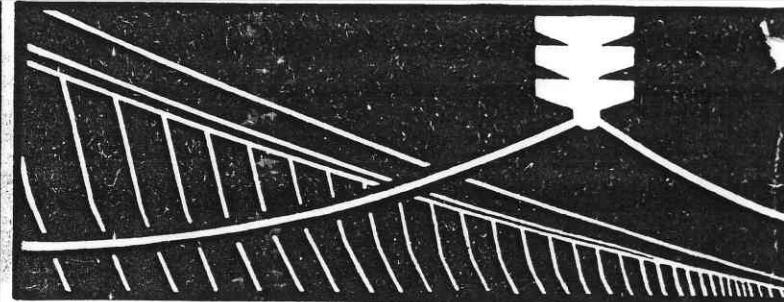


45 к.

Г. И. КРИВЧЕНКО

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ



**РАСЧЕТЫ
НА МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРАХ
ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ
В ГИДРО-
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Г л а в а 1. Виды переходных процессов в гидроэлектростанциях и задачи их расчетов	5
1.1. Задачи расчетов переходных процессов	5
1.2. Оперативные процессы при нормальных условиях эксплуатации	6
1.3. Аварийные переходные процессы	11
Г л а в а 2. Работа с программируемыми микрокалькуляторами при расчетах переходных процессов	14
2.1. Выполнение расчетов по готовым программам	14
2.2. Составление программ	19
Г л а в а 3. Расчеты гидравлического удара без учета упругих деформаций	25
3.1. Основные расчетные соотношения	25
3.2. Коэффициент инерционности проточного тракта гидромашины	28
3.3. Алгоритм вычислений и программа расчета гидравлического удара ГУ-Ж(3)	30
3.4. Приведение напорных водоводов	35
3.5. Определение давления за рабочим колесом гидромашины при переходных процессах	36
Г л а в а 4. Расчеты гидравлического удара с учетом упругих деформаций	41
4.1. Основные расчетные соотношения	41
4.2. Формулы для определения H и Q	48
4.3. Программы ГУ-У расчета гидравлического удара с учетом упругости	50
4.4. Приведение напорных водоводов	53
4.5. Рекомендации по использованию программ ГУ-У	55
4.6. Распределение динамического напора по длине напорного водовода	60
Г л а в а 5. Переходные процессы ГЭС и ГАЭС с учетом характеристик гидромашин	61
5.1. Постановка задачи и выбор расчетных зависимостей	61
5.2. Построение приведенной моментной характеристики гидромашины	65
Г л а в а 6. Переходные процессы при работе гидроагрегата в энергосистеме	70
6.1. Порядок расчетов	70
6.2. Программа НАГР-Ж расчетов гидравлического удара без учета упругости	71
6.3. Программа НАГР-ЖМ	79
6.4. Особенности расчетов переходных процессов для гидроагрегатов с поворотно-лопастными турбинами	80
6.5. Программы НАГР-У расчетов гидравлического удара с учетом упругости	84
Г л а в а 7. Переходные процессы при внезапных отключении гидроагрегатов от энергосистемы	93
7.1. Особенности расчетов процессов при отключениях гидроагрегатов	93
7.2. Программа СБРОС-Ж без учета упругости	95
7.3. Программы СБРОС-У с учетом упругости	103
Г л а в а 8. Расчеты колебаний в напорных системах ГЭС и ГАЭС с уравнительными резервуарами	112
8.1. Содержание задачи и выбор расчетных зависимостей	112
8.2. Программа УР-1 для цилиндрических и камерных резервуаров	116
8.3. Блок непрерывного счета	123
8.4. Дифференциальные уравнительные резервуары. Программа УР-2	126
8.5. Блок непрерывного счета к программе УР-2	134
Список литературы	137



БИБЛИОТЕКА ГИДРОТЕХНИКА И ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Выпуск 94

Основана в 1967 году

Г. И. КРИВЧЕНКО

РАСЧЕТЫ НА МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРАХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРО- ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1989

ББК 31.57

К82

УДК 621.311.21.018.782.3.001.24:681.3-181.48

Редакционная коллегия:

Ю.С. Васильев, А.К. Вахрамеев, Г.И. Кривченко, В.Л. Куперман, Л.П. Михайлов, А.Ш. Резниковский, В.С. Серков, С.М. Слисский, И.Б. Соколов, Л.А. Толкачев

Рецензент канд. техн. наук М.Г. Тягунов

Кривченко Г.И.

К82 Расчеты на микрокалькуляторах переходных процессов в гидроэлектростанциях. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 136 с.: ил. — (Б-ка гидротехника и гидроэнергетика; Вып. 94).

ISBN 5-283-01974-8

Рассматривается применение программируемых микрокалькуляторов "Электроника Б3-34", "Электроника МК-52" и др. для расчетов гидромеханических переходных процессов в гидроэлектростанциях. Приведены математические формулировки задач, алгоритмы решений, полные тексты программ для характерных случаев, инструкции по их использованию и примеры.

Предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией ГЭС, а также для студентов гидроэнергетических специальностей вузов.

К 3302000000-041
051 (01)-89

ББК 31.57

Производственное издание

Григорий Израилевич Кривченко

РАСЧЕТЫ НА МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРАХ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Редактор издательства Э.Н. Полякова. Редактор обложки Б.Н. Тумин

Художественные редакторы Б.Н. Тумин и Т.Н. Хромова

Технический редактор Е.В. Пронь, Корректор Е.В. Кудряшова

ИБ № 2626

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 21.12.88.
T-22628. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная №2. Печать офсетная. Усл. печл. 8,33. Усл.кр.-отт. 8,69. Уч.-изд.л. 8,88. Тираж 1545 экз. Заказ 4572. Цена 45 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Московской типографии № 9 МПО "Всесоюзная книжная палата"
Госкомиздата СССР.
109033, Москва, Волочаевская ул., 40.

ISBN 5-283-01974-8

© Энергоатомиздат, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Расчеты гидромеханических переходных процессов, возникающих в нормальных эксплуатационных режимах и аварийных условиях, являются важной составной частью проектирования и эксплуатации гидроэлектростанций (ГЭС и ГАЭС). При этом рассматривается математическая модель гидромеханической системы в форме алгебраических выражений, дифференциальных уравнений, обыкновенных и частных производных, а также различных зависимостей, представляющих краевые условия, некоторые из которых могут задаваться даже в форме графиков, например характеристики гидроагрегатов. Основным требованием является достаточная адекватность модели реальным свойствам системы и условиям ее функционирования.

Наиболее полно и успешно расчеты переходных процессов в ГЭС и ГАЭС с учетом указанных требований осуществляются с помощью универсальных ЭВМ по специально разработанным программам. Однако разработка, отладка и использование таких программ доступны лишь специализированным организациям.

При проектировании и эксплуатации гидроэлектростанций продолжают использовать ранее разработанные численные графические или аналитические расчетные способы, либо отличающиеся громоздкостью и трудоемкостью, либо требующие значительного упрощения задачи за счет отказа от учета ряда влияющих факторов. Но в настоящее время возможно выполнение расчетов и анализа гидромеханических переходных процессов с использованием программируемых микрокалькуляторов различных типов, например "Электроника Б3-34", "Электроника МК-54", "Электроника МК-56" и более позднего выпуска, дающего большие возможности, "Электроника МК-61", "Электроника МК-52" (последний может сохранять набранную программу после отключения), получивших большое распространение и доступных широкому кругу специалистов. Несмотря на то что микрокалькуляторы по сравнению с универсальными ЭВМ имеют ограниченные возможности в быстродействии и объеме памяти и что из-за отсутствия печатающего устройства — принтера при работе с ними приходится производить записи, их использование значительно повышает эффективность расчетов переходных процессов как по учету наибольшего числа влияющих факторов и полноты решения задачи, так и по производительности труда. Немаловажное значение имеет и то, что навык работы с программируемыми микрокалькуляторами позволяет легко перейти на работу с персональными

и другими универсальными ЭВМ, так как структура алгоритмов решения задач сохраняется, а перевод программы с кодового языка микрокалькулятора на используемый для ЭВМ других классов алгоритмический язык (например, Бейсик) не сложен.

Цель данной книги – оказать практическую помощь в использовании программируемых микрокалькуляторов для расчетов переходных процессов в ГЭС и ГАЭС. Она состоит из восьми глав и содержит обзор видов переходных процессов, значение их расчетов для проектирования и эксплуатации, а также краткие сведения о работе с программируемыми микрокалькуляторами как при наличии готовых, так и при составлении и отладке новых программ. Приведены математическая формулировка рассматриваемых задач, их запись при численном решении и алгоритмы вычислений. Даются программы расчетов гидравлического удара в напорных водоводах, переходных процессов гидроагрегатов ГЭС и ГАЭС с учетом реальных характеристик гидравлических машин, колебаний уровней воды в напорных водоводах с уравнительными резервуарами. Все перечисленные задачи объединены тем, что их решение производится пошаговым расчетом с некоторым интервалом времени; причем, учитывая реальные возможности микрокалькуляторов, автоматизацию вычислений осуществляют в основном в пределах шага счета. Все программы сопровождаются числовыми (тестовыми) примерами, которые должны облегчить их применение, а также используются для анализа влияния отдельных факторов. Следует иметь в виду, что хотя приведенные программы и дают решение поставленных задач, но они не всеобъемлющи и в процессе работы могут видоизменяться, расширяться и совершенствоваться самим пользователем в соответствии с особенностями задачи и применительно к используемому типу микрокалькулятора.

В книге дан достаточно широкий охват задач, важных для проектирования и эксплуатации ГЭС и ГАЭС, что позволяет специалистам с минимальными затратами труда и времени получать нужные решения с использованием современной вычислительной техники. Это будет способствовать росту эффективности работы и, что особенно важно, повышению научного уровня проектирования и эксплуатации. Книга может быть также полезна и как практическое пособие для студентов гидротехнических специальностей вузов.

При подготовке настоящего издания использован опыт применения микроЭВМ для расчетов гидромеханических процессов в МИСИ им. В.В. Куйбышева, а также учтены разработки, выполненные Среднеазиатским отделением института "Гидропроект".

Автор выражает благодарность рецензенту канд. техн. наук М.Г. Тягунову за внимательный просмотр рукописи и полезные рекомендации.

Все пожелания по книге прошу направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

Глава 1

ВИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ И ЗАДАЧИ ИХ РАСЧЕТОВ

1.1. Задачи расчетов переходных процессов

При проектировании и эксплуатации ГЭС и ГАЭС необходимо уделять особое внимание гидромеханическим переходным процессам, так как они определяют: повышенные динамические нагрузки, возникающие в водоводах, проточном тракте гидравлических машин и проявляющиеся в форме гидравлического удара; наибольший размах колебаний уровня в уравнительных резервуарах; предельные обратные осевые усилия, вызывающие опасность подъема врачающихся частей вертикальных гидроагрегатов с осевыми турбинами; максимальный вакуум в отсасывающей трубе, сопровождающийся опасностью разрыва сплошности течения и возникновения обратного гидравлического удара. При процессах, следующих за сбросом нагрузки с гидроагрегатов, работающих в генераторном режиме, наблюдается увеличение частоты вращения, нормируемое как показатель "гарантий регулирования", а при отключении от сети гидроагрегата ГАЭС, работающего в насосном режиме, создается резкое понижение давления в верховых водоводах, которое может быть опасным из-за возможного разрыва сплошности течения и возникновения прямого гидравлического удара при смыкании каверн.

Отмеченные явления в основном определяются геометрией напорного тракта, характеристиками гидроагрегатов и режимами их регулирования. В связи с этим на всех стадиях проектирования ГЭС и ГАЭС требуется выполнять значительный объем расчетов переходных процессов, для выбора схемы сооружений и размеров верховых и низовых напорных водоводов, проверки необходимости сооружения уравнительных резервуаров и назначения их конструктивных форм и параметров, проверки гарантий регулирования и обоснования требуемых значений маховых масс гидроагрегатов и решения других вопросов.

При эксплуатации станции расчеты переходных процессов выполняются для улучшения режимов регулирования, например с целью повышения надежности и исключения опасности подъема врачающихся частей гидроагрегатов с осевыми турбинами, определения быстродействия изменения мощности гидроагрегата и выбора оптимальных режимов регулирования. Иногда возникает возможность повысить номинальную

мощность гидроагрегатов (произвести их "перемаркировку") и всей станции за счет использования резервов гидросилового и электрического оборудования, что также требует тщательной проверки протекания переходных процессов.

Имеющийся опыт проектирования и эксплуатации многих гидроэлектростанций показывает, что глубокое исследование переходных процессов дает возможность оптимизировать напорную систему и получить значительный технико-экономический эффект.

1.2. Оперативные процессы при нормальных условиях эксплуатации

Для гидроагрегатов, работающих в генераторном режиме, характерными являются процессы пуска и остановки, которые осуществляются, как правило, поагрегатно, и процессы изменения нагрузки, которые могут осуществляться как отдельными гидроагрегатами (увеличение нагрузки после пуска или уменьшение нагрузки для остановки), так и группой или даже всеми агрегатами станции при автоматическом управлении от центрального регулятора. В последнем случае изменение нагрузки всей группы осуществляется только в пределах так называемого регулировочного диапазона гидромашин, который для радиально-осевых турбин составляет от 100 до 50–60 %, а для поворотно-лопастных турбин от 100 до 25–35 % мощности.

Для агрегатов ГАЭС с обратимыми гидромашинами (насостурбинами) добавляются еще процессы пуска в насосный режим работы и остановки из насосного режима (регулирование подачи изменением открытия направляющего аппарата, как правило, не производится, а открытие его устанавливается в соответствии с напором из условия максимума КПД).

В периоды, когда гидроагрегаты не работают в турбинном или насосном режиме, часто предусматривается их использование в режиме синхронного компенсатора для выработки реактивной мощности. При этом с целью снижения потребления активной мощности осуществляется отжим воды из полости рабочего колеса сжатым воздухом. Поскольку при работе в режиме синхронного компенсатора гидроагрегатключен в сеть, имеется возможность перейти из этого режима очень быстро (за 10–15 с) в генераторный режим с полной нагрузкой или в насосный в зависимости от направления вращения агрегата.

Показатели некоторых оперативных процессов приведены ниже.

Пуск гидроагрегата в турбинный режим работы (рис. 1.1, а). После завершения предварительных операций (открытие затвора, включение охлаждения и др.) направляющий аппарат открывается до пускового открытия $a_{\text{пуск}}$, которое больше открытия холостого хода $a_{x,x}$. Частота вращения возрастает от 0 до синхронной с сетью, открытие направляющего аппарата уменьшается до $a_{x,x}$, и при этом производится синхронизация и включение генератора в сеть.

