

На правах рукописи

Новкунский Алексей Александрович

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АГРЕГАТАХ ГЭС  
ПОСЛЕ СБРОСА НАГРУЗКИ

Специальность 05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2010

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В ГОСУДАРСТВЕННОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ  
УЧРЕЖДЕНИИ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор

Умов Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор,

заслуженный деятель науки РФ

Лямаев Борис Федорович;

- кандидат технических наук, доцент

Капинос Ольга Геннадьевна.

Ведущая организация: филиал ОАО «Силловые машины» «ЛМЗ» в Санкт-Петербурге

Защита состоится «02» ноября 2010г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д212.229.09 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, ауд. 225 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «   »                      2010г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н, профессор



Хрусталеv Б.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** К современной гидроэнергетике, как к одной из базовых отраслей экономики, предъявляются строгие и вместе с тем противоречивые требования по обеспечению надежного функционирования гидроагрегатов и одновременному снижению стоимости оборудования и гидротехнических сооружений. Это объясняет важность вопросов выбора минимально необходимых запасов прочности агрегатов и зданий ГЭС с одновременным сохранением их эксплуатационной надежности. Успешное решение этих задач во многом определяется учетом гидромеханических переходных процессов (ПП), происходящих в гидроустановках, среди которых одним из наиболее опасных, является аварийный ПП после сброса нагрузки.

Исследования ПП после сброса нагрузки (СН) позволяют выявить основные закономерности данного процесса и выдать рекомендации по оптимальному регулированию гидроагрегатов. Наиболее достоверные результаты дают натурные экспериментальные исследования СН. Однако возможность их проведения весьма ограничена, учитывая повышенную опасность этих процессов и высокую стоимость подготовки и реализации подобных испытаний. Поэтому большое практическое значение имеют расчетные исследования аварийных ПП и, в частности, расчеты гарантий регулирования. Их целью является проверка и нахождение оптимальных законов регулирования, обеспечивающих, с одной стороны, безопасное давление и разрежение в проточной части, вызванные гидроударом, а с другой – допустимое повышение частоты вращения ротора.

**Цели и задачи работы.** Основные цели данной работы состояли в разработке, апробации и реализации на ПЭВМ усовершенствованной методики ЛПИ для расчета ПП после СН как в высоконапорных радиально-осевых (РО) гидроагрегатах одиночного регулирования, так и в более низконапорных поворотно-лопастных (ПЛ) агрегатах двойного регулирования по их полным статическим характеристикам (ПСХ). Для достижения указанных целей в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ научно-технической литературы по данной тематике.
2. Детальное изучение методики Е.В. Гутовского и нахождение способов ее дальнейшего развития для расчета ПП в высоконапорных турбинах.
3. Разработка усовершенствованной методики, проведение расчетов ПП в РО гидроагрегатах (ГА) и сопоставление расчетных результатов с экспериментальными данными.
4. Оценка адекватности предложенной методики для РО гидротурбин.
5. Анализ и разработка способов учета поворота лопастей при ПП и получения ПСХ для промежуточных значений углов установки лопастей
6. Разработка усовершенствованной методики, проведение расчетов ПП в ПЛ ГА при изменяющихся углах установки лопастей и сопоставление соответствующих расчетных и экспериментальных результатов.
7. Оценка адекватности предложенной методики для ПЛ гидротурбин.
8. Разработка алгоритмов и программ расчета ПП после СН в гидроагрегатах обоих типов.
9. Общая оценка модернизированной методики.

**Методика исследований.** Решение указанных задач осуществлялось в работе путем теоретического и расчетного исследования ПП в ГА после СН с применением ПЭВМ и последующим сопоставлением результатов расчетных исследований с опытными данными.

**Научная новизна.** В работе была разработана усовершенствованная методика ЛПИ для расчета ПП после СН, использующая полные статические характеристики гидротурбин. С целью повышения точности расчетов для исследования ПП в РО агрегатах была применена схема упругого гидроудара, а для расчетов ПП в ПЛ агрегатах двойного регулирования был разработан способ учета движения лопастей РК. Кроме того, существенной модернизацией методики стала ее реализация на ПЭВМ.

**Практическая ценность.** Разработанная методика и программы расчета на ПЭВМ позволяют проводить с высокой скоростью и достаточной точностью серии расчетов ПП в гидроагрегатах различных типов, как одиночно-

го, так и двойного регулирования. Надежность получаемых результатов и доступность в использовании позволяют широко использовать разработанную методику для научных и учебных целей.

