014. №11, - С. 42-25.

12. Козинец Г.Л., Анализ прочности высоконапорных водоводов при закрытии регулирующих устройств, Альтернативная энергетика и экология. 2015. №8, - С.25-35.

13. Козинец Г.Л., Гидродинамические нагрузки в водопроводящем тракте Саяно-Шушенской ГЭС при закрытии регулирующих устройств и гидроударе, Альтернативная энергетика и экология. 2015. №8, - С.36-46.

Патенты

14. Патент на полезную модель водопроводящего тракта № 118323 «Бетонная гравитационная плотина для суровых климатических условий», 2011г.

15. Патент на полезную модель водопроводящего тракта № 121272 «Бетонная гравитационная плотина для суровых климатических условий», 2012г.

16. Патент на полезную модель противофильтрационного устройства № 127089 «Узел сопряжения противофильтрационного устройства грунтовой плотины с береговыми примыканиями 2012г.

Публикации в других изданиях:

17. Козинец Г.Л., Белов В.В. Расчеты основных составляющих механического оборудования на примере механического оборудования берегового водосброса Саяно-Шушенской ГЭС.– XXXII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.1 . С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2004. - С. 142-143.

18. Козинец Г.Л., Белов В.В. Анализ напряженно-деформируемого состояния и оптимизация конструкций ригелей плоских гидротехнических затворов. – СПбГАСУ, Научно-техническое общество строителей Санкт-Петербурга и Ленинградской области. С-Пб. 2005. - С. 89-95.

19. Козинец Г.Л., Белов В.В. Рационализация конструктивных решений ригелей плоских гидротехнических затворов. – XXXIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.1 . С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2005. - С. 140.

20. Козинец Г.Л. Проблема учета присоединенных масс воды в расчетах затворов на сейсмостойкость. – XXIX Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч.1 . С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2006. - С. 145.

21. Козинец Г.Л., Критерии надежности гидротехнических затворов
Материалы Международной научно-технической конференции RELMAS 2008 Ч.1 . С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2008. - С7.

22. Козинец Г.Л., Численное моделирование коррозионно-изношенных металлоконструкций гидротехнических затворов
Материалы Международной научно-технической конференции RELMAS 2008 Ч.1 . С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2008. - С 8.

23. Козинец Г.Л., Аспекты надежной работы гидротехнических затворов
Материалы Общероссийской научно-технической конференции 2008 Ч.1 . С-Пб.: Изд-во ВНИИГ. 2008. – С 6.

24. Козинец Г.Л., Оценка прочностной надежности коррозионно-изношенных металлоконструкций гидротехнических затворов. Материалы Общероссийской научно-технической конференции 2008 Ч.1 . С-Пб.: Изд-во ВНИИГ. 2008. - С8.

25. Козинец Г.Л., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Ивонтьев А.В. Расчетный анализ состояния турбинных блоков со спиральными камерами Саяно-Шушенской ГЭС и Загорской ГАЭС – Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения» Ч III. «Безопасность гидротехнических сооружений» М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2011 г.с. 160-168.