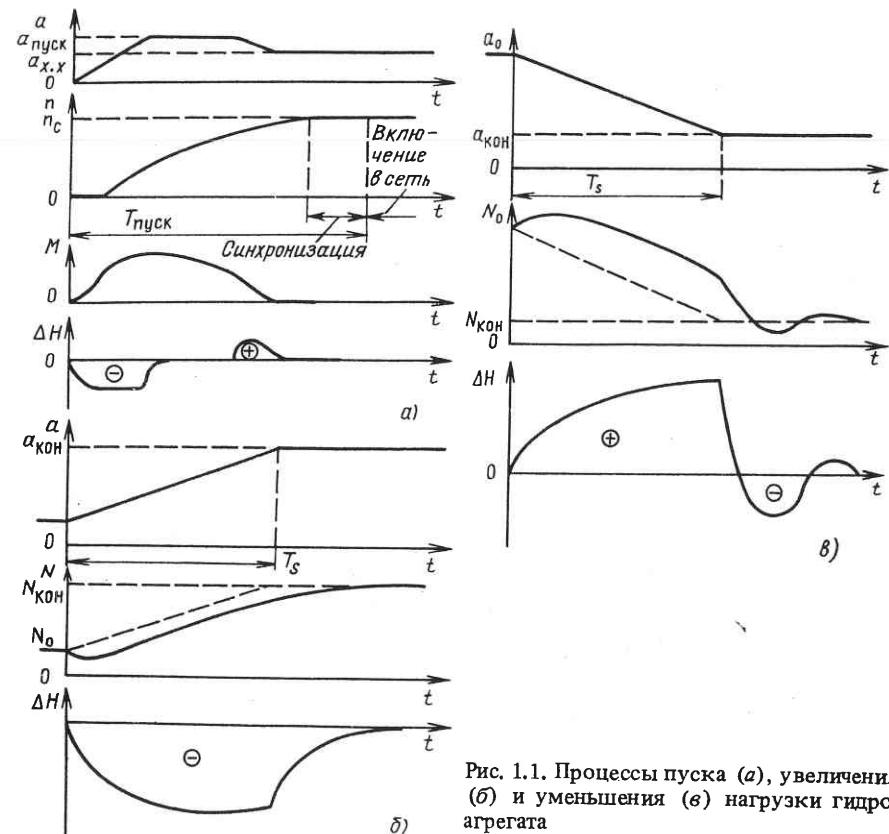


Рис. 1.1. Процессы пуска (а), увеличения (б) и уменьшения (в) нагрузки гидроагрегата

Основным показателем процесса является время пуска $T_{\text{пуск}}$.

У поворотно-лопастных турбин кроме открытия направляющего аппарата $a_{\text{пуск}}$ оказывает воздействие на процесс и угол установки лопастей рабочего колеса $\varphi_{\text{пуск}}$. Здесь возможно нахождение оптимальных соотношений. При этом основными критериями являются время пуска $T_{\text{пуск}}$ и обеспечение достаточно малой осевой гидродинамической нагрузки на рабочее колесо для улучшения условий работы подшипника. С этой целью пусковой угол $\varphi_{\text{пуск}}$ принимают равным $+15^\circ$, $+10^\circ$, ..., т.е. значительно больше, чем соответствует комбинаторным режимам при малых открытиях направляющего аппарата (разворот лопастей на пусковой угол обычно осуществляется в конце процесса остановки гидроагрегата).

Изменение нагрузки гидроагрегатов. Гидроагрегаты ГЭС и ГАЭС не только обеспечивают покрытие графика нагрузки энергосистемы, но и выполняют функцию высокоманевренной мощности. В связи с

этим важным их эксплуатационным показателем является быстродействие по изменению мощности. Поэтому переходные процессы изменения нагрузки гидроагрегатов рассматриваются при предельных установленных скоростях смещения регулирующих органов гидромашин. Естественно, что в этих условиях появляются наибольшие динамические воздействия, проявляющиеся в форме гидравлического удара.

На рис. 1.1, б, в даны показатели переходных процессов при увеличении и уменьшении нагрузки гидроагрегата. Кривые $a(t)$ представляют регулирующее воздействие в виде изменения открытия направляющего аппарата от начального значения a_0 до конечного $a_{\text{кон}}$. В результате этого воздействия изменяется мощность $N(t)$ и увеличивающийся расход вызывает гидравлический удар $\Delta H(t)$ в напорных водоводах и проточном тракте гидромашины, который приводит к временному падению напора турбины. Здесь важно отметить, что гидравлический удар всегда действует на мощность в направлении, противоположном воздействию открытия, что приводит к отставанию изменения мощности, т.е. к снижению быстродействия регулирования. Это видно по отклонению кривых $N(t)$ от пунктирных линий, соответствующих изменению мощности при постоянстве напора, т.е. без воздействия гидравлического удара.

Характерной особенностью процессов изменения нагрузки является то, что они протекают при практически постоянной частоте вращения гидроагрегата.

Остановка гидроагрегата (рис. 1.2). После подачи импульса на остановку направляющий аппарат закрывается, $a(t) = 0$. Пройдя открытие холостого хода $a_{x.x}$, при котором момент рабочего колеса $M(t)$ достигает нулевого значения, генератор отключается от сети (отключение часто осуществляют при $a = a_{x.x}$, когда $M > 0$). После этого частота вращения начинает снижаться ($M < 0$ – тормозной режим работы гидромашины), и после уменьшения примерно на 50 % включаются тормоза и гидроагрегат быстро останавливается. Изменение гидравлического удара $\Delta H(t)$ происходит так же, как при уменьшении нагрузки.

В случае поворотно-лопастных турбин существенное влияние на процесс оказывает и изменение угла установки лопастей рабочего колеса φ . На рис. 1.2 штриховой линией показаны комбинаторные значения угла $\varphi_{\text{комб}}$, соответствующие открытию $a(t)$. Однако поскольку относительная скорость изменения φ обычно в 2–4 раза ниже скорости изменения a , то возникает рассогласование комбинаторной зависимости и фактическое изменение угла установки лопастей идет по кривой $\varphi(t)$ (сплошная линия на рис. 1.2). В момент времени t_n включается устройство разворота лопастей на пусковой угол $\varphi_{\text{пуск}}$.

Большое практическое значение имеет изменение осевого гидродинамического усилия рабочего колеса P_r . С уменьшением открытия направляющего аппарата и частоты вращения гидроагрегата P_r снижается

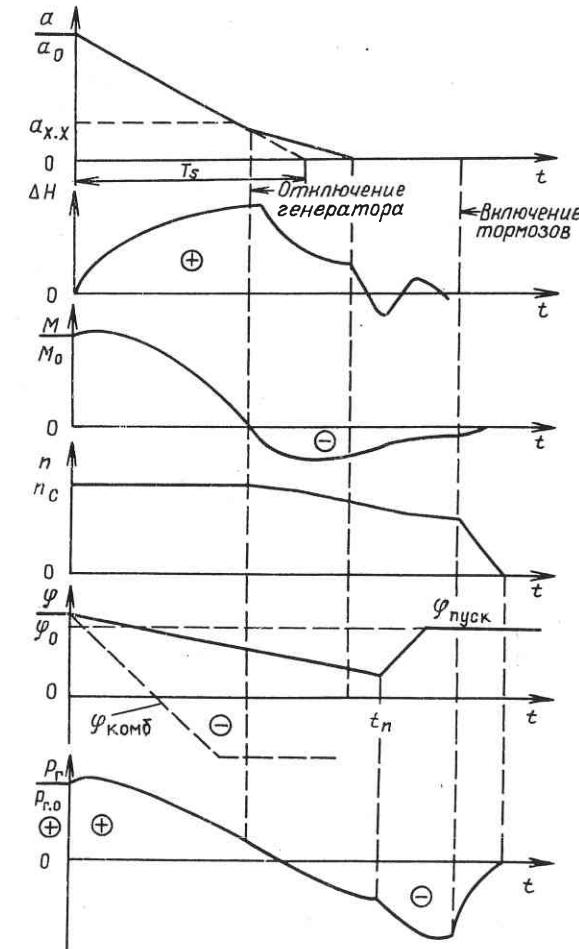


Рис. 1.2. Процесс остановки гидроагрегата

и в области тормозных режимов приобретает отрицательное значение (обратное направление, вверх), т.е. действует против силы, приложенной к массе вращающихся частей гидроагрегата (рабочее колесо, ротор генератора). Поскольку увеличение угла установки лопастей φ приводит к возрастанию обратных гидродинамических усилий, то после момента времени t_n с разворотом лопастей на пусковой угол они резко увеличиваются. В случае, если обратные усилия рабочего колеса P_r превышают вес вращающихся частей гидроагрегата, то произойдет их подъем, что обычно приводит к поломкам и необходимости аварийной остановки гидроагрегата. В связи с этим требуется выбрать такой режим

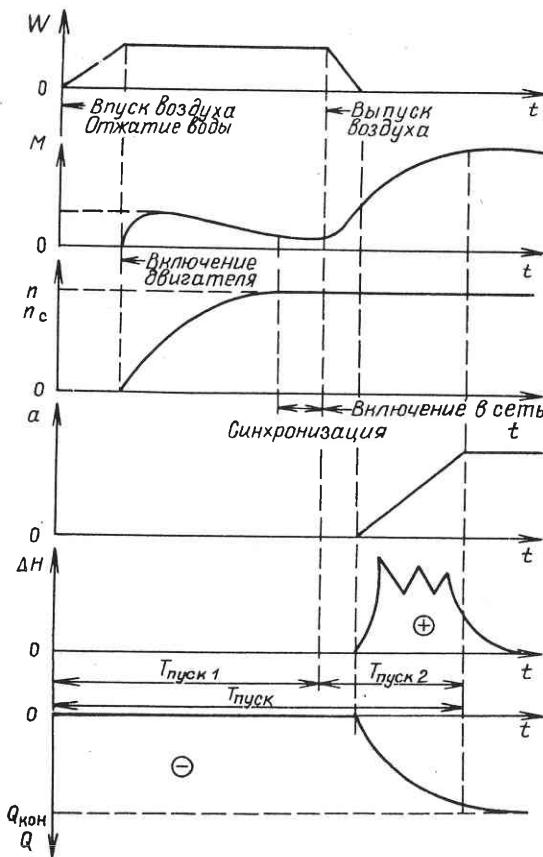


Рис. 1.3. Процесс пуска обратимого гидроагрегата в насосный режим работы

остановки и, в частности, момент времени t_n , при котором исключается опасность подъема вращающихся частей гидроагрегата.

Пуск обратимого гидроагрегата ГАЭС в насосный режим работы (рис. 1.3). Он состоит из двух этапов: $T_{\text{пуск}1}$ – раскрутка вращающихся частей гидроагрегата, т.е. увеличение их частоты вращения от нулевой до нормальной, осуществление синхронизации с сетью и включение двигателя-генератора в сеть; $T_{\text{пуск}2}$ – открытие регулирующего органа (направляющего аппарата) и увеличение подачи (расхода) от нулевой до стационарной, соответствующей действующему напору.

Первый этап начинается с отжима воды из полости рабочего колеса сжатым воздухом W с целью снижения мощности, необходимой для раскрутки вращающихся частей, который осуществляется различными способами: с помощью двигателя-генератора от сети при полном (прямой пуск) или пониженном напряжении (ректоный пуск); с помощью дополнительного асинхронного двигателя на валу агрегата; так называемым частотным пуском с подачей на двигатель-ге-

нератор тока с возрастающей частотой – от нулевой до нормальной (источником тока переменной частоты служит либо другой гидроагрегат с постепенным увеличением частоты вращения, либо статический преобразователь частоты – тиристорный) или другими способами. Основным показателем первой фазы пуска является время достижения нормальной частоты вращения и включения агрегата в сеть $T_{\text{пуск}1}$. Минимальное значение $T_{\text{пуск}1}$ имеет прямой пуск (40–80 с), другие пуски в зависимости от мощности пускового устройства требуют значительно большего времени (до 400–600 с).

Второй этап начинается с выпуска воздуха из полости рабочего колеса и открытия направляющего аппарата. При этом расход поступает в напорный водовод (направление принимается отрицательным), скорость в нем возрастает, что вызывает гидравлический удар ΔH , максимум которого обычно попадает на начальный период открытия. Важным показателем фазы увеличения расхода является значение гидравлического удара, зависящее от скорости открытия направляющего аппарата. Время второй фазы пуска $T_{\text{пуск}2}$ принимается до достижения требуемого открытия направляющего аппарата. Общее время пуска $T_{\text{пуск}}$ определяется суммой:

$$T_{\text{пуск}} = T_{\text{пуск}1} + T_{\text{пуск}2}.$$

Следует обратить внимание на то, что после выпуска воздуха момент на валу M и мощность первоначально резко возрастают, а далее они плавно увеличиваются с открытием a .

1.3. Аварийные переходные процессы

К аварийным относятся процессы, связанные с внезапным отключением гидроагрегатов от сети, вызываемым, как правило, короткими замыканиями на линиях или на шинах станции.

Сброс нагрузки при работе гидроагрегата в генераторном режиме (рис. 1.4, а). После отключения генератора от сети частота вращения гидроагрегата $n(t)$ быстро возрастает. Если бы открытие направляющего аппарата оставалось неизменным, то турбина вышла бы на разгонный режим (штриховая линия) и частота вращения достигла разгонной $n_{\text{разг}}$. Но повышение частоты вращения воспринимает автоматический регулятор турбины, и направляющий аппарат закрывается, что приводит к уменьшению расхода. При этом возникает гидравлический удар ΔH , зависящий от скорости закрытия направляющего аппарата и времени хода T_s . Регулирующее воздействие должно приводить к уменьшению момента рабочего колеса, но, как и в случае снятия нагрузки (рис. 1.1, б), воздействие гидравлического удара замедляет уменьшение момента $M(t)$, что способствует дополнительному повышению частоты вращения. Однако с дальнейшим закрытием турбины момент уменьшается до нуля и меняет направление (гидроагрегат тор-

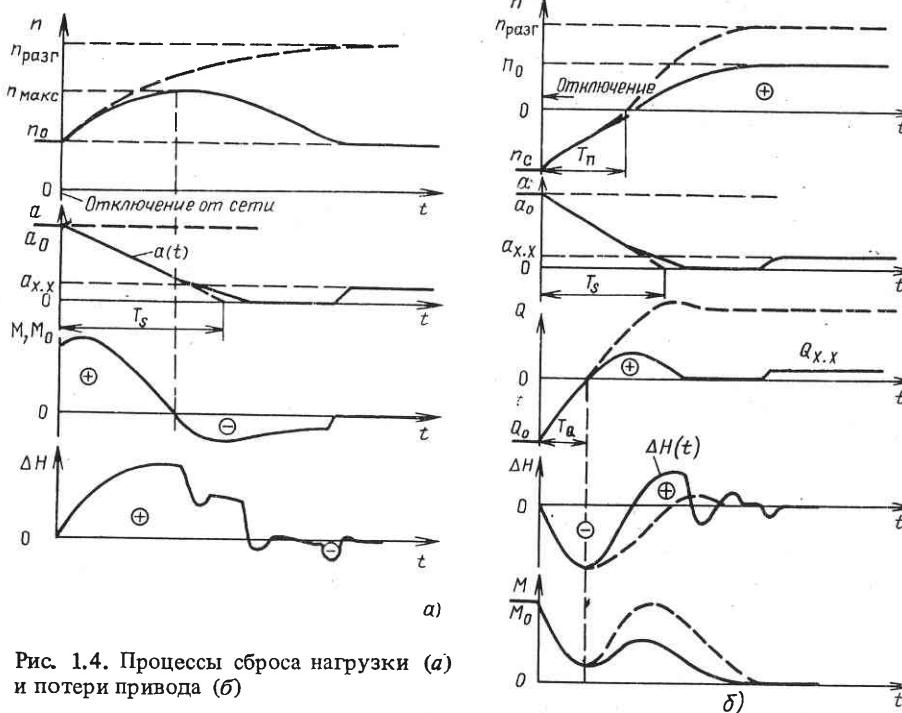


Рис. 1.4. Процессы сброса нагрузки (а) и потери привода (б)

мозится). При этом частота вращения проходит максимум n_{\max} и начинает снижаться. После приближения к нормальному значению частоты вращения гидроагрегат выводится на холостой ход.