**Реализация работы.** Разработанная методика расчета переходных процессов применяется при выполнении научно-исследовательской работы по договору с филиалом ОАО «Силловые машины» - ЛМЗ. Она также используется в учебном процессе кафедры гидромашиностроения СПбГПУ в курсовой и научно-исследовательской работе студентов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на XXXV и XXXVI Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Неделя науки СПбГПУ» в 2007 и 2008 годах, на V и VI Международных научно-технических конференциях «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития» в СПб в 2008 и 2010 годах, на научно-техническом семинаре кафедры гидромашиностроения в июне 2010г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 работ, список которых приведен в конце автореферата.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и семи приложений, содержит 256 страниц машинописного текста, 103 иллюстрации, 54 таблицы. Список использованной литературы включает в себя 108 наименований.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана важность учета переходных процессов, происходящих в ГА, в вопросах повышения надежности работы гидроэнергетического оборудования и одновременного снижения его стоимости. Большую актуальность в этой связи имеет совершенствование расчетных методов исследования переходных процессов, в особенности аварийного ПП после СН.

В первой главе приводится классификация и описание физической сущности гидромеханических ПП в турбинных гидроагрегатах.

В результате обзора публикаций, посвященных изучению ПП в ГА по-

сле сброса нагрузки, была сформулирована физическая сущность данных нестационарных явлений, а анализ существующих методов расчета ПП позволил выявить преимущества и недостатки каждого из них.

Исследованием ПП в ГА занимались многие организации. В их числе ЦКТИ им. И.И. Ползунова, ЛМЗ, институт «Гидроэнергопроект», ОРГРЭС, МГСУ им. В.В.Куйбышева, МЭИ, МВТУ им. Н.Э.Баумана и ЛПИ им. М.И. Калинина. Также исследования ПП проводились во многих зарубежных странах.

Проанализирован ряд работ по исследованию и разработке методов расчета гидроудара – явления, лежащего в основе физики ПП после СН. Следует выделить фундаментальные работы Н.Е. Жуковского и Л. Бержерона. И более поздние - М.А. Мосткова, А.А. Башкирова, Д.Н. Смирнова, Л.Б. Зубова, Л.Н. Картвелишвили, Б.Ф. Лямаева, Г.П. Небольсина, В.А. Нелюбова, Н.В. Арефьева, В.С. Дикаревского, О.Г. Капинос и Н.В. Твардовской.

Одна из наиболее сильных школ нашей страны по расчетам и исследованию ПП в лопастных гидромашинах была создана Г.И. Кривченко в МГСУ им. В.В. Куйбышева. Обобщение результатов многочисленных экспериментальных и расчетных исследований ПП, выполненных под его руководством, позволило разработать расчетные методики, учитывающие реальные характеристики ГА. Наиболее значимые результаты исследований ПП были получены в работах Н.Н. Аршеневского, Е.В. Квятковской, В.М. Клабукова, В.В. Берлина, О.А. Муравьева и других представителей МГСУ.

Одновременно изучением ПП занимались и в ЛПИ им. М.И. Калинина. На кафедре гидромашиностроения Е.В. Гутовским проводились глубокие расчетные и экспериментальные исследования ПП в низконапорных ПЛ гидроагрегатах после СН и была разработана достоверная методика для расчета ПП по ПСХ. Впоследствии Н.И. Зубаревым и В.А. Умовым были продолжены экспериментальные и расчетные исследования ПП в гидротурбинах и обратимых гидромашинах.

На основании анализа технической литературы в первой главе были

сформулированы цели и задачи работы, выбраны объекты исследования.

Во второй главе рассмотрены теоретические вопросы, связанные с расчетом ПП. Приводится описание ПСХ гидроагрегатов различных типов и их особенностей. Освещаются вопросы определения давления в проточной части при переходных процессах по схемам упругого и жесткого гидроудара, распределения давления при наличии двух регулирующих расход органов. Большое внимание уделяется особенностям учета в расчетах неустановившихся режимов и перехода от статических параметров к динамическим, что, в сущности, отличает методику ЛПИ от остальных. В частности, рассматриваются расчетные зависимости для определения динамического значения давления в проточной части и динамического значения момента, приложенного к рабочему колесу. В связи с тем, что в ПЛ агрегатах ПП обладают рядом особенностей, их специфика также освещается в работе: рассмотрены вопросы определения осевых сил, действующих на ротор против направления потока жидкости, вопросы обратного гидроудара и способы оценки вероятности разрыва сплошности потока в проточной части после СН. Кроме того, для ПЛ ГА анализируется возможность вывода их из разгона путем разворота лопастей РК. Все эти особенности были учтены при разработке усовершенствованной расчетной методики, подробное описание которой приводится во второй главе диссертации, а основные положения изложены ниже.