Основными показателями процессов сброса нагрузки являются значения гидравлического удара ΔH_{\max} и частоты вращения n_{\max} . Обычно оба эти параметра нормируются техническими условиями на гидросиловое оборудование в качестве так называемых гарантий регулирования.

В случае поворотно-лопастных (ПЛ) турбин переходный процесс существенно зависит и от скорости разворота лопастей рабочего колеса. Замедление поворота лопастей при уменьшении угла их установки φ благоприятно, так как снижается значение n_{\max} , но в то же время увеличивается опасность подъема вращающихся частей гидроагрегата, поскольку с увеличением φ возрастает обратное гидродинамическое усилие рабочего колеса. Необходимо найти их оптимальные соотношения, что особенно важно для осевых турбин.

Потеря привода обратимого агрегата, работающего в насосном режиме (рис. 1.4, б). После отключения от сети двигателя-генератора развиваемый им момент сразу уменьшается до нуля и частота вращения $n(t)$ резко снижается (насосное направление вращения, как и расход, здесь принимается со знаком минус).

Рассмотрим сначала ход процесса, если открытие сохраняется неизменным (показан штриховыми линиями). Через момент времени T_n после отключения двигателя-генератора частота вращения снижается до нуля, направление вращения меняется на турбинное и возрастает до достижения разгонной частоты $n_{\text{разг}}$. Поскольку со снижением частоты вращения развивающийся рабочим колесом напор резко уменьшается, то соответственно уменьшается и расход $Q(t)$, и в момент времени T_Q после отключения расход равен нулю и направление течения меняется на турбинное. Большое практическое значение имеет изменение ударного давления $\Delta H(t)$. После отключения и снижения расхода давление в спиральной камере резко уменьшается, возникает отрицательный гидравлический удар, который достигает максимума к моменту времени T_Q . Изменение частоты вращения гидроагрегата связано с изменением момента на валу $M(t)$, который после отключения также быстро снижается, достигая минимума при T_Q . Далее с увеличением частоты вращения в турбинном направлении $M(t)$ опять возрастает и по мере приближения к стационарной разгонной частоте $n_{\text{разг}}$ вновь снижается до нуля (без учета сил сопротивления).

Если после отключения от сети системой автоматического регулирования осуществляется закрытие направляющего аппарата $a(t)$, то ход процесса несколько меняется (на рис. 1.4, б показан сплошными линиями). Поскольку время хода сервомотора обычно доставляет 20–30 с и более, то воздействие $a(t)$ на начальном этапе до момента времени T_Q мало. После отключения от сети момент на валу $M(t)$ резко снижается, а затем при изменении направления вращения на турбинное возрастает и далее, при выходе в разгонный режим, снижается до нуля. Частота вращения $n(t)$ приводит к нормальной n_0 . Расход устанавливается равным расходу холостого хода $Q_{x.x}$. Гидроагрегат выходит на режим холостого хода и готов к синхронизации и включению в сеть в генераторном режиме. Если требуется повторно включить гидроагрегат в насосный режим, то гидроагрегат отключается (см. схему на рис. 1.2) и после этого осуществляется его пуск (см. схему на рис. 1.3).

Выход гидроагрегата в разгон и вывод из разгона. Такой процесс может возникнуть в случае отказа системы автоматического регулирования турбины. Выход в разгон был рассмотрен на рис. 1.4, а, б (штриховые линии).

Важным является способ вывода агрегата из разгона. Для этой цели предусматривается установка золотника аварийного закрытия, который соединяет полость закрытия сервомотора направляющего аппарата напрямую с котлом маслонапорной установки и противоположную полость сервомотора со сборным баком. При этом можно установить определенное время закрытия, которое берется большим, чем время хода сервомотора при нормальных условиях работы. Импульс на золотник аварийного закрытия дается от реле оборотов.

Другим способом вывода гидроагрегата из разгона служит использование затворов. Это может быть предтурбинный затвор, а при его от-

существии — быстродействующий аварийно-ремонтный затвор в водоприемнике. В этом случае процесс вывода гидроагрегата из разгона сопровождается опорожнением напорных водоводов, что приводит к уменьшению действующего напора до нуля.

Глава 2

РАБОТА С ПРОГРАММИРУЕМЫМИ МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРАМИ ПРИ РАСЧЕТАХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Выполнение расчетов по готовым программам

Прежде чем приступить к работе с микрокалькулятором, следует ознакомиться с соответствующим руководством или инструкцией по эксплуатации. Ниже приводятся только краткие сведения, необходимые для решения задач рассматриваемого вида, причем основное внимание уделяется порядку выполнения вычислений.

Выбор программы, отвечающей поставленной задаче, представляет важный начальный этап. Решающее значение при этом имеют вид задачи, например определение гидравлического удара в напорном водоводе или условий протекания переходного процесса при сбросе нагрузки, и ряд дополнительных определяющих факторов: геометрия напорной системы и расчетная ее схема с определяющими параметрами, включая характеристики гидромашин, если они подлежат учету; вид возмущающего воздействия или режима регулирования; состав постоянных исходных данных и регистрируемых параметров на шаге счета. Все это устанавливается принятым алгоритмом расчета, по которому составляется программа.

С целью упрощения выбора соответствующей программы расчета в табл. 2.1 показаны основные характеристики пакета прикладных программ, приведенных в данной книге. Принятые условия расчетов "жесткий" и "упругий" отличаются тем, что при расчетах гидравлического удара первые не учитывают упругие деформации жидкости и водовода, а вторые учитывают их. Учет влияния упругости важен при расчетах напорного водовода большой длины и быстрых изменениях расхода.

Программа ГУ-Ж(3) позволяет определить давление как для трех сечений напорного тракта, так и для любого числа промежуточных сечений.

При расчете напорный водовод можно представить в виде одного, двух и трех однородных участков с постоянным диаметром D и скоростью распространения упругой волны c . Тогда, применяя программу ГУ-У(1), ГУ-У(2) или ГУ-У(3), можно определять давления в кон-

Таблица 2.1. Программы расчетов гидромеханических переходных процессов

Задача и условия расчета	Вид возмущающего воздействия	Программа	Назначение
Гидравлический удар в напорных водоводах:			Анализ гидравлического удара в неразветвленных водоводах
жесткий	Пропускная способность $Q_I(t)$	ГУ-Ж(3)	
упругий	То же	ГУ-У(1), (2), (3)	
Гидромеханические переходные процессы гидроагрегатов:			
а) при работе в энергосистеме $n = \text{const}$:			Определение переходных процессов при увеличении и уменьшении нагрузки с определением изменения момента и осевой нагрузки турбины
жесткий	Открытие направляющего аппарата $a_0(t)$ или то же и угол установки лопастей $\varphi(t)$	НАГР-Ж НАГР-ЖМ	
упругий	$a_0(t)$	НАГР-У(1), (2)	
б) при отключении от энергосистемы:			Определение переходных процессов при сбросе нагрузки в генераторном режиме и потере привода в насосном режиме
жесткий	$a_0(t)$ или то же и $\varphi(t)$	СБРОС-Ж	
упругий	$a_0(t)$	СБРОС-У(1), (2)	
Колебания уровня в уравнительных резервуарах:			Определение изменения положений уровня, значений давления, длительности процесса, характеристика затухания колебаний
цилиндрических и камерных	Стационарный расход $Q_{\text{ст}}(t)$	УР-1, УР-1 и блок непрерывного счета	
дифференциальных и с водоосливом	То же	УР-2, УР-2 и блок непрерывного счета УР-2 и блок стабилизации	

цевом, концевом и одном промежуточном, концевом и двух промежуточных сечениях напорного водовода.

Более детальную характеристику каждой программы можно получить из ее подробного описания, а также из числовых примеров, которые могут быть использованы и в качестве тестовых задач (см. гл. 3–8).

Приведенный пакет программ не является универсальным и не решает все проблемы расчетов гидромеханических переходных процессов. По мере работы они могут корректироваться и совершенствоваться пользователем непосредственно с учетом реальных характеристик как самой задачи, так и типа микрокалькулятора. Например, "Электроника МК-61" и "Электроника МК-52" имеют некоторые дополнительные возможности: если в более ранних типах микрокалькуляторов для определения абсолютного значения некоторого числа требовалось осуществить последовательно две операции Fx^2 и $F\sqrt{ }$, то при применении "Электроники МК-61" для этого требуется всего одна операция $K|x|:$, определение знака числа осуществляется также одной операцией $K3n$, а при применении более ранних типов микрокалькуляторов требуются четыре операции: \uparrow , Fx^2 , $F\sqrt{ }$, \therefore . С учетом этого могут быть сокращены программы, в том числе приведенные ниже. Кроме того, в соответствии с конкретными решаемыми задачами может потребоваться расширение и самого пакета программ.

Ввод программы в микрокалькулятор производится в режиме F ПРГ, при этом на индикаторе справа высвечивается значение следующего очередного адреса (начальный 00). По мере ввода программы, осуществляется нажатием соответствующих клавиш, слева высвечиваются три кода предыдущих операций и команд. Это позволяет по ходу набора проверять правильность ввода программы. С этой целью нужно иметь перед глазами таблицу с обозначениями кодов (через короткое время основные коды запоминаются и не будет необходимости заглядывать в таблицы). В табл. 2.2 приведены операции в программном изображении и соответствующие им коды (в инструкциях обычно даются операции в написании, соответствующем изображениям на клавиатуре данного микрокалькулятора).

Следует иметь в виду, что микрокалькуляторы "Электроника" различных типов имеют некоторые отличия также и в обозначениях клавиш. Основные обозначения приведены в табл. 2.3.

Чтобы сократить число символов при написании программы и выделить обозначение команд и операций, адреса операций не выписываются. Вместо этого принято представлять программы в форме матрицы, имеющей 10 столбцов с номерами от 0 до 9, и любое число строк с номерами от 0 или другого числа. Номера строк и столбцов надписаны соответственно слева и вверху у рамки текста программы. Адрес операции состоит из двух цифр: номера строки и номера столбца [см., например, текст программы ГУ-Ж(3) на с. 31].

Для наглядности и облегчения чтения и проверки программы по некоторым адресам подписаны буквенные обозначения параметров, получаемые по данному адресу операции (см. с. 31).

В случае неправильного ввода какой-либо команды с помощью клавиши \overline{SH} программа смещается на один адрес обратно, после чего можно внести необходимые изменения в программу. Нажатием клавиши \overline{SH} программа смещается на один адрес вперед.

Таблица 2.2. Коды основных операций и команд

Операция	Код	Операция	Код	Операция	Код
Цифры		Занесение в регистр памяти из регистра X ПЮ	40	$Farcos$	1-
0	00	...	49	$Faretg$	1L
..	4-	$Fx < 0$	5-
9	09	...	4-		
+	10	Π_9	49	$Fx = 0$	5E
-	11	Π_A	4-	$Fx \geq 0$	59
x	12	Π_B	4L	$Fx \neq 0$	57
:	13	Π_C	4-		
\geq	14	Π_D	4-	$KHOP$	54
\uparrow	0E	Π_E	4E	$KBPO$	80
.	0-	Вызов чисел из регистра памяти в регистр X ИП0	60	$KBPO$	89
/-	0L	$KBPA$	8-
C/P	50	ИП9	69	$KBPB$	8L
БП	51	ИПA	6-	$KBPC$	8-
B/0	52	ИПB	6L	$KBPD$	8T
Flg	17	ИПC	6-	$KBPE$	8E
Fln	18			Абсолютное значение числа	
Fe^x	16	ИПD	6-	$K x $	31
$F\pi$	20	ИПE	6E	Знак числа K3n	32
$F\sqrt{ }$	21	FBx	0	Определение наибольшего из двух чисел	
Fx^2	22	Fsin	1-		
		Fcos	1-		
$F1/x$	23	Ftg	1E	в регистрах X	
Fx^y	24	Farscsin	19	и Y	
FQ	25			$Kmax$	36

Таблица 2.3. Обозначения операций в программе и на клавишиах микрокалькуляторов

В программе	Микрокалькуляторы	
	Б3-34	МК-54, МК-56, МК-61
:	\div	\div
Π	Π	$x \rightarrow \Pi$
ИП	ИП	$\Pi \rightarrow X$
\rightarrow	\rightarrow	\leftrightarrow
\leftarrow	\leftarrow	
\uparrow	\uparrow	$B \uparrow$
$arcsin$	$arcsin$	sin^{-1}
$arccos$	$arccos$	cos^{-1}
$arctg$	$arctg$	tg^{-1}

Вводить программу нужно внимательно, не торопясь, в темпе 4–5 с на один шаг программы. Например, ввод программы, включающей 80 адресов, требует 6–7 мин.

Проверка программы важна для успешного проведения вычислений. Наиболее просто произвести проверку потактным просмотром введенной программы по индикатору. Для этого в режиме F АВТ нажимают клавишу В/0 (возврат на нулевой адрес) и переходят в режим F ПРГ. На индикаторе появится изображение 00.

Нажимая последовательно клавишу ШГ, проходят по одному шагу всю программу, проверяя по кодам соответствие набранных операций и команд. Если возникает необходимость проверки программы с какого-то промежуточного адреса, то его можно вызвать последовательным нажатием клавиш F, АВТ, БП, промежуточный адрес, F, ПРГ. На индикаторе справа появится требуемый адрес, а слева – коды операций по трем предыдущим адресам.

Наиболее надежной проверкой программы служит решение тестового примера, хотя бы на одном-двух шагах счета. Для этого можно использовать приведенные числовые примеры. Однако это требует дополнительных затрат времени. Часто после проверки по индикатору сразу приступают к решению своей задачи и оценку правильности работы производят по полученным результатам.

Следует иметь в виду, что при некорректности операции на индикаторе появляется сигнал ЕГГОГ (написание английского слова етог – ошибка). К таким операциям относятся деление на нуль, извлечение корня из отрицательного числа, возвведение в степень у числа $x = 0$ и некоторые другие.

Если в итоге счета появляется неправильный результат, то отыскать ошибку можно выполнением счета потактно. Для этого нажимают клавишу В/0, а затем ПП, причем с каждым нажатием этой клавиши осуществляется одна операция счета по программе с высвечиванием результата на индикаторе.

Ввод общих исходных данных для решаемой конкретной задачи производится в режиме F АВТ. Цифровые значения вводятся в соответствующие регистры памяти согласно инструкции по использованию программы (например, табл. 3.2б). После этого полезно произвести проверку правильности введенных исходных данных на индикаторе путем вызова их из регистров памяти в регистр Х.

Ввод начальных условий. Если производится вычисление переходного процесса во времени пошаговым счетом (решения задачи Коши), то сначала необходимо ввести начальные условия, определяемые стационарным режимом, в соответствующие регистры памяти.