Для расчета ПП в гидроагрегате необходимо совместное решение: а) уравнений движения регулирующих органов, б) уравнения неустановившегося движения жидкости, в) уравнения динамики ротора гидромашины. С учетом использования в качестве уравнения неустановившегося движения жидкости уравнения упругого гидроудара система примет вид:

$$\left. \begin{aligned} a_0^* &= f(t); \\ \frac{dH}{dt} &= \pm \frac{a}{gf} \frac{dQ}{dt} \\ T_a \frac{d\beta}{dt} &= m_{\text{ос}} - m_{\text{comp}} \end{aligned} \right\}.$$

Здесь  $a_0^*$  - безразмерное значение открытия направляющего аппарата (НА);  $t$  - время;  $H$  - напор;  $Q$  - расход;  $a$  - скорость распространения ударной волны в водоводе с учетом упругости жидкости и его стенок;  $f$  - площадь поперечного сечения водовода;  $\beta$  - относительное повышение частоты вращения ротора;  $T_a$  - постоянная времени гидроагрегата, характеризующая инерционность ротора;  $m_{\text{дв}}$ ,  $m_{\text{сопр}}$  - относительные значения движущего момента на валу и момента сопротивления.

Для решения системы уравнений, описывающих процесс после сброса нагрузки в гидроагрегате, вводится ряд упрощений. Неустановившееся движение в реальной проточной части, имеющей сложную конфигурацию, в соответствии с общепринятым подходом, приводится к так называемому эквивалентному трубопроводу постоянного сечения с одномерным потоком в нем. Дифференциальные уравнения заменяются уравнениями в конечных разностях. Для определения относительного повышения давления  $\zeta$  используются конечно-разностные цепные уравнения упругого гидроудара. Осуществляется переход от действительных натуральных параметров к безразмерным относительным величинам. Момент сопротивления после СН принимается равным нулю. Скорость распространения ударной волны определяется по соответствующим расчетным формулам в зависимости от конструктивного исполнения стенок водовода.

Для случая низконапорных ПЛ агрегатов, с учетом их двойного регулирования и применимости схемы жесткого гидроудара, система уравнений в конечных разностях примет вид:

$$\left. \begin{aligned} a_0^* &= a_0^*(t); \\ \varphi &= \varphi(t); \\ \Delta\zeta + \frac{2\Delta t}{q_{\text{ст.ср.}} T_l} \zeta_{\text{ср}} \sqrt{1 + \zeta_{\text{ср}}} &= -\frac{2\Delta q_{\text{ст.}}}{q_{\text{ст.ср.}}} (1 + \zeta_{\text{ср}}); \\ T_a \frac{\Delta\beta}{\Delta t} &= m_{\text{дин.ср}} \end{aligned} \right\}.$$

Здесь  $\varphi$  - угол установки лопастей РК;  $T_l$  - постоянная времени водовода;  $q_{\text{ст}}$  - относительное значение статического расхода;  $m_{\text{дин}}$  - относительное значе-



ние динамического движущего момента на валу. Индекс «*ср*» означает среднее значение величины за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta t$ , а знак  $\Delta$  - изменение соответствующей величины за данный интервал времени.

Так как взаимосвязь между параметрами, входящими в уравнения системы не поддается аналитическому выражению, то расчет по ПСХ ведется методом последовательных приближений, которые выполняются для малых шагов вдоль линии действительного ПП. По закону движения лопаток НА  $a_0 = a_0(t)$  определяется открытие  $a_{0i}$  на каждом этапе расчета. Задаваясь значением приведенной частоты вращения  $n'_{i}$ , по ПСХ определяют значения приведенного расхода  $Q'_{i}$  и момента  $M'_{i}$  на каждом расчетном шаге, а их относительные значения используют в последующих вычислениях.

Переход от статических моментов к динамическим производится на основе анализа изменения удельной энергии основного потока жидкости. Значение динамического момента рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{дин}} = \left[ m_{\text{ст}} + \frac{\chi \zeta a_{\text{ст}}}{(1 + \beta) \eta_0} \right] \sqrt{1 + \chi \zeta},$$

где  $\eta_0$  – КПД в начальном режиме;  $\chi$  – переменный коэффициент, характеризующий переход инерционного напора с рабочего колеса на направляющий аппарат. Величина  $\chi$ , в турбинном режиме равная 1, в режиме гидравлического торможения принимает значение  $\chi_i = \frac{a_{0i}}{a_{0x.x.}}$ , где  $a_{0x.x.}$  – открытие НА, соответствующее режиму холостого хода.