Последовательность проведения вычислений. В предварительно заготовленный бланк заносятся исходные данные на шаге счета (например, значение пропускной способности, момента или КПД турбины),

далее в нем регистрируются результаты вычислений (например, табл. 3.2в). После ввода общих исходных данных и начальных условий вводятся данные первого шага и нажатием клавиши В/0 (возврат на нулевой адрес) и С/П (стоп–пуск) осуществляется запуск счета по программе. По завершении счета на индикаторе появится окончательный результат. Все требуемые параметры регистрируются в таблице на бланке. Затем вводятся данные следующего шага, и процесс счета повторяется. Если в результате счета сразу получается искомое решение, как, например, по программе УР-1 с блоком непрерывного счета, то после регистрации полученного результата переходят к решению при других данных.

Возможно, что в результате какой-либо ошибки счет зациклится, т.е. процесс вычислений не остановится. В этом случае для прекращения счета нужно нажать клавишу С/П.

Выполнение расчетов переходных процессов по шагам обладает значительной гибкостью и наглядностью, так как позволяет в процессе вычислений изменять временной шаг счета, учитывать изменение отметки бьефа и т.д., а также видеть изменение определяющих процесс параметров во время счета. Если какой-либо из показателей переходного процесса уже на начальном или промежуточном этапе счета выходит за пределы значений, принятых как предельные, то счет можно не доводить до конца, а перейти к расчету с измененными в требуемом направлении условиями.

2.2. Составление программ

Прежде чем приступить к составлению программы для решения задач определенного типа, необходимо иметь математическую модель, полностью формализующую представление задачи, что сводится к математической записи всех функциональных связей и определений поставленных целей. При этом должна быть установлена структура расчетной схемы, зафиксированы вводимые упрощения, допущения и ограничения. На основе математической модели выбирается метод решения и строится алгоритм вычислений, который и представляет собой основу для составления программы. Это общий порядок подхода к составлению программ для любых ЭВМ. Однако особенности каждого типа ЭВМ оказывают определенное влияние на эту процедуру, так как на этапе выбора расчетной схемы, методики решения и построения алгоритма необходимо учитывать ее показатели и возможности. Особо это касается программ, предназначенных для микрокалькуляторов, имеющих ограниченную емкость памяти и небольшое быстродействие выполнения операций. Конкретными примерами реализации указанных принципов составления программ для задач данного вида применительно к микрокалькуляторам являются программы, приведенные в табл. 2.1. Ниже рассматриваются

некоторые технические аспекты составления программ для микрокалькуляторов, необходимые для понимания структур приведенных программ и способов их модификации.

В отличие от больших ЭВМ, для которых программы составляются на одном из алгоритмических языков, в микрокалькуляторах используется кодовый язык программирования. Он включает числа-операнды, которые участвуют в тех или иных вычислениях, и операторы – совокупность символов, обеспечивающих выполнение одной из элементарных операций по программам, заложенным в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) микрокалькулятора.

Каждому оператору (коду) в программе соответствует свой адрес (номер). Общее число адресов обычно 98 (от 00 до 97) или 105 (от 00 до 104) для "Электроники МК-52" и "Электроники МК-61", что определяет предельно возможный для данного микрокалькулятора объем программы.

Для хранения необходимых исходных и промежуточных данных, а также для ввода программы микрокалькуляторы снабжены оперативным запоминающим устройством (ОЗУ), позволяющим осуществлять как обычные вычисления с помощью клавиш, так и расчеты в автоматическом режиме по введенной программе.

В процессе вычислений используются три вида регистров памяти, в которых могут храниться числовые данные.

1. Операционные регистры X и Y служат для выполнения двухместных операций, т.е. таких, в которых участвуют два числа-операнда (например A+B, A×B, A/B). Хранящееся в регистре X число всегда изображается на индикаторе.

2. Регистры P могут использоваться для записи исходной информации, промежуточных и конечных результатов вычислений. Таких регистров обычно 14 (или 15 в "Электронике МК-61") с номерами 0, 1, ..., 9, A, B, C, D, (E), причем операции ПР соответствует ввод числа из регистра X в регистр памяти (в регистре X число остается), операции ИПР соответствует вывод числа из регистра P в регистр X. При этом содержание регистра P сохраняется.

3. Регистры Z, T, объединенные с регистрами X и Y, образуют стек. Сюда же относится и регистр X1 сохранения результата предшествующей операции. Наличие стековой памяти значительно расширяет вычислительные возможности микрокалькулятора, однако необходимо знать, как передвигается информация в стеке при выполнении различных операций. С этой целью в табл. 2.4 в наглядной форме показано перемещение информации в стеке при выполнении основных операций. При этом каждая первая строка представляет исходное положение информации в регистрах стека (A, B, ..., цифры), а вторая – положение в результате выполнения данной операции (стрелки дают направление дви-

Таблица 2.4. Перемещение информации в стеке

Пример	Операция	Регистр стека				
		X1	X	Y	Z	T
Набор на клавиатуре S = 2,08	Ввод числа	E ↓ E	A ↓ S	B ↓ A	C ↓ B	D ↓ C
Вычисление $F \sin A = S$, $FA^2 = S$, $FA^B = S$	Одноместная	E ↓ A	A ↓ S	B ↓ B	C ↓ C	D ↓ D
Вычисление $A + B = S$, $A \times B = S$	Двухместная	E ↓ A	A ↓ S	B ↓ C	C ↓ D	D ↓ D
Перемещение числа в стеке на один шаг		↑	E ↓ A	B ↓ A	C ↓ B	D ↓ C
Обмен содержимым регистров		↔	E ↓ B	A ↓ B	C ↓ C	D ↓ D
Кольцевое перемещение чисел в стеке	F $\ddot{\oplus}$	E ↓ A	A ↓ B	B ↓ C	C ↓ D	D ↓ A
Вызов числа из предыдущего регистра	F $\dot{\ominus}$	E ↓ E	A ↓ A	B ↓ B	C ↓ C	D ↓ D

жения; если стрелка выходит за пределы таблицы, то это означает, что число исключается из стека).

При составлении программы со сложным использованием стековой памяти рекомендуется составлять таблицу, аналогичную табл. 2.4, но с показанием фактических значений и выполняемых операций. Это помогает использовать с максимальным эффектом стековую память и предохраняет от возможных ошибок. В качестве примера в табл. 2.5 приведен фрагмент программы ГУ-Ж(3), ограниченный адресами 13–82, в пределах которого по формулам (3.9) вычисляют инерционный напор тракта ΔH_{tr} .

Адресация регистров памяти. В процессе вычислений по программе обычно необходимо выполнять операции ввода числа из регистра X в какой-либо регистр памяти P или, наоборот, вывода числа из регистра памяти P в регистр X.

Имеются две формы адресации регистров. Прямая адресация записывается в форме ПР (ввести число в регистр памяти P) или ИПР

Таблица 2.5. Фрагмент программы ГУЖ(3). Размещение в регистрах стека

Адрес	Операция	X1	X	Y	Z	T
13	x		A			
14	↑		A			
15	F _x ²	A	A ²			
16	ИПД	A	Q ₁			
17	F _x ²	Q ₁	Q ₁ ²			
18	ИПЗ	Q ₁	H ₀			
19	x	H ₀	H ₀ Q ₁ ²			
20	/-	H ₀	-H ₀ Q ₁ ²			
21	ИП4	H ₀	Q _{i-1}	-H ₀ Q _i ²		
22	F _x ²	Q _{i-1}	Q _{i-1} ²	-H ₀ Q _i ²		
23	+	Q _{i-1}	Q _{i-1} ²	A ²		
24	ИПA	Q _{i-1}	K	Q _{i-1} ² - H ₀ Q _i ²		
25	F _x ²	K	K ²	Q _{i-1} ² - H ₀ Q _i ²		
26	x	K ²	K ² (Q _{i-1} ² - H ₀ Q _i ²)	A ²		
27	ИП5	K ²	Δt	K ² (Q _{i-1} ² - H ₀ Q _i ²)		
28	F _x ²	Δt	Δt ²	K ² (Q _{i-1} ² - H ₀ Q _i ²)		
29	:	Δt ²	$\frac{K^2}{\Delta t^2}(Q_{i-1} - H_0 Q_i^2)$	A ²		
30	-		$A^2 - \frac{K^2}{\Delta t^2}(Q_{i-1} - H_0 Q_i^2)$	A		
31	F _x $\sqrt{\quad}$		$A^2 - \frac{K^2}{\Delta t^2}(Q_{i-1} - H_0 Q_i^2)$	$\sqrt{A^2 - \frac{K^2}{\Delta t^2}(Q_{i-1} - H_0 Q_i^2)}$	A	
32	- или +		$\sqrt{A^2 - \frac{K^2}{\Delta t^2} Q_{i-1} - H_0 Q_i^2}$	ΔH _{тр}	A	A

(вывести число из регистра памяти P) и широко используется в приведенных программах, например, П6, ПА, ИЮ, ИПД.

Косвенная адресация осуществляется с помощью префиксной клавиши K и записывается в форме КПР (ввести число в регистр памяти, номер которого указан в регистре P) и КИПР (вывести число из регистра памяти, номер которого указан в регистре P, в регистр X). Поскольку вводить адреса в регистры памяти можно только в виде цифр, то имеется следующее соответствие:

Регистры 01 9 A B C D E
Цифровой адрес 01 9 10 11 12 13 14

Косвенная адресация используется в случаях, когда исходные данные или какие-либо параметры изменяются в зависимости от результатов вычислений.

Переходы. Обычно вычисления выполняются микрокалькулятором в последовательности, соответствующей порядку адресов программы. Однако при необходимости можно нарушить такую последовательность путем использования переходов на другой адрес. Это позволяет составлять разветвляющиеся программы и осуществлять многократное прохождение отдельных частей программы. Такие переходы могут быть безусловными или условными, которые также подразделяются на прямые или косвенные (табл. 2.6).

Запись прямых переходов занимает два адреса программы, например БП36 или Fx < 0 28. Запись косвенных переходов занимает один адрес, например КБП1 или Kx-01.

В прямых переходах в команде содержится адрес N, на который должен перейти счет. В косвенных переходах в команде указывается только регистр P, в котором содержится адрес дальнейшей операции счета.

Условный переход осуществляется только в том случае, если указанное условие не выполняется: например, пусть Fx < 0 28 – условный прямой переход. Он действует следующим образом: если в регистре X

Таблица 2.6. Виды переходов

Переход	Команды в программе	
	Прямой переход	Косвенный переход
Безусловный	БПN	КБПР
Условный	Fx ≥ 0N	Kx ≥ 0P
	Fx < 0N	Kx < 0P
	Fx = 0N	Kx = 0P
	Fx ≠ 0N	Kx ≠ 0P

число $x < 0$, то адрес 28 будет пропущен и счет пойдет по программе дальше.

Если же в регистре X число $x \geq 0$, то дальнейший счет перейдет на адрес 28 и далее. Например, $Kx = 0A$ – условный косвенный переход. Он действует следующим образом: если в регистре X число $x = 0$, то счет идет в последовательности программы. Если же в регистре X число $x \neq 0$, то счет переводится на адрес, который указан в регистре A.

Если адрес содержится в одном из регистров с номерами 7, 8, 9, A(10), B(11), C(12), D(13), E(14), то при выполнении операции косвенного перехода содержание этих регистров не изменяется. Если же адрес содержится в регистре с номерами 0, 1, 2 и 3, то после выполнения каждой операции косвенного перехода содержащееся в них число – адрес уменьшается на 1, а если в регистре с номерами 4, 5 и 6, то увеличивается на 1. Таким образом происходит модификация адресов, которая применяется для циклических вычислений.

Подпрограмма. Если в процессе решения задачи нужно многократно производить однотипные вычисления, то для сокращения программы используют отдельную подпрограмму, начинающуюся с адреса N. Обращение к подпрограмме записывается в форме ППN и занимает два адреса. При этом подпрограмма должна заканчиваться оператором возврата B/0, что обеспечивает после вычислений по подпрограмме возврат в основную программу на операцию, адрес которой состоит после N. Возможно и косвенное обращение к подпрограмме командой КППР, занимающей один адрес.

Отладка программы. После того как программа написана, ответственным этапом является ее проверка и отладка. В режиме F ПРГ производится ввод программы. Затем проверяется правильность ввода. Для этого надо перейти в режим F АВТ, нажать клавишу B/0 (возврат на нулевой адрес) и снова вернуться в режим F ПРГ. Проверка выполняется пошаговым просмотром введенных команд с помощью клавиши ШГ по их кодам на индикаторе. При обнаружении неправильной команды клавишей ШГ возвращают программу на один шаг (на предыдущий адрес) и вводят клавишами требуемую команду. Если оказывается, что введена лишняя операция, то на ее место вводится команда КНОП (нет операции), и тогда при вычислениях этот адрес будет пропускаться.

Окончательным этапом отладки и проверки программы является вычисление контрольного примера. Для этого нужно ввести исходные данные и начальные условия и выполнить вычисления, как при работе с готовой программой (см. § 2.1).

Глава 3

РАСЧЕТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА БЕЗ УЧЕТА УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

3.1. Основные расчетные соотношения

Рассмотрим цилиндрический напорный водовод (рис. 3.1, a) площадью сечения F (диаметр D), длиной l , у которого в сечении 1–1 расположен элемент, регулирующий расход воды (затвор, турбина). Положение сечений определяется координатой x , отсчитываемой по оси x , совпадающей с осью водовода в направлении от сечения 1–1. Направления расхода Q и скорости $v = Q/F$ принимаются положительными при движении от бьефа или уравнительного резервуара к сечению 1–1 для верховых водоводов и от сечения 1–1 к бьефу для низовых.

Гидравлический удар (ударное давление) ΔH представляет собой динамическое повышение или понижение давления в напорных водоводах, вызываемое действием инерционных сил, возникающих при неустановившихся режимах, когда $dQ/dt \neq 0$. Для определения ΔH используется уравнение количества движения

$$\frac{d(mv)_x}{dt} = \Sigma X, \quad (3.1)$$

где m , v – масса и скорость жидкости в водоводе; ΣX – сумма проекций на ось x внешних сил, действующих на данную массу жидкости в момент времени t . Рассмотрим массу жидкости в водоводе на участке, расположенному между сечениями 1–1 и 2–2 у бьефа. Для данных условий $m = \rho Fl$, где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$. Без учета гидравлических потерь

$$\Sigma X = F\rho g \Delta H, \quad (3.2)$$

где ΔH – гидравлический удар, м; $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения.