Изменение относительного повышения частоты вращения  $\beta$  за расчетный промежуток времени  $\Delta t$  находится по формуле:

$$\Delta \beta = m_{\text{дин.ср.}} \Delta t / T_a,$$

где среднее безразмерное значение динамического момента на рабочем колесе равно:

$$m_{\text{дин.ср}} = \frac{m_{\text{дин.}i} + m_{\text{дин.}i-1}}{2}.$$

Для полученных расчетом значений  $\zeta_i$  в течение переходного процесса

после сброса нагрузки определяется давление в спиральной камере (СК):

$$H_{ск.i} = H_0 + k_H \zeta_i H_0 - \frac{V_{на0}^2}{2g} q_{сгi} (1 + \zeta_i),$$

где  $V_{на0}$  – средняя скорость перед направляющим аппаратом.

Для расчета величины разрежения в отсасывающей трубе (ОТ) используется формула:

$$H_{ваki} = H_S \pm A'_1 + \frac{V_{от0}^2}{2g} q_{сгi} (1 + \zeta_i) + k_B \zeta_i H_0,$$

где  $H_S$  - высота отсасывания;  $V_{от0}$  – средняя скорость в отсасывающей трубе;  $A'_1$  - расстояние от точки отсчета  $H_S$  до точки, в которой вычисляется  $H_{ваk}$ .

Одной из отличительных особенностей поворотно-лопастных гидроагрегатов является наличие двух действующих одновременно регулирующих расход органов: лопаток НА и поворотных лопастей РК. Как процесс нормального регулирования мощности агрегата, так и переходный процесс после сброса нагрузки, в ПЛ агрегатах сопровождается не только движением лопаток НА по определенному закону, но и разворотом лопастей РК. При этом, поворот лопастей изменяет ПСХ гидромашин.

Для возможности расчета ПП в ПЛ агрегатах с учетом изменяющегося угла установки лопастей было предложено для каждой расчетной точки, которая характеризуется своим углом установки лопастей, использовать свою ПСХ, соответствующую данному углу. При этом, если текущее значение угла отличается от тех значений, для которых имеются достоверные экспериментальные ПСХ (наиболее характерный случай, учитывая малый расчетный шаг), то предлагается получать характеристики для промежуточных углов методом интерполяции, используя имеющиеся характеристики двух ближайших углов, между которыми находится значение текущего угла.

Таким образом, для определения параметров каждой расчетной точки переходного процесса при изменяющемся угле установки лопастей необходимо использовать целый набор пропеллерных ПСХ, количество которых равно числу расчетных точек.

В третьей главе рассматриваются основные этапы решения задачи автоматизации разработанной методики расчета ПП на ПЭВМ. Приводится описание разработанных алгоритмов работы программ, а также их схемы. Поскольку методика ЛПИ предполагает расчет ПП по ПСХ, то для реализации этого способа в компьютерной программе был применен эффективный механизм интерполяции таблично-заданных функций с помощью кубических сплайнов. Данный численный метод подробно рассматривается в третьей главе, где приводится описание работы механизма сплайн-интерполяции на примере построения промежуточных линий постоянной частоты вращения и открытия направляющего аппарата на ПСХ и нахождения их общей точки пересечения. Также в третьей главе приводится руководство по использованию программ расчета ПП в гидроагрегатах одиночного и двойного регулирования. В руководстве отражены правила подготовки и оформления исходных данных для автоматизированных расчетов. В Приложении А дан пример файлов с исходными данными и результатами машинного расчета ПП в ГА Нурекской ГЭС после сброса нагрузки.

Четвертая глава посвящена расчетам по усовершенствованной методике переходных процессов в высоконапорных РО гидроагрегатах после сброса нагрузки. В результате анализа технической литературы и инженерной проработки найденной информации для четырех случаев сброса нагрузки в агрегатах Нурекской и Красноярской ГЭС были подготовлены все необходимые для расчетов данные. По ГА Нурекской ГЭС они приводятся непосредственно в гл. 4, а для Красноярской ГЭС вынесены в Приложение В.

В результате расчетов ПП в РО агрегатах после СН были получены зависимости основных параметров переходных процессов от времени. В графическом виде они представлены в 4 главе, а в табличном – в Приложении С. Для возможности сопоставления на соответствующих графиках вместе с расчетными изображены и экспериментальные кривые изменения величин во времени. В качестве примера на рис. 1 приводится график изменения относительных величин в течение ПП после сброса нагрузки 307 МВт в агрегате

Нурекской ГЭС, полученных расчетом и экспериментально. Помимо графического сравнения, производилось сопоставление результатов по максимальным значениям при ПП, что отражено в таблице №1.