Если не учитывать упругие деформации жидкости и водовода, вызываемые изменением давления, т.е. считать, что плотность жидкости ρ и площадь сечения F не зависят от давления (жидкость и водовод жесткие), то на основании (3.1) и (3.2) получаем

$$-\rho Fl \frac{dv}{dt} = F\rho g \Delta H$$

(знак минус показывает, что повышение ударного давления вызывает уменьшением скорости $dv/dt < 0$). Отсюда

$$\Delta H = - \frac{l}{g} \frac{dv}{dt} \quad (3.3)$$

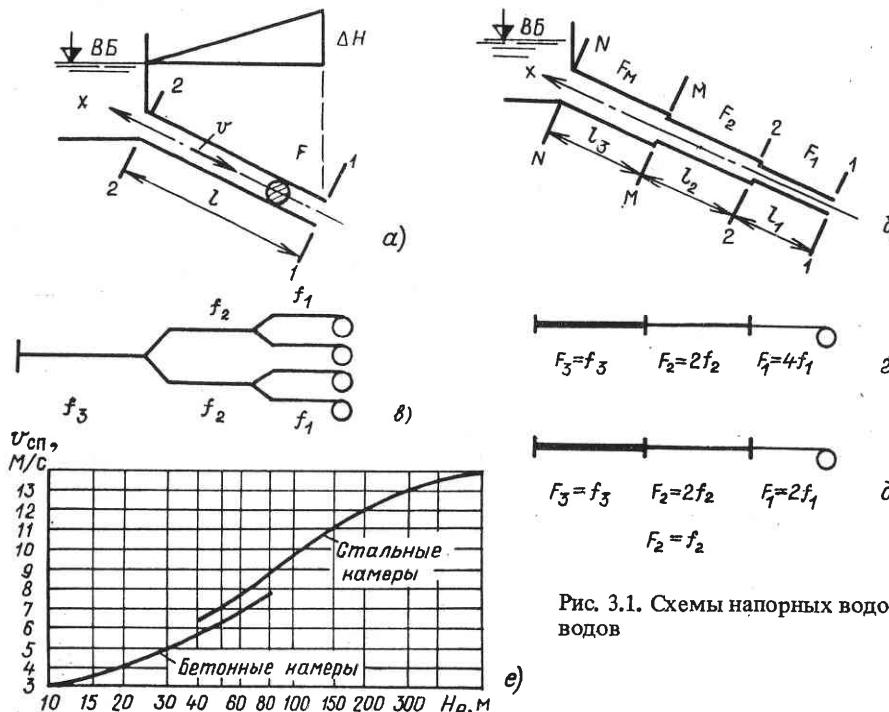


Рис. 3.1. Схемы напорных водоводов

при $dv/dt = (dQ/dt)/F$, тогда

$$\Delta H = - \frac{l}{gF} \frac{dQ}{dt}. \quad (3.3a)$$

Формулы (3.3) и (3.3а) можно использовать для расчета гидравлического удара в телескопическом водоводе переменного сечения (рис. 3.1, б), состоящего из N участков. Учитывая независимость удара на каждом участке, получаем

$$\Delta H_M = - \left(\frac{1}{g} \sum_{M=1}^N \frac{l_i}{F_i} \right) \frac{dQ}{dt} \quad (3.4)$$

или, обозначая коэффициент инерционности, $\text{с}^2/\text{м}^2$, в виде

$$K_{\text{ин}, M} = \frac{1}{g} \sum_{M=1}^N \frac{l_i}{F_i}, \quad (3.4a)$$

получаем зависимость (3.4) в универсальной форме

$$\Delta H_M = -K_{\text{ин}, M} \frac{dQ}{dt}. \quad (3.5)$$

В практике расчета гидравлического удара часто используют безразмерные параметры по удару $\Delta h = \Delta H/H_6$ и по расходу $q = Q/Q_6$, где H_6 и Q_6 – базисные значения, в качестве которых обычно принимают $H_6 = H_0$ – начальный напор нетто и Q_6 – максимальный расчетный Q_p или начальный Q_0 расход. В результате перехода к безразмерным параметрам получим (3.4) в виде

$$\Delta h = -T_w \frac{dq}{dt}, \quad (3.6)$$

где

$$T_w = \frac{Q_6}{gH_6} \sum \frac{l_i}{F_i}, \quad (3.6a)$$

где $\sum \frac{l_i}{F_i}$ определяется для всего напорного тракта. Коэффициент T_w , с, называется постоянной инерции (или постоянной времени) напорных водоводов и представляет собой комплексный показатель инерционности напорной системы. В зависимости от значения T_w напорная система считается:

- малоинерционной при $T_w < 1,5$ с;
- среднеинерционной при $1,5 < T_w < 3$ с;
- высокоинерционной при $T_w > 3$ с.

Чем выше инерционность, тем большее значение имеет учет динамических воздействий при проектировании и эксплуатации гидроагрегатов и напорных водоводов ГЭС и ГАЭС.

Связь между коэффициентом инерционности $K_{\text{ин}}$ по (3.4а) и постоянной инерции напорного тракта T_w по (3.6а) определяется в общем виде соотношением

$$K_{\text{ин}} = T_w \frac{H_6}{Q_6}. \quad (3.6b)$$

Определение гидравлического удара ΔH в напорных водоводах сводится к решению дифференциального уравнения (3.5). При этом необходимо задать начальные условия и вид возмущающего воздействия. В качестве начального условия принимают расход установившегося начального режима и давление в соответствующих сечениях водовода, определяемых положением пьезометрической линии с учетом гидравлических потерь.

Возмущающим воздействием является изменение открытия, а точнее пропускной способности затворов или гидромашин. При этом расход зависит и от открытия, и от напора, в который входит искомое значение гидравлического удара. Для затворов расход определяют по формуле

$$Q = \mu F_{\text{затв}} \sqrt{2g} \sqrt{H_0 + \Delta H},$$

где μ – коэффициент расхода; $F_{\text{затв}}$ – открытие затворов (площадь отверстия в свету). Для гидромашин

$$Q = \left(\sum_{j=1}^m Q'_{lj} \right) D_1^2 \sqrt{H_0 + \Delta H},$$

где Q'_{lj} – приведенный (единичный) расход j -го агрегата, а сумма берется для m гидроагрегатов, присоединенных к данной линии напорных водоводов; D_1 – номинальный диаметр гидромашины (все m гидромашин одинаковые). Оба выражения можно представить обобщенной формулой

$$Q = Q_1(t) \sqrt{H_0 + \Delta H_{\text{тр}}}, \quad (3.7)$$

где $Q_1(t)$ – пропускная способность, изменяющаяся во времени, $\text{м}^2/\text{s}$; $H_0 = H_{\text{стат}}$ – напор установившегося режима; $H_{\text{стат}}$ – статический напор; $\Delta H_{\text{тр}}$ – инерционный напор всего проточного тракта. Пропускная способность, изменяющаяся во времени, определяется по формулам: для затворов

$$Q_1(t) = \mu F_{\text{затв}}(t) \sqrt{2g}; \quad (3.7a)$$

для гидромашин

$$Q_1(t) = \left(\sum_{j=1}^m Q'_{lj}(t) \right) D_1^2. \quad (3.7b)$$

Значения Q'_{lj} можно принимать и по универсальной характеристике гидромашин. Для предварительных расчетов часто принимают линейное изменение $Q_1(t)$ во времени.

Общий инерционный напор проточного тракта $\Delta H_{\text{тр}}$ в формуле (3.7) определяется по общему коэффициенту инерционности $K_{\text{ин.тр}}$ для всего напорного тракта, включая и проточный тракт гидромашины. При этом

$$K_{\text{ин.тр}} = \frac{\Sigma K_{\text{ин}}}{L}, \quad (3.8)$$

где L – общая длина напорного тракта от верхнего бьефа (или уравнительного резервуара) до выхода в нижний бьеф (или в низовой уравнительный резервуар).

3.2. Коэффициент инерционности проточного тракта гидромашины

Коэффициент инерционности проточного тракта гидромашины $K_{\text{ин.гм}}$ применяется для расчета участка от входного сечения турбинной камеры (спиральной) до выходного сечения отсасывающей трубы и вычисляется по (3.4а). Значение $K_{\text{ин.гм}}$ может быть задано заводом-поставщиком гидромашин, вычислено по чертежам или определено по обобщенной зависимости в виде суммы:

$K_{\text{ин.гм}} = K_{\text{ин.сп}} + K_{\text{ин.лоп}} + K_{\text{ин.от}},$

где $K_{\text{ин.сп}}$, $K_{\text{ин.лоп}}$ и $K_{\text{ин.от}}$ – соответственно значения коэффициентов инерционности для спиральной камеры, лопастной системы (статор – лопасти рабочего колеса) и отсасывающей трубы, определяемые по геометрическим параметрам гидромашины, приведенным на их универсальных характеристиках.

Из (3.4а) видно, что выражение коэффициента инерционности $K_{\text{ин.гм}}$ включает два показателя: один характеризует расчетную длину, другой – площадь сечения. Обобщенно длину можно выразить как

$$l_i = \lambda_i D_1, \quad (3.8b)$$

где λ_i – безразмерный коэффициент длины; D_1 – номинальный диаметр гидромашины. Расчетная площадь определяется геометрическими параметрами и расходом.

С п и р а л ь н а я к а м е р а. В качестве расчетной длины принимается половина ее фактической длины: для металлических ("полных") спиральных камер $\lambda_{\text{сп}} = 3,6$, для бетонных в зависимости от угла охвата $\varphi_{\text{охв}} = 180 \div 270^\circ$ $\lambda_{\text{сп}} = 1,6 \div 2,4$. Площадь сечения определяется по средней скорости $v_{\text{сп}}$, т.е. $F_{\text{сп}} = Q_p (\varphi_{\text{охв}}/360)/v_{\text{сп}}$, где Q_p – расчетный расход (максимальный). Тогда

$$K_{\text{ин.сп}} = \frac{1}{g} \frac{\lambda_{\text{сп}} v_{\text{сп}}}{Q_p \varphi_{\text{охв}}/360} D_1. \quad (3.8b)$$

Средняя скорость $v_{\text{сп}}$ зависит от напора и вида спирали, может приниматься по графику (рис. 3.1, e).

Л о п а с т н а я с и с т е м а (от статора до выхода из рабочего колеса). Коэффициент длины с учетом закрутки потока для радиально-осевых (РО) и диагональных гидромашин может приниматься $\lambda_{\text{лоп}} = 0,9$ и для осевых $\lambda_{\text{лоп}} = 1,3$. Расчетная площадь сечения (средняя) с учетом коэффициента стеснения лопастями, равного 0,85, составляет

$$F_{\text{лоп}} = 1,35 \left(\bar{b}_0 + \frac{\bar{d}_{\text{F2}}^2}{4} \right) D_1^2,$$

где \bar{b}_0 – относительная высота направляющего аппарата; для РО и диагональных гидромашин $\bar{d}_{\text{F2}} = \bar{D}_2$ – относительный диаметр выхода из рабочего колеса, т.е. входа в отсасывающую трубу; для осевых турбин $\bar{d}_{\text{F2}} = 1 - \bar{d}_{\text{K}}^2$; \bar{d}_{K} – относительный диаметр корпуса рабочего колеса. Тогда

$$K_{\text{ин.лоп}} = \frac{1}{g} \frac{\lambda_{\text{лоп}}}{1,35 (\bar{b}_0 + \bar{d}_{\text{F2}}^2/4)}. \quad (3.8c)$$

О т с а с ы в а ю щ а я т р у б а (всасывающая). Если используются относительные размеры, то для изогнутой трубы $\lambda_{\text{отс}} = \bar{h}_{\text{отс}} + \bar{L}_{\text{отс}}$, где $\bar{h}_{\text{отс}}$ и $\bar{L}_{\text{отс}}$ – высота и длина горизонтальной (наклонной) части трубы по оси, для прямоосной трубы $\lambda_{\text{отс}} = \bar{L}_{\text{отс}}$. Обычно $\lambda_{\text{отс}} = 4,5 \div 5$, но в случае подземных и полуподземных зданий может быть и больше (до 8–9). Расчетная площадь определяется по формуле

$$F_{\text{отс}} = 0,5 \left(\frac{\pi \bar{D}_2^2 D_1^2}{4} + F_5 \right),$$

где F_5 – площадь выходного сечения отсасывающей трубы. Тогда получаем

$$K_{\text{ин.отс}} = \frac{2}{g} \frac{\lambda_{\text{отс}} D_1}{\frac{\pi \bar{D}_2^2 D_1^2}{4} + F_5}. \quad (3.8\text{д})$$

В (3.8д) вместо $\lambda_{\text{отс}} D_1$ можно подставить и фактическую длину по оси отсасывающей трубы. Следует также иметь в виду, что в случае подземных зданий ГЭС иногда отсасывающая труба непосредственно переходит в низовой напорный водовод, который при определении $K_{\text{ин.тр}}$ нужно учитывать отдельно.

3.3. Алгоритм вычислений и программа расчета гидравлического удара ГУ-Ж(3)

Решение дифференциального уравнения (3.5) и определение $\Delta H_{\text{тр}}$ по заданному значению $K_{\text{ин.тр}}$ осуществляется численным методом. На шаге i в интервале времени Δt имеем

$$\Delta H_{\text{тр}i} = -K_{\text{ин.тр}} \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta t}.$$

Подставляя значение Q_i по (3.7), получаем

$$\Delta t \Delta H_{\text{тр}i} = -K_{\text{ин.тр}} Q_{1i} \sqrt{H_0 + \Delta H_{\text{тр}i}} + K_{\text{ин.тр}} Q_{i-1}.$$

Отсюда, решая квадратное уравнение, находим инерционный напор тракта на шаге i :

$$\Delta H_{\text{тр}i} = A \mp \sqrt{A^2 - \left(\frac{K_{\text{ин.тр}}}{\Delta t} \right)^2 (Q_{i-1}^2 - Q_{1i}^2 H_0)}, \quad (3.9)$$

где

$$A = \frac{K_{\text{ин.тр}}}{\Delta t} \left(Q_{i-1} + \frac{K_{\text{ин.тр}} Q_{1i}^2}{2 \Delta t} \right). \quad (3.9\text{а})$$

Зная инерционный напор всего проточного тракта $\Delta H_{\text{тр}}$, можно найти гидравлический удар в данном сечении M водовода (тракта) из соотношения

$$\Delta H_M = \frac{K_{\text{ин.М}}}{K_{\text{ин.тр}}} \Delta H_{\text{тр}}. \quad (3.9\text{б})$$

Таким образом, на каждом шаге i определяют $\Delta H_{\text{тр}i}$ по (3.9) и Q_i по (3.7), а также удар в промежуточных сечениях водовода ΔH_{1i} , ΔH_{2i} , ..., ΔH_{Mi} по (3.9б) (ударные давления имеют по два индекса, указывающих сечение и шаг, расход имеет один индекс – шаг). Ниже приведена программа ГУ-Ж(3) для расчета гидравлического удара в напорном водоводе, состоящем из трех участков с числом сечений $N=4$ (рис. 3.1, б).

Общие исходные данные представлены в табл. 3.1а.

Результаты расчетов по программе ГУ-Ж(3) регистрируются в табличной форме (табл. 3.1б). Здесь и далее для упрощения формы таблицы вводимые в регистр памяти данные обозначены: над чертой – параметр, под чертой – регистр памяти.

Т а б л и ц а 3.1а. Общие исходные данные

Параметр	H , м	Δt , с	$K_{\text{ин.тр}}$	$K_{\text{ин.2}}/K_{\text{ин.тр}}$	$K_{\text{ин.3}}/K_{\text{ин.тр}}$
Регистр	P3	P5	PA	PB	PC

Программа ГУ-Ж(3)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИПД	Fx^2	ИПА	x	ИП5	:	2	:	ИП4	+
1	ИПА	ИП5	:	x	↑	Fx^2	ИПД	Fx^2	ИП3	x
2	/-	ИП4	Fx^2	+	ИПА	Fx^2	x	ИП5	Fx^2	:
3	-	$F\sqrt{-}$	или	П0	↑	↑	ИПВ	x	П1	$F\sqrt{-}$
4		ΔH_3	+	П2	ИП0	ИП3	H	$F\sqrt{-}$	ИПД	x
5	ИПС	x							П4	
C/P										

Т а б л и ц а 3.1б. Результаты расчетов

Шаг счета i	Время t , с	$Q_1(t)$, $\text{м}^2/\text{s}$	$\Delta H_{\text{тр}}$, м	ΔH_2 , м	ΔH_3 , м	Q , $\text{м}^3/\text{с}$
		PD	P0	P1	P2	P4

Программа ГУ-Ж(3) состоит из трех блоков. Адреса 00-33 занимают блок 1, осуществляющий определение $\Delta H_{\text{тр}}$, что соответствует ΔH_1 (рис. 3.1, б) по формуле (3.9). Далее операциями 34 и 35 найденные значения $\Delta H_{\text{тр}}$ вносятся в регистры Y и Z стековой памяти для того, чтобы последующими операциями 37 и 41 найти значения ΔH_2 и ΔH_3 . Адреса 34-42 составляют блок 2. Заключительная часть, блок 3 (адреса 43-49), служит для определения по (3.7) расхода Q_i . Адрес 50 – остановка счета.