Таблица №1 Результаты расчетов ПП в РО агрегатах и их сопоставление с экспериментальными данными

	ГЭС	Нурекская			Красноярская
Контрольная величина	Начальная мощность (МВт)	307	218	102	500
Максимальное относительное повышение частоты вращения, $\beta$	Эксперимент	0,52	0,28	0,08	0,46
	Расчет	0,4946	0,3005	0,0892	0,393
	абсолют. отклон.	-0,0254	+0,0205	+0,0092	-0,067
	относит. отклонение	-4,88%	+7,32%	+11,50%	-14,5%
Максимальная частота вращения ротора, $n$ (об/мин)	Эксперимент	304	256	216	136,95
	Расчет	298,92	260	217,84	130,66
	абсолют. отклон.	-5,08	+4	+1,84	-6,29
	относит. отклонение	-1,67%	+1,56%	+0,85%	-4,59%
Максимальное давление в спиральной камере, $H_{ск}$ (м. вод.ст.)	Эксперимент	274,6	282,1	273	112,19
	Расчет	275,5	276,8	278,5	111,80
	абсолют. отклон.	+0,9	-5,3	+5,5	+0,39
	относит. отклонение	+0,33%	-1,88%	+2,01%	+0,34%

Анализ расчетных и экспериментальных данных показал их хорошую сходимость, на основании чего был сделан вывод об адекватности усовершенствованной методики.

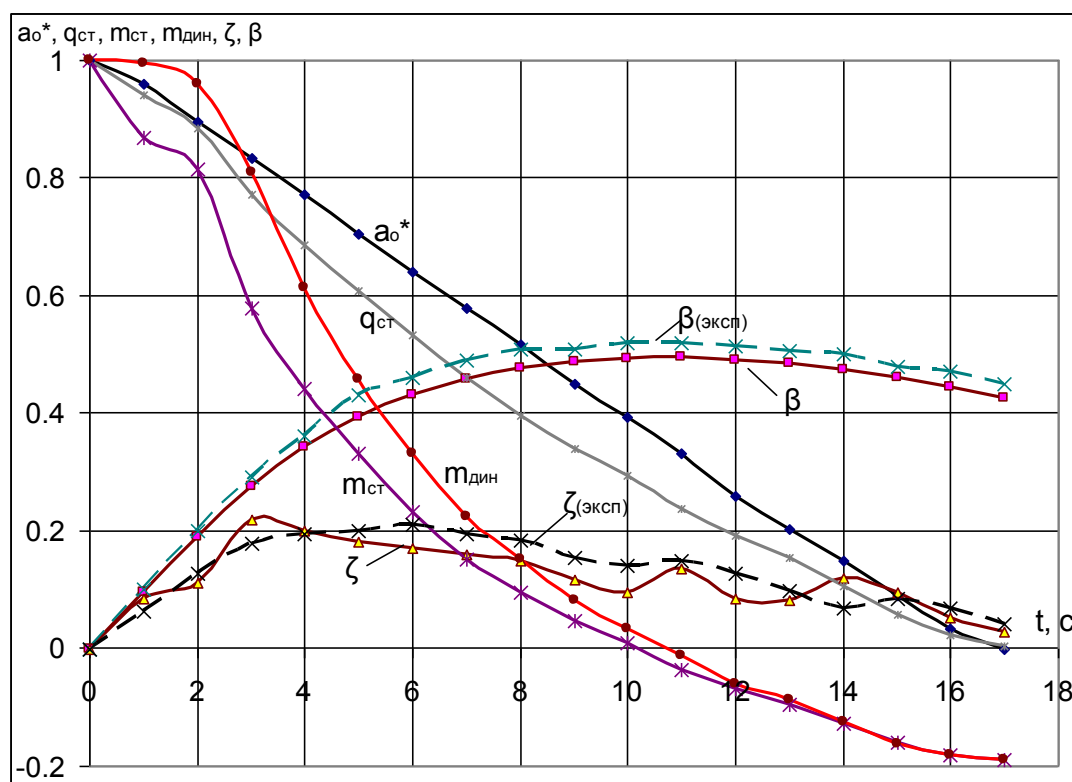


Рис.1 Изменение относительных величин в течение ПП после сброса нагрузки 307 МВт в агрегате Нурекской ГЭС (- -х- - эксперимент, — расчет)

В пятой главе рассмотрены расчеты ПП в ПЛ гидроагрегатах. Для оценки достоверности усовершенствованной методики, учитывающей двойное регулирование, были подготовлены исходные данные и проведены соответствующие им расчеты ПП в ПЛ агрегатах после сброса нагрузки. В этом случае объектами исследования были агрегаты Горьковской, Каховской и Иркутской ГЭС. Всего было рассмотрено 11 случаев сброса нагрузки в широком диапазоне изменения основных гидромеханических параметров агрегатов. Этап подготовки исходных данных для расчетов был весьма длительным и трудоемким. Помимо проработки начальных гидромеханических параметров агрегатов, необходимо было подготовить большое количество пропеллерных ПСХ турбин, которые, в отсутствие экспериментальных, приходилось получать пересчетом с пропеллерных характеристик и их последующей экстраполяцией. Результаты этапа подготовки начальных данных приводятся как в главе 5 (для Горьковской ГЭС), так и в Приложениях D, E, F (для остальных двух ГЭС).