Необходимо установить правило знаков по адресу 32, что соответствует знакам в решении (3.9) для $\Delta H_{\text{тр}}$. При этом следует иметь в виду, что решение сводится к нахождению точки пересечения графика функции $Q_i = Q_{1i}\sqrt{H_0 + \Delta H}$ (параболы) с графиком функции $Q_i =$

$$= Q_{i-1} - \frac{\Delta t}{K_{\text{ин}}} \Delta H \text{ (прямой).}$$

При положительном направлении расхода $Q_{i-1} \geq 0$ (течение к гидромашине или затвору) всегда берется знак минус (положительный и отрицательный удары). Для отрицательного направления расхода (течение от гидромашины или затвора) берется знак минус или плюс. Знак плюс соответствует условиям $Q_{i-1} > Q_{1i}\sqrt{H_0}$ и $\Delta H_{\text{тр}} < 0$.

Введение знака плюс по адресу 32 может потребоваться в процессе расчета гидравлического удара при потере привода гидроагрегата ГАЭС, работавшего в насосном режиме, или для расчета отрицательного удара в напорном низовом водоводе при закрытии турбин.

Следует иметь в виду, что при полном закрытии турбин $Q_1 = 0$ и подкоренное выражение в (3.9) равно нулю. Однако в силу погрешности округления выражение может оказаться отрицательным числом, хотя и очень малого абсолютного значения. Тогда в следующей операции F $\sqrt{ }$ (адрес 31) микрокалькулятор останавливается и на индикаторе появится сигнал ЕГГОГ. Чтобы этого избежать, рекомендуется вместо $Q_1 = 0$ принимать какое-то небольшое, но конечное значение, например $Q_1 = 0,001$. Это не повлияет на результат, но исключит сбой в выполнении программы.

Введем понятие динамического напора для данного сечения M , H_M , отсчитываемого от уровня нижнего бьефа $z_{\text{НБ}}$, причем

$$H_M = H_{\text{стат}} + \Delta H \pm h_M - v^2/2g. \quad (3.10)$$

Динамическое давление p_M в напорном водоводе при этом определяется по формуле

$$p_M/\rho g = H_M + z_{\text{НБ}} - z_M, \quad (3.10a)$$

где $H_{\text{стат}}$ – статический напор, соответствующий условиям $Q = 0$; h_M – гидравлические потери на участке водовода $M = N$ (при направлении расхода от M к N – знак плюс, в противоположном случае – знак минус);

v – средняя скорость, м/с; z_M – отметка центра данного сечения M водовода, м.

Поскольку задачей расчетов гидравлического удара является определение давлений в напорных водоводах, возникающих при переходных процессах, то важно установить, как следует использовать найденные значения ударного давления $p_M/\rho g$.

Основным здесь является правильный учет гидравлических потерь и скоростного напора, которые в расчет гидравлического удара не включены. Достаточно надежные результаты для водоводов ГЭС и ГАЭС дает следующий способ: во всех случаях в напорных водоводах значения гидравлического удара в метрах откладываются в соответствующем знаку удара направлении от пьезометрической линии отвечающей конечному расходу.

Результаты расчетов (табл. 3.1, б) можно дополнить значениями динамического напора H_1 , H_2 , H_3 , определяемыми по (3.10). Но вычисляются они отдельно, после завершения расчета гидравлического удара ΔH .

Для использования программы расчета ГУ-Ж(3) приведен числовой пример.

Пример. 3.1. Определить гидравлический удар в напорном водоводе (рис. 3.1, б) при следующих данных (табл. 3.2а).

Расход $Q_0 = 80 \text{ м}^3/\text{с}$; статический напор $H_{\text{стат}} = 150 \text{ м}$; общие гидравлические потери 4 м; $Q_{10} = Q_0/\sqrt{H_0} = 80/\sqrt{146} = 6,6 \text{ м}^{2,5}/\text{с}$. Режим закрытия затвора линейный. Общее время закрытия $T_s = 15 \text{ с}$.

Решение. 1. Определение постоянной инерции T_w . По (3.6а) с учетом (3.6б) и (3.8) получаем

$$T_w = \frac{Q_0}{H_0} K_{\text{ин. тр}} = \frac{80}{146} 9,3 = 5,1 \text{ с.}$$

Таблица 3.2а. Параметры трубопровода

Участок	Диаметр $D_M, \text{м}$	Площадь сечения, м^2	Длина $l, \text{м}$	Коэффициент, м		
				$K_{\text{ин}} M$	$\sum_{N=1}^M K_{\text{ин}} M$	$K_{\text{ин}} M / K_{\text{ин. тр}}$
1	4,2	14	500	3,6	9,3	1
2	4,5	16	500	3,15	5,7	0,61
3	5	20	500	2,55	2,55	0,275

Примечание. $\sum_{N=1}^M K_{\text{ин}} M$ берется от последнего участка $N - 1$ до данного M (в таблице суммирование снизу).

Таблица 3.2б. Общие исходные данные

Параметр	H_0 , м	Δt , с	$K_{\text{ин.тр}}$	$K_{\text{ин2}}/K_{\text{ин.тр}}$	$K_{\text{ин1}}/K_{\text{ин.тр}}$
Регистр	P3	P5	PA	PB	PC
Значение	146	3,75	9,3	0,61	0,275

Таблица 3.2в. Результаты расчетов

Шаг сче-та i	Вре-мя t , с	$Q_I(t)$, $\text{м}^2/\text{s}$	$\Delta H_1 = \Delta H_{\text{тр}}$, м	$\Delta H_2, \text{м}$			Динамический на-пор, м
				P1	P2	P4	
0	0	6,6	0	0	0	80	146 147,8 149,1
1	3,75	4,95	33,8	20,6	9,3	66,4	183,8 170,6 159,3
2	7,5	3,3	50	30,5	13,8	46,2	200 180,5 163,8
3	11,25	1,65	56,4	34,4	15,5	23,5	206,4 184,4 165,5
4	15	0	58,2	35,5	16	0	208,2 185,5 166

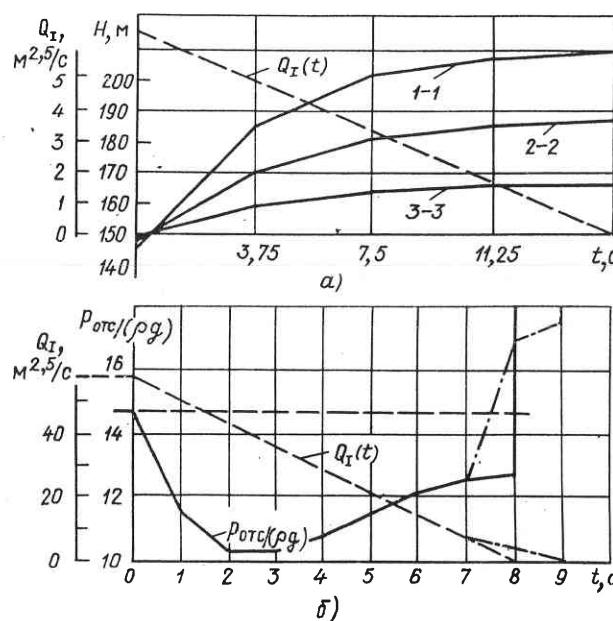


Рис. 3.2. Результаты расчета гидравлического удара по программе ГУ-Ж (3)

Согласно приведенной выше классификации напорная система высоконерционная.

2. Определение переходного процесса при закрытии турбин по программе ГУ-Ж (3) (поскольку $Q_{i-1} > 0$, по адресу 32 берется знак минус). Принимаем $\Delta t = 3,75$ с (четыре шага), исходные данные приведены в табл. 3.2б.

В табл. 3.2 в напор H начального режима $t = 0$ определен с учетом гидравлических потерь, которые распределены по участкам пропорционально l/D^4 . Динамические напоры H_1 , H_2 и H_3 в сечениях 1, 2 и 3 вычислены по (3.10).

Графики изменения динамического напора во времени для расчетных сечений 1-1, 2-2, 3-3 и расхода $Q_I(t)$ – см. рис. 3.2, а.

3.4. Приведение напорных водоводов

Типы напорных водоводов достаточно разнообразны. По форме осевой линии они разделяются на одноточные, осуществляющие подвод воды к отдельному гидроагрегату или к группе гидроагрегатов с короткими ответвлениями, и разветвленные (см. рис. 3.1, в). Кроме того, могут изменяться размеры (иногда и форма) их поперечного сечения. Одноточный водовод может быть постоянно-го сечения (диаметра) – в этом случае водовод называют простым (рис. 3.1, а), или с переменным диаметром, называемый телескопическим (рис. 3.1, б). В низконапорных водоводах размер и форма по-перечного сечения могут непрерывного изменяться по длине (участки во-доприемников и водовыпусков, элементы проточного тракта турбин – отсасывающая труба и др.).

Если используется описанный выше метод расчета гидравлического удара жесткого, то все отмеченные факторы формы сечения можно учесть путем приведения водовода к расчетному. Общим принципом приведения служит сохранение значений постоянной инерции T_w или, что равносильно, коэффициента инерции $K_{\text{ин.тр}}$ для всего тракта и для отдельных участков водовода. При этом могут изменяться (приводиться) значения и сечений $F_{\text{пр}}$, и длин $L_{\text{пр}}$. С учетом изложенного общим условием приведения является зависимость

$$\frac{L_{\text{пр}}}{F_{\text{пр}}} = \sum \frac{l_i}{F_i}, \quad (3.11)$$

в которой отношение l_i/F_i суммируется по всему тракту длиной L . Использование изложенных принципов приведения дано в примере 3.2.

Пример 3.2. Привести водовод, рассмотренный в примере 3.1, к про-стому с сохранением его длины L .

Решение. Пользуясь табл. 3.1а, по (3.11) находим

$$F_{\text{пр}} = L / \sum \frac{l_i}{L F_i} = 1500 / \left(\frac{500}{14} + \frac{500}{16} + \frac{500}{20} \right) = 16,3 \text{ м}^2.$$

Если выполнить расчет гидравлического удара для простого водовода $F = 16,3 \text{ м}^2$, $L = 1500 \text{ м}$, то округляя получим те же значения ΔH_1 и Q , что и в табл. 3.1в.

Разветвленные водоводы также могут приводиться к однониточным, если работающие гидроагрегаты регулируются синхронно или отдельные гидроагрегаты полностью закрыты и соответствующие отводы представляют собой тупики. Например, для схемы на рис. 3.1, в, если все четыре гидроагрегата регулируются синхронно (пропускная способность каждого Q_1), то приведенный однониточный водовод имеет вид, показанный на рис. 3.1, г, и тогда $Q_{\text{общ}} = 4Q_1$ (длина участков 1, 2, 3 сохраняются). Если работают два гидроагрегата, а два полностью закрыты, то приведенный однониточный водовод имеет вид, показанный на рис. 3.1, д, и тогда $Q_{\text{общ}} = 2Q_1$. Но здесь возможны два случая: если работающие гидроагрегаты расположены на разных ветвях, то $F_2 = 2f_2$, а если на одной, то $F_2 = f_2$. Очевидно, что гидравлический удар в обоих случаях будет различным. При расчете по условию жесткого удара ударное давление по длине тупика сохраняет то же значение, что и в створе отвода основного водовода. Поэтому тупик можно отдельно не учитывать.

3.5. Определение давления за рабочим колесом гидромашины при переходных процессах

В полуподземных и подземных зданиях ГЭС и ГАЭС отсасывающая труба может иметь довольно большую длину, кроме того, иногда применяют и низовые напорные водоводы. В этих случаях возникает опасность разрыва сплошности потока под рабочим колесом при быстром закрытии турбины во время работы в турбинном режиме и при быстром увеличении расхода при работе в насосном режиме. Опасность такого разрыва связана с тем, что при смыкании образовавшейся полости разрыва (каверны) возникает прямой удар, сопровождающийся большим повышением давления, а в процессе смыкания возможен удар потока о вращающееся рабочее колесо, так называемый обратный удар, особенно опасный для осевых турбин, так как он может вызывать подбрасывание вращающихся частей гидроагрегата и даже приводить к поломке лопастей рабочего колеса [4].

Вопрос о допустимом понижении давления за рабочим колесом (начальное сечение отсасывающей трубы) при переходных процессах достаточно сложен, особенно для гидроагрегатов с осевыми турбинами, и для его решения требуются специальные исследования. Особенность осевых турбин состоит в том, что их вращающееся рабочее колесо создает насосный эффект, способствующий повышению расхода и понижению

давления в предколесном пространстве (между решетками направляющего аппарата и рабочего колеса). Этот эффект, проявляющийся в том, что с ростом приведенной частоты вращения увеличивается и приведенный расход (при постоянстве открытия направляющего аппарата и угла установки лопастей рабочего колеса) $\partial Q'_1 / \partial n'_1 > 0$, что и приводит к отмеченному понижению давления в предколесном пространстве, особо существенному при малых открытиях направляющего аппарата. В результате, если даже за рабочим колесом имеется повышенное абсолютное давление, разрыв сплошности потока может возникнуть в предколесном пространстве, по инерции вода отойдет от рабочего колеса и разрыв распространится на начальную область отсасывающей трубы. В этом случае при обратном движении потока неизбежно произойдет обратный удар воды о вращающееся рабочее колесо. Во избежание этого надо обеспечить достаточно высокое давление во входном сечении отсасывающей трубы в течение всего переходного процесса. Ориентировочно для осевых турбин можно принять следующие ограничения:

в диапазоне открытий направляющего аппарата или значений приведенного расхода от 100 до 25 % абсолютное давление во входном сечении отсасывающей трубы должно быть не менее 60–70 кПа или соответственно $p_{\text{отс}} / (\rho g) \geq 6 \div 7$ м; при меньших значениях открытия или приведенного расхода абсолютное давление должно быть близко к существовавшему до начала переходного процесса.

Для РО турбин и насостурбин, у которых насосное действие рабочего колеса направлено обратно течению потока (линии равного открытия на универсальной характеристике имеют отрицательный наклон) $\partial Q'_1 / \partial n'_1 < 0$, можно допускать большее понижение абсолютного давления – до 20 кПа или $p_{\text{отс}} / (\rho g) \geq 2$ м во входном сечении отсасывающей трубы независимо от открытия.