Полученные результаты расчетов ПП (приводятся в главе 5 и Приложении G) сопоставлялись с экспериментальными данными графически и аналитически по максимальным значениям контролируемых величин в течение ПП. В качестве примера на рис. 2 приводится график изменения давления в спиральной камере и разрежения в отсасывающей трубе для значений, полученных расчетом и экспериментально. В ходе испытаний были зафиксированы только максимальные значения разрежения в ОТ  $H_{om}$ . Для зрительного сопоставления экспериментальные значения показаны на графиках условно прямыми линиями. В таблице №2 приводятся максимальные значения контролируемых величин, полученные расчетом и при испытаниях, и их оценка.

На основе анализа полученных результатов был сделан вывод о достаточной достоверности разработанной усовершенствованной методики для ПЛ турбин и надежности расчетов по ней. Некоторые расхождения в результатах объясняются неточностью исходных данных и, в особенности, ПСХ, построенных приближенно на значительной области характеристики.

Таблица №2 Результаты расчетов ПП в ПЛ агрегатах и их сопоставление с экспериментом

ГЭС	Начальная мощность (МВт)	Контрольная величина							
		Максимальное относительное повышение частоты вращения $\beta$				Максимальная частота вращения ротора $n_{max}$ (об/мин)			
		Эксперимент	Расчет	абсолют. отклон.	относит. отклон.	Эксперимент	Расчет	абсолют. отклон.	относит. отклон.
Горьковская	44	0,344	0,389	+0,045	+11,5%	84.00	86.81	+2.81	+3.35%
	28,4	0,272	0,247	-0,025	-9,2%	79.50	77.94	-1.56	-1.97%
Каховская	48	0,393	0,376	-0,017	-4,3%	87.06	86.00	-1.06	-1.22%
	40	0,32	0,2601	-0,059	-18,7%	82.50	78.76	-3.74	-4.54%
	26	0,22	0,1803	-0,0397	-18%	76.25	73.77	-2.48	-3.25%
	13	0,1	0,0898	-0,0102	-10%	68.75	68.11	-0.64	-0.93%
Иркутская	84,3	0,346	0,3401	-0.0059	-1,7%	112.12	111.63	-0.49	-0.44%
	62	0,231	0,2312	+0,0002	+0,08%	102.54	102.56	+0.02	+0.02%
	45	0,176	0,194	+0,018	+10,2%	97.96	99.46	+1.50	+1.53%
	35	0,146	0,1501	+0,0041	+2,8%	95.46	95.80	+0.34	+0.36%
	20	0,08	0,086	+0,006	+7,5%	89.96	90.46	+0.50	+0.56%

продолжение табл. №2

ГЭС	Начальная мощность (МВт)	Контрольная величина						
		Максимальное давление в спиральной камере $H_{ск}$ (м. вод.ст.)				Максимальное разрежение в отсасывающей трубе $H_{от}$ (м.вод.ст.)		
		Эксперимент	Расчет	абсолют. отклон.	относит. отклон.	Эксперимент	Расчет	абс. отклон.
Горьковская	44	12.61	13.65	+1,04	+7,6%	1,22	0.77	-0.45
	28,4	11,98	12,87	+0,89	+6,9%	-1,11	-3,27	-2.16
Каховская	48	15,3	15,68	+0,38	+2,5%	5,9	4,98	-0.92
	40	13,8	15,03	+1,23	+8,9%	2,75	3,27	+0.52
	26	13,7	14,65	+0,95	+6,9%	0,5	0,81	+0.31
	13	13,6	13,9	+0,3	+2,2%	0	-0,52	-0.52
Иркутская	84,3	31,6	30,57	-1,03	-3,25%	8,1	6,06	-2.04
	62	24,72	25,01	+0,29	+1,17%	7,5	6,34	-1.16
	45	24,14	25,12	+0,98	+4,06%	3,6	2,86	-0.74
	35	22,9	23,99	+1,09	+4,75%	3,2	1,32	-1.88
	20	22,54	23,62	+1,08	+4,8%	0,8	-0,01	-0.81