Из приведенного рассмотрения следует, что для оценки безопасности работы гидромашины необходимо знать, как изменяется давление во входном сечении отсасывающей трубы в течение всего переходного процесса. Среднее давление $p_{\text{отс}} / (\rho g)$ определяется зависимостью

$$\frac{p_{\text{отс}}}{\rho g} = \frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} - H_s - k_{\text{диф}} Q^2 + \Delta H_{\text{н}} \pm h_{\text{н}}, \quad (3.12)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; приближенно $p_{\text{атм}} / (\rho g) = 10,3 - \nabla / 900$, м. вод. ст.; ∇ – абсолютная отметка нижнего бьефа, м; H_s – высота отсасывания, м; $\Delta H_{\text{н}}$ – гидравлический удар в низовом сечении напорного тракта (входное сечение отсасывающей трубы, м); $h_{\text{н}}$ – гидравлические потери в низовом напорном водоводе (знак плюс – для турбинного режима, знак минус – для насосного). При определении гидравлического удара $\Delta H_{\text{н}}$ рекомендуется учитывать коэффициенты инерционности лопастной системы $K_{\text{ин.лоп}}$ по (3.8г), отсасывающей

трубы $K_{\text{ин.отс}}$ по (3.8д) и низового напорного водовода, если он имеется.

Диффузионный коэффициент отсасывающей трубы $k_{\text{диф}}$ в (3.12) определяют выражением

$$k_{\text{диф}} = \frac{1}{2gD_1^4} \left(\frac{\alpha_2}{F_{12}} - \frac{\alpha_5}{F_{15}} \right) \eta_{\text{отс}}, \quad (3.12a)$$

где α_2 и α_5 – коэффициенты Кориолиса для входного и выходного сечений отсасывающей трубы, ориентировочно $\alpha_2 = 1,2$ и $\alpha_5 = 1,4$; F_{12} и F_{15} – относительные площади входного и выходного сечений отсасывающей трубы (при диаметре рабочего колеса 1 м); $\eta_{\text{отс}}$ – КПД отсасывающей трубы, ориентировано, с запасом, $\eta_{\text{отс}} = 0,85$; D_1 – диаметр рабочего колеса, м.

Для решения задачи можно использовать программу ГУ-Ж(3), которая дополняется блоком определения давления во входном сечении отсасывающей трубы. Вводятся следующие дополнительные исходные данные:

$p_{\text{атм}}/(\rho g) - H_s$ в регистр Р6;

$k_{\text{диф}}$ в регистр Р7.

Дополнительный блок записывается с адреса 51, учитывая его использование с программой ГУ-Ж(3). Искомое значение получается на индикаторе.

Блок определения давления за рабочим колесом к программе ГУ-Ж(3)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	C/P	ИП4	Fx^2	ИП7	x	ИП6	↗	-	ИП2	$P_{\text{отс}}/(\rho g)$
6	C/P									

Применение блока определения давления за рабочим колесом с программой ГУ-Ж(3) дано в числовом примере 3.3.

Пример 3.3. Произвести расчет гидравлического удара для гидроагрегата полуподземного здания ГЭС с осевой ПЛ турбиной диаметром $D_1 = 6$ м, имеющей напор $H_0 = 36$ м, расход $Q_0 = 345 \text{ м}^3/\text{с}$, высота отсасывания $H_s = -12$ м. Время закрытия $T_s = 8$ с. Пропускная способность изменяется линейно во времени. Геометрические размеры проточной части турбины – см. рис. 3.3. Геометрические параметры турбины:

$\bar{b}_0 = 0,32$; $\bar{d}_K = 0,45$; $\bar{D}_2 = 1$; спираль бетонная; $\varphi_{\text{окв}} = 225^\circ$;

$v_{\text{сп}} = 6 \text{ м/с}$ (по рис. 3.1, e).

Решение. Определение коэффициентов инерционности. Верховой водовод [по (3.4а)]:

$$K_{\text{ин.в}} = \frac{1}{g} \frac{18,4}{(7,8 \cdot 2 - 1,8) \cdot 0,5 (12 + 15)} + \frac{1}{g} \frac{7,8}{2 \cdot 7,8 \cdot 12} = \\ = 0,0101 + 0,0043 = 0,0144.$$

Тракт турбины. Спиральная камера, $\lambda_{\text{сп}} = 2$ [по (3.8в)]:

$$K_{\text{ин.сп}} = \frac{1}{g} \frac{2 \cdot 6}{345 - 225/360} 6 = 0,0348.$$

Лопастная система, $\lambda_{\text{лоп}} = 1,3$ [по (3.8г)]:

$$K_{\text{ин.лоп}} = \frac{1}{g} \frac{1,3}{1,35 \left(0,32 + \frac{1 - 0,45^2}{4} \right) 6} = 0,0315.$$

Отсасывающая труба [по (3.8д)] при длине трубы $L_{\text{отс}} = 13,8 + 2\pi \times 8,5 \times 0,25 + 75 = 102,1$ м:

$$K_{\text{ин.отс}} = \frac{2}{g} \frac{102,1}{\pi \cdot 6^2 / 4 + 13,2 \cdot 8,1} = 0,154.$$

Суммарный коэффициент инерционности напорного тракта по (3.4а): $K_{\text{ин.тр}} = 0,0144 + 0,0348 + 0,0315 + 0,154 = 0,235$, в том числе для верховой части $K_{\text{ин.в}} = 0,0144 + 0,0348 = 0,049$; для низовой $K_{\text{ин.н}} = 0,0315 + 0,154 = 0,186$. Отношения $K_{\text{ин.в}}/K_{\text{ин.тр}} = 0,049/0,235 = 0,21$ и $K_{\text{ин.н}}/K_{\text{ин.тр}} = 0,186/0,235 = 0,79$ (последнее отношение берется со знаком минус, так как при закрытии турбины в низовом водоводе удар отрицательный).

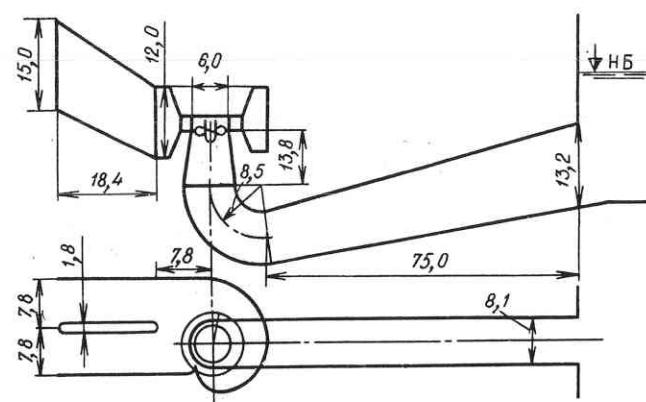


Рис. 3.3. Проточная часть осевой турбины (к примеру 3.3)

Диффузорный коэффициент отсасывающей трубы [по (3.12а)] при $\eta_{\text{отс}} = 0,85$; $a_2 = 1,2$; учитывая большую длину трубы, принимаем $a_5 = 1,2$:

$$k_{\text{диф}} = 1/19,6 \cdot 6^4 (1,2/0,78^2 - 1,2/2,8^2) 0,85 = 0,000061.$$

Таблица 3.3а. Общие исходные данные

Параметр	H_0 , м	Δt , с	$K_{\text{ин.тр}}$	$K_{\text{ин.в}}/K_{\text{ин.тр}}$	$K_{\text{ин.н}}/K_{\text{ин.тр}}$	$10-H_s$	$k_{\text{диф}}$
Регистр	P3	P5	PA	PB	PC	P6	P7
Значение	36	1	0,235	0,21	-0,79	22	0,000061

Начальное Q_{10} определяется по (3.7) при $Q = Q_0$ и $\Delta H = 0$: $Q_{10} = Q_0/\sqrt{H_0} = 345/\sqrt{36} = 58 \text{ м}^{2,5}/\text{с}$.

При линейном режиме регулирования турбины $Q_1(t)$ определяется по формуле

$$Q_1(t) = Q_{10} (1 - t/T_s). \quad (3.13)$$

Поскольку расчет ведется через интервал времени $\Delta t = 1$ с, то по (3.13) вычисляем Q_1 для $t = 1, 2, \dots, 8$ с и записываем результаты расчета в табл. 3.3б. Для определения $p_{\text{отс}}/(pg)$ для $t = 0$ устанавливаем начальные значения и выполняем счет.

После нажатия на клавишу С/П получаем на индикаторе $p_{\text{отс}}/(pg) = 14,7$ м. Результаты расчета по программе ГУ-Ж(3) с дополнительным блоком для определения давления за рабочим колесом (поскольку $Q_{i-1} > 0$, по адресу 32 взят знак минус) приведены в табл. 3.3б и на рис. 3.2, б.

Таблица 3.3б. Результаты расчетов гидравлического удара

Шаг счёта i	t , с	$Q_1, \text{м}^{2,5}/\text{с}$	$\Delta H_{\text{тр}}, \text{м}$	$\Delta H_1, \text{м}$	$\Delta H_{\text{н}}, \text{м}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$p_{\text{отс}}/(pg), \text{м}$
		PD	P0	P1	P2	P4	Индикатор
0	0	58	0	0	0	345	14,7
1	1	50,75	4,85	1,08	-3,83	324,4	11,75
2	2	43,5	8,24	1,73	-6,51	289,3	10,39
3	3	36,25	10,13	2,13	-8	246,2	10,3
4	4	29	11,13	2,34	-8,79	199,1	10,82
5	5	21,75	11,53	2,42	-9,12	150	11,52
6	6	14,5	11,7	2,46	-9,25	100,2	12,14
7	7	7,25	11,76	2,47	-9,29	50,1	12,55
8	8	0	11,77	2,47	-9,3	0	12,7
9	9	0	0	0	0	0	22

Таблица 3.3в. Результаты расчета при введении демпфирования

Шаг счёта i	t , с	$Q_1, \text{м}^{2,5}/\text{с}$	$\Delta H_{\text{тр}}, \text{м}$	$\Delta H_1, \text{м}$	$\Delta H_{\text{н}}, \text{м}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$p_{\text{отс}}/(pg), \text{м}$	Индикатор
		PD	P0	P1	P2	P4		
7	7	7,25	11,76	2,47	-9,29	50,1	12,55	
8	8	3,6	6,27	1,32	-4,96	23,41	17,01	
9	9	0	5,5	1,16	-4,34	0	17,65	
10	10	0	0	0	0	0	22	

В табл. 3.3б $\Delta H_{\text{тр}}$ — суммарный инерционный напор для всего тракта; ΔH_1 — гидравлический удар в верховой части (верховом водоводе и спиральной камере); $\Delta H_{\text{н}}$ — гидравлический удар в низовой части лопастной системе и отсасывающей трубе; $p_{\text{отс}}/(pg)$ — пьезометрическое давление во входном сечении отсасывающей трубы. Минимальное значение $p_{\text{отс}}/(pg) = 10,3$ м (избыточное 0,3 м) получено в конце 3-й с, но это значение больше, чем допустимое (до 6–7 м). Далее давление растет и к концу закрытия $p_{\text{отс}}/(pg)$ достигает 12,7 м. Но это на 2 м ниже начального, что нежелательно. Этот недостаток можно устранить, введя замедление закрытия турбины (демпфирование) к концу хода. Увеличиваем общее время закрытия до 9 с. Результаты расчета при введении демпфирования — см. табл. 3.3в. Благодаря введенному демпфированию после 7-й с давлением 147 кПа даже выше, чем начальное (см. рис. 3.2, б штрихпунктирная линия).

Глава 4

РАСЧЕТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА С УЧЕТОМ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

4.1. Основные расчетные соотношения

Когда давление в жидкости превышает давление насыщенного пара $p_{\text{п.ж}}/(pg)$, жидкость представляет собой упругодеформируемую среду. При этом изменение давления на Δp сопровождается объемной деформацией жидкости Δw и изменением ее плотности $\Delta \rho$:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = - \frac{\Delta w}{w} = \frac{\Delta p}{K_{\text{ж}}}.$$

Здесь ρ и w — начальные значения плотности и объема; $K_{\text{ж}}$ — коэффициент или модуль объемной упругости жидкости. Для холодной воды ориентировочно $K_{\text{ж}} = 2,1 \cdot 10^3$ МПа.



Скорость распространения возмущения или звука в упругой среде (жидкости) составляет

$$c_{3B} = \sqrt{K_{ж}/\rho_{ж}}. \quad (4.1)$$

Принимая для воды $K_{ж} = 2,1 \cdot 10^3$ МПа и $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³, по (4.1) получаем $c_{3B} = 1450$ м/с.

Однако, если в жидкости имеется свободный воздух (газ) в виде пузырьков, даже при очень небольшом его содержании, модуль упругости смеси $K_{ж,B}$ и соответственно скорость звука резко снижаются. Так, для условий изотермического процесса деформации газа

$$K_{ж,B} = \frac{K_{ж}}{1 - \frac{\theta_0}{0,1+p} + \frac{\theta_0 K_{ж}}{(0,1+p)^2}}, \quad (4.2)$$

где θ_0 – отношение объема воздуха, с давлением равным атмосферному, к полному объему смеси; p – избыточное давление в среде. Поскольку при очень малых значениях θ_0 плотность практически сохраняется, то можно считать, что

$$\frac{c_{3B,j,B}}{c_{3B,j}} = \sqrt{\frac{K_{ж,B}}{K_{ж}}}. \quad (4.2a)$$

Например, для воды при $p = 0,3$ МПа и $\theta_0 = 0,005$ (0,5 %) по (4.1) и (4.2a) получаем $K_{ж,B}/K_{ж} = 1/66$ и $c_{3B,j,B}/c_{3B,j} = 1/8,1$. Соответственно при $\theta_0 = 0,001$ (0,1 %) получим $1/14,2$ и $1/3,8$. В результате скорость распространения звука в смеси упадет с 1450 до 180 и 370 м/с. Интересно отметить, что при содержании свободного воздуха в 0,5 % объема смеси скорость звука в среде вода–воздух оказывается меньше, чем скорость звука в воздухе.

Как видно из (4.2), модуль объемной упругости среды жидкость–воздух (газ) зависит от давления в этой среде.

Если жидкость находится в длинном водоводе, стенки которого могут деформироваться, то изменение давления будет вызывать изменение диаметра и площади поперечного сечения ΔF . При этом для упругого водовода можно записать соотношение

$$\Delta F/F = \Delta p/K_{сеч},$$

где F – площадь сечения водовода; $K_{сеч}$ – коэффициент упругого изменения площади сечения. В результате деформирования изменяется также объем, занимаемый жидкостью, и скорость распространения возмущения c вдоль трубы, заполненной жидкостью, будет меньше, чем скорость распространения возмущения в самой жидкости $c_{3B,j}$, т.е.

$$c = c_{3B,j}/\sqrt{1 + K_{ж}/K_{сеч}}. \quad (4.3)$$

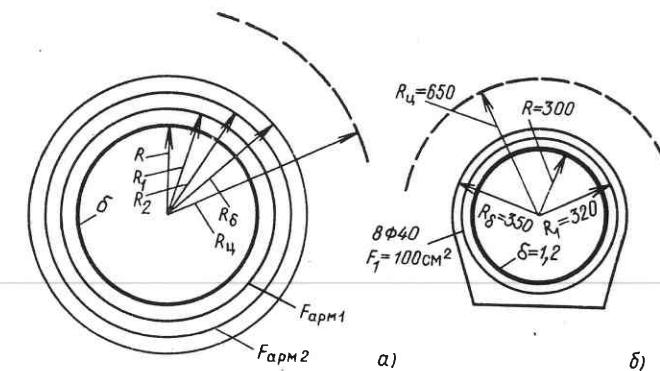


Рис. 4.1. Сечения водоводов

Коэффициент упругого изменения сечения $K_{сеч}$ зависит от конструкции, материала и формы поперечного сечения водовода. Для тонкостенной трубы с круговым поперечным сечением при условии, что оболочка работает только на растяжение,

$$K_{сеч} = E_{тр} \delta / D, \quad (4.4)$$

где $E_{тр}$ – модуль упругости материала трубы, для стали $E_{тр} = 200 \cdot 10^3$ МПа; δ – толщина, м; D – внутренний диаметр, м. Для сложного составного водовода (рис. 4.1) в предположении работы в упругой зоне $K_{сеч}$ можно представить суммой:

$$K_{сеч} = A_0 + B + A_1 + A_2 + C \frac{F}{F_1} N, \quad (4.5)$$

в которой каждый член учитывает работу (изменение напряженного состояния) отдельных элементов: стальная оболочка, $A_0 = \frac{E_{тр} \delta}{2R}$; бетон-

ная обделка, $B = \frac{E_b \ln R_b / R}{2(1 - \mu_b^2)}$; кольцевая арматура (соответственно

первый и второй слой), $A_1 = \frac{E_{тр} F_{арм1}}{2R_1 \cdot 100}$; $A_2 = \frac{E_{тр} F_{арм2}}{2R_2 \cdot 100}$; слой

цементации с породой, $C = \frac{E_{ц} \ln R_{ц} / R_b}{2(1 - \mu_{ц}^2)}$; отпор породы, $N = \frac{E_{пор}}{2(1 + \mu_{пор})}$.

Здесь R , R_b , R_1 , R_2 , $R_{ц}$ – радиусы; $F_{арм1}$ и $F_{арм2}$ – площадь сечения стержней кольцевой арматуры на 1 м длины водовода (рис. 4.1, а). Для бетона ориентировочно: $\mu_b = 0,15$; $E_b = 26 \cdot 10^3$ МПа для марки бетона В20 и $E_b = 33 \cdot 10^3$ МПа для В30. Для породы параметры зависят от степени ее крепости. Некоторые значения [11] даны в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Параметры скальных пород

Степень крепости	Коэффициент крепости $f_{\text{кр}}$	Модуль упругости (средний) $E \cdot 10^3 \text{ МПа}$	Коэффициент Пуассона $\mu_{\text{пор}}$
Очень крепкие	15	12	0,1–0,2
Крепкие	10	7	0,14–0,2
"	8	5	0,16–0,27
Довольно крепкие	6	3,5	0,18–0,3
Средние	4	2,5	0,27–0,32
Довольно мягкие	2	1,25	0,27

Для зоны цементации параметры можно принимать, как для данного грунта, но с удвоенным коэффициентом крепости (для очень крепких грунтов параметры сохраняются).

Формула (4.5) универсальна и пригодна для водоводов различного вида. Для чисто стального водовода $K_{\text{сеч}} = A_0$; для сталежелезобетонного из (4.5) исключаются члены C и N , для сталебетонного – соответственно A_1 и A_2 .

Применение формул (4.3) и (4.5) показано на числовом примере.

Пример 4.1. Определить скорость упругой волны для напорного водовода (см. рис. 4.1, б). Порода – песчаник, довольно крепкий, $f = 6$, водовод из бетона В20.

Решение. Для бетона В20 принимаем $E_b = 26 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ и $\mu_b = 0,15$. Для пород по табл. 4.1 $E_{\text{пор}} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ и $\mu_{\text{пор}} = 0,25$; для зоны цементации $f = 6 + 2 = 8$, $E_c = 5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ и $\mu_c = 0,2$; для стальной оболочки $E_{\text{тр}} = 200 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

По (4.5)

$$K_{\text{сеч}} = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{2 \cdot 300} + \frac{26 \cdot 10^3 \ln(350/300)}{2(1 - 0,15^2)} + \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 100}{2 \cdot 320 \cdot 100} + \\ + \frac{5 \cdot 10^3 \ln(650/350)}{2(1 - 0,2^2)} + \frac{3,5 \cdot 10^3}{2(1 + 0,25)} = \\ = 10^3 (0,4 + 2,04 + 0,31 + 1,07 + 1,4) = 5,22 \cdot 10^3.$$

Для воды $K_b = 2,1 \cdot 10^3 \text{ МПа}$. Вычисляем по (4.3)

$$c = \frac{1450}{\sqrt{1 + (2,1 \cdot 10^3 / 5,22 \cdot 10^3)}} = 1230 \text{ м/с.}$$

Явление гидравлического удара, т.е. изменение во времени расхода Q и напора H в сечениях по длине напорного водовода описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, имею-

щей вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= g F \frac{\partial H}{\partial x}; \\ \frac{\partial Q}{\partial x} &= \frac{g F}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t}; \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

здесь $Q(x, t)$ и $H(x, t)$ – искомые функции; x – координата по длине водовода (см. рис. 3.1, а); F – площадь сечения водовода; c – скорость распространения упругой волны вдоль водовода.

Система (4.6) не учитывает изменение гидравлических потерь и скоростного напора, но достаточно проста и имеет точное решение. Существуют различные формы решения системы (4.6), но в практике инженерных расчетов наибольшее распространение получил так называемый метод характеристик. По этому методу в поле координат x, t определяют кривые (характеристики), вдоль которых система (4.6) в частных производных преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для системы (4.6) уравнения характеристик имеют вид

$$x = ct + K_1; \\ x = -ct + K_2; \quad \left. \right\} \quad (4.7)$$

здесь K_1 и K_2 – произвольные постоянные.

Если на данном участке скорость распространения упругой волны c не зависит от изменяющихся параметров, то согласно (4.7) характеристики в поле x, t представляют собой две системы прямых с наклоном $+c$ и $-c$ к оси t . Первая – это прямая характеристика, определяющая движение волны возмущения, а вторая – обратная, определяющая движение отраженной волны.

Решение системы дифференциальных уравнений (4.6) для участка l_M между сечениями M и $M+1$ (рис. 4.2, а) с применением метода характеристик представляется следующими двумя алгебраическими уравнениями:

$$H_{M,t} - H_{M+1,t+\theta} = \frac{c_M}{gF_M} (Q_{M,t} - Q_{M+1,t+\theta}) \quad (4.8)$$

и

$$H_{M+1,t} - H_{M,t+\theta} = - \frac{c_M}{gF_M} (Q_{M+1,t} - Q_{M,t+\theta}), \quad (4.9)$$

в которых θ – время пробега упругой волны между сечениями M и

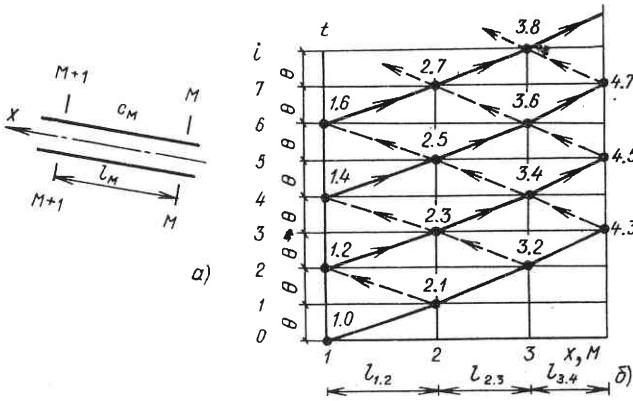


Рис. 4.2. К расчету гидравлического удара методом характеристик

$M+1$ длиной l_M ; c_M – скорость распространения волны на этом участке;
 $\theta = l_M/c_M$. (4.10)

В (4.8) и (4.9) каждая переменная фиксируется двумя индексами. Первый определяет номер сечения водовода, а второй – время. Например $H_{M,t}$ – напор в сечении M в момент времени t ; $Q_{M+1,t+\theta}$ – расход в сечении $M+1$ в момент времени $t+\theta$.

Уравнения (4.8) и (4.9), часто называемые цепными уравнениями, позволяют определить процесс гидравлического удара в водоводах различных видов.

Рассмотрим процедуру расчета гидравлического удара методом характеристик на примере телескопического водовода (см. рис. 3.1, б) с двумя переходами ($N = 4$). Для упрощения первоначально примем такое расположение переходов, при котором время пробега волны для всех участков одинаково, т.е. соблюдено условие

$$l_1/c_1 = l_2/c_2 = l_3/c_3 = \theta.$$

Сетка хода счета по характеристикам в координатах x, t показана на рис. 4.2, б. Временной интервал счета θ . Введен также показатель числа интервалов $t = i\theta$, что удобно, когда интервал счета сохраняется постоянным.

Узлы сетки характеристик обозначены двумя индексами, причем первый показывает сечение водовода, а второй – порядковый номер интервала времени i .

Начальная характеристика проходит через узлы 1.0; 2.1; 3.2 и 4.3, и на ней значения искомых переменных H и Q определяются начальными условиями.

Искомые переменные H и Q определяются в других узлах сетки, причем последовательность и направление вычислений показаны стрелками.

Поскольку неизвестных два, H и Q , то для их вычисления требуется для каждого узла иметь два уравнения или соотношения. При этом все узлы можно разделить на две группы: краевые – узлы на вертикалях (сечениях) $M = 1$ и $M = 4$ и промежуточные – $M = 2$ и $M = 3$.

Искомые переменные в краевых узлах вычисляются с помощью одного из цепных уравнений и соотношения, определяющего краевое условие для данного сечения. Например, для узла 4.5, соответствующего верховому сечению водовода, известно, что здесь напор постоянен, т.е.: $H_{4,5} = H_{\text{стат}}$. Кроме того, можно записать цепное уравнение из узла 3.4, имеющее вид по (4.8)

$$H_{3,4} - H_{4,5} = \frac{c_3}{gF_3} (Q_{3,4} - Q_{4,5}).$$

Решая оба уравнения совместно, получаем искомое $Q_{4,5}$.

Для узла 1.6 записываем цепное уравнение из узла 2.5 по (4.9)

$$H_{2,5} - H_{1,6} = - \frac{c_1}{gF_1} (Q_{2,5} - Q_{1,6}),$$

в котором два неизвестных. Задавая еще краевое условие, которое обычно представляется в форме (3.7), получаем

$$Q_{1,6} = Q_1(6\theta) \sqrt{H_{1,6}},$$

причем задаваемая функция изменения пропускной способности турбины $Q_1(t)$ определяет возмущающее воздействие. Решая оба уравнения, находим $H_{1,6}$ и $Q_{1,6}$.

Искомые переменные в промежуточных узлах $1 < M < N$ находятся решением цепных уравнений со смежными примыкающими узлами. Например для узла 2.7 имеем такую систему уравнений из узлов 1.6 и 3.6:

$$H_{1,6} - H_{2,7} = \frac{c_1}{gF_1} (Q_{1,6} - Q_{2,7});$$

$$H_{3,6} - H_{2,7} = - \frac{c_2}{gF_2} (Q_{3,6} - Q_{2,7});$$

которую находим решая $H_{2,7}$ и $Q_{2,7}$.

Следует обращать внимание на правильность индекса при c и F : для прямой характеристики он совпадает с ее начальным сечением (первое уравнение), для обратной характеристики – с конечным сечением (второе уравнение).

4.2. Формулы для определения H и Q

Рассмотренные в § 4.1 соотношения позволяют записать формулы для определения искомых переменных H и Q на каждом интервале (шаге) счета.

1. Входное сечение $1-1$ у гидромашины (или затвора) (рис. 4.3, а). Возмущающее воздействие задано изменением пропускной способности во времени $Q_1(t)$ или $Q_1(i)$. Гидравлические потери учитываются только в начальных условиях.

Система уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} H_{2,i-1} - H_{1,i} &= -\frac{c_1}{gF_1} (Q_{2,i-1} - Q_{1,i}); \\ Q_{1,i} &= Q_1(i) \sqrt{H_{1,i}} \end{aligned} \right\}$$

и содержит два неизвестных $H_{1,i}$ и $Q_{1,i}$. Введем обозначение

$$k = c/(gF). \quad (4.11)$$

Подставляя $Q_{1,i}$ уравнений в системе из второго и первое обозначая $\sqrt{H_{1,i}} = X$, получаем квадратное уравнение

$$X^2 + k_1 Q_1(i) X - (H_{2,i-1} + k_1 Q_{2,i-1}) = 0,$$

решением которого является

$$X = -\frac{k_1 Q_1(i)}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 Q_1(i)}{2}\right)^2 - H_{2,i-1} + k_1 Q_{2,i-1}}.$$

Тогда искомые переменные

$$Q_{1,i} = Q_1(i) X \text{ и } H_{1,i} = X^2. \quad (4.12)$$

Правило знаков для X в (4.12) в графической интерпретации следующее (рис. 4.3, г). Решение (4.12) в координатах Q, H дает точку пересечения прямой, идущей с наклоном k_1 , и параболы, выходящей из $H = 0$. В области $Q > 0$ (турбинный режим) всегда используется одно решение со знаком плюс. В области $Q < 0$ (насосный режим) возможно использование решения и со знаком плюс, и со знаком минус. Например при пуске в насосном режиме (увеличение подачи) принимается знак плюс (положительный удар), при снижении подачи (например, потеря привода или остановка) — знак минус или плюс. Знаку минус отвечают условия $Q_{i-1} > Q_1(i)\sqrt{H_0}$ и $H_i < H_0$.

2. Концевое сечение $N-N$ у бьефа (рис. 4.3, б). Здесь краевое условие определяется постоянством напора $H_{N,t} = H_{\text{стат}}$ или $H_{N,i} = H_{\text{стат}}$. Смежное цепное уравнение записывается от предыдущего мо-

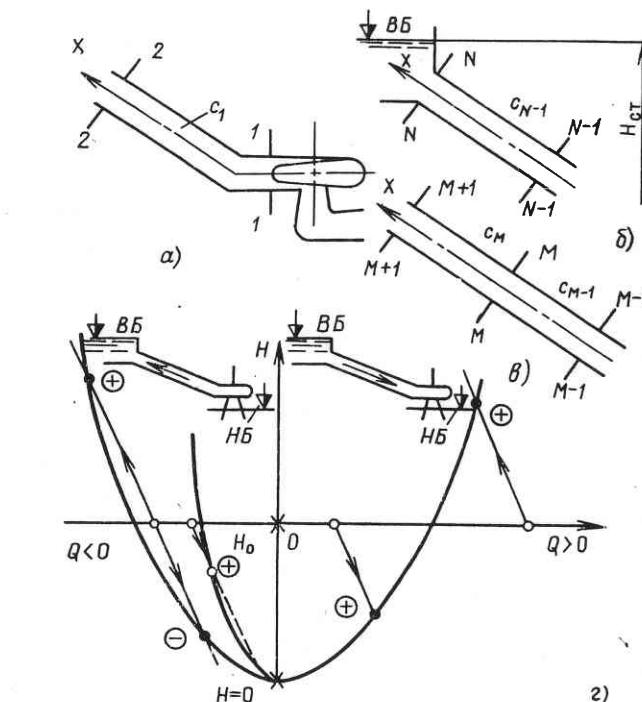


Рис. 4.3. К расчетным формулам