продолжение табл. №2

ГЭС	Начальная мощность (МВт)	Контрольная величина			
		Максимальная осевая сила в РГТ $P_{oc}$ (МН)			
		Эксперимент	Расчет	абсолют. отклон.	относит. отклон.
Горьковская	44	-5,60	-5,0	-0.6	-10.71%
	28,4	-5,60	-5,0	-0.6	-10.71%
Каховская	48	-2,6	-2,65	+0.05	+1.92%
	40	-3,25	-2,65	-0.6	-18.46%
	26	-2,6	-2,65	+0.05	+1.92%
	13	-3,5	-2,65	-0.85	-24.29%
Иркутская	84,3	-3,7	-4,01	+0.31	+8.38%
	62	-3,7	-4,01	+0.31	+8.38%
	45	-3,96	-4,01	+0.05	+1.26%
	35	-4,20	-4,01	-0.19	-4.52%
	20	-3,48	-4,01	+0.53	+15.23%

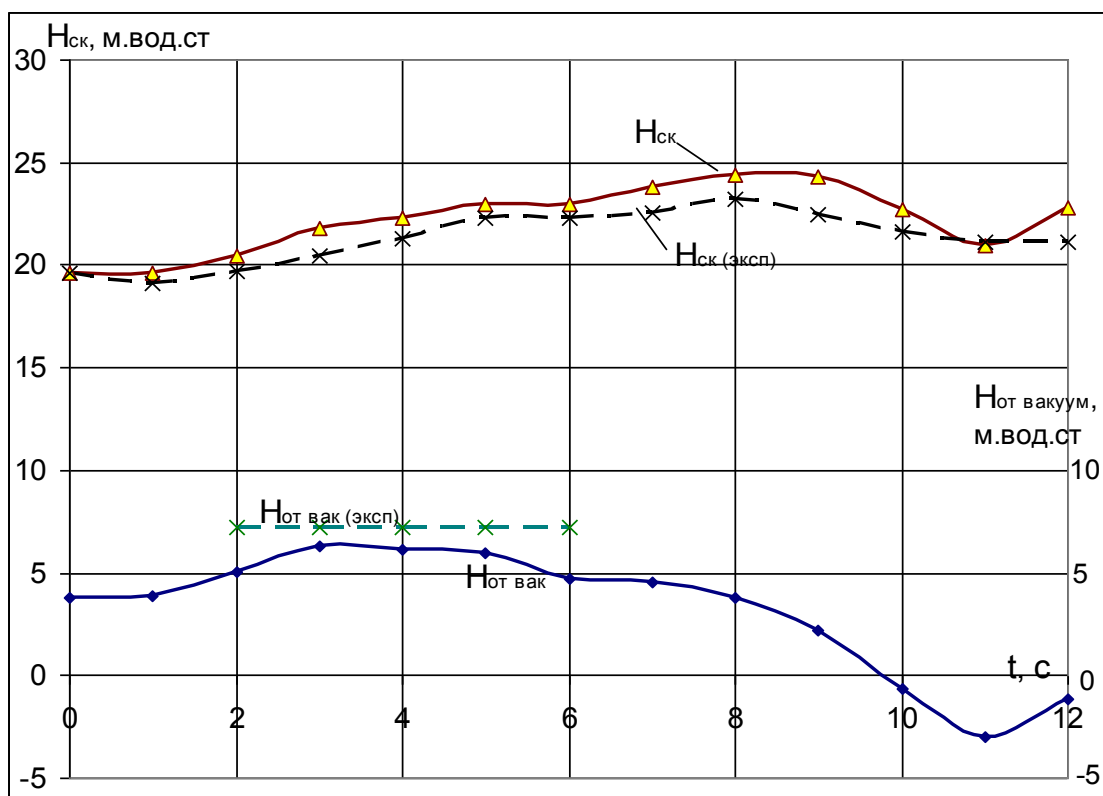


Рис. 2 Изменение давления и разрежения в проточной части в течение ПП после СН 62 МВт в агрегате Иркутской ГЭС (- -х- - эксперимент, — расчет)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ технической литературы позволил выявить преимущества и недостатки многочисленных методик по расчету ПП в гидроагрегатах после СН. Одной из наиболее достоверных и перспективных в плане модернизации была признана методика Е.В. Гутовского для расчета ПП после СН по ПСХ.

2. Для расчета ПП в высоконапорных РО гидроагрегатах методика ЛПИ была усовершенствована за счет применения схемы упругого гидроудара.

3. По усовершенствованной методике была проведена серия расчетов ПП в РО агрегатах после СН на условия, соответствующие испытаниям на натуральных ГА. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало их хорошую сходимость. Так, значения относительного отклонения величины  $\beta$  находились в диапазоне от 4,9% до 14,5%. Относительные отклонения максимального давления в СК изменялись от 0,3% до 2%. Характер изменения указанных величин во времени был идентичен для расчетных и экспериментальных кривых. На основании чего был сделан вывод о

достоверности усовершенствованной методики для расчетов ПП в РО агрегатах.

4. Для возможности расчета ПП в ПЛ агрегатах после сброса нагрузки при закрытии лопаток НА и одновременном движении лопастей РК была разработана усовершенствованная методика, учитывающая двойное регулирование этих машин. Был разработан способ получения и использования в расчетах пропеллерных ПСХ, соответствующих произвольным значениям углов установки лопастей.

5. Для апробации методики была проведена серия расчетов ПП после СН для широкого диапазона изменения начальных гидромеханических параметров. Сопоставление расчетных результатов с экспериментальными показало следующее. Относительное отклонение величины  $\beta$  находилось в пределах от 0,08% до 18,7%. Относительные отклонения максимального давления в СК укладывались в диапазон от 1,2% до 8,9%. Сравнение формы расчетных и экспериментальных кривых изменения указанных величин во времени показало их идентичность. Оценка сходимости результатов по уровню разрежения в ОТ производилась только по максимальным значениям ввиду отсутствия экспериментальных кривых. Абсолютные отклонения  $\Delta H_{от\ ваку}$  находились в пределах от 0,3 м.в.ст. до 2,2 м.в.ст., что для инженерной практики можно считать достаточным. Ввиду отсутствия характеристик осевой силы, в расчетах приближенно по номограмме оценивались максимальные значения взвешивающего усилия при закрытом НА. Тем не менее, сравнение с экспериментальными данными показало их неплохую сходимость. Так, минимальное относительное отклонение значения осевой силы составило всего  $\delta P_{ос} = 1,3\%$ , еще в двух случаях отклонение было менее 2%. Максимальное отклонение оказалось равным 25%. Констатируя удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов по всем основным параметрам ПП можно сделать вывод о достоверности усовершенствованной методики и надежности результатов расчетов.

6. Для облегчения и ускорения проведения расчетов на основе усовер-



шенствованной методики были разработаны алгоритмы и соответствующие им программы расчета ПП на ПЭВМ для агрегатов одиночного и двойного регулирования. Для возможности проведения расчетов по экспериментальным кривым ПСХ, не прибегая к их линеаризации, в программах использовался высокоэффективный механизм сплайн-интерполяции. В результате последовательной отладки и апробации программ была достигнута достаточная адекватность их работы принятым схемам расчета, подтверждаемая сходимостью результатов ручных и машинных расчетов.

7. Усовершенствованную методику можно рекомендовать к применению для инженерных, научных и учебных целей. Затраты времени на подготовку исходных данных компенсируются надежностью получаемых результатов и скоростью проведения автоматизированных расчетов. Применение ПЭВМ позволяет решать не только прямую задачу определения гарантий регулирования, но и обратную задачу, связанную с определением законов движения регулирующих расход органов гидротурбины при заданных отклонениях интересующих параметров. Оптимальные законы регулирования могут быть найдены путем их варьирования и проведения серии расчетов до достижения необходимых значений заданных параметров. Особый интерес это представляет в ПЛ ГА, где параметры ПП зависят не только от закона закрытия НА, но и от характера изменения угла установки лопастей РК.

8. Целесообразно продолжение исследований по следующим перспективным направлениям:

8.1. Апробация применения разработанной методики на других типах ГА – диагональных ПЛ машинах и обратимых гидроагрегатах ГАЭС.

8.2. Решение задачи оптимизации законов регулирования, т.е. автоматизация решения обратной задачи расчета гарантий регулирования с учетом реальных характеристик всего гидроагрегата и его системы управления.

8.3. Доработка программного продукта, т.е. совершенствование его интерфейса, повышение удобства использования, а также внедрение возможности адаптации программы под задачи конкретных исследований.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Новкунский А.А., Умов В.А. Обзор методов расчета переходных процессов в гидравлических турбинах и насос-турбинах при сбросе нагрузки // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всерос. межвуз. научн.-техн. конф. студ. и асп. Ч. II / СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. - с. 58–59.
2. Новкунский А.А., Умов В.А. Разработка и отладка программы расчета на ПЭВМ переходных процессов в гидротурбоагрегатах после сброса нагрузки // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всерос. межвуз. научн.-техн. конф. студ. и асп. Ч. II / СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. - с. 30–31.
3. Новкунский А.А., Умов В.А. Автоматизация методики расчета аварийных переходных процессов в гидротурбоагрегатах // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: Труды V Междунар. научн.-техн. конф./ СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. - с. 102-112.
4. **Новкунский А.А., Умов В.А. Усовершенствованный способ расчёта гарантий регулирования гидроагрегатов ГЭС // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Наука и образование. – 2009. - №3 (84). – с. 83-87.**
5. Новкунский А.А., Умов В.А. Особенности переходных процессов после сброса нагрузки в осевых поворотнолопастных гидроагрегатах // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник научных трудов 6-й Междунар. научн.-техн. конф./ СПбГПУ. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - с.117-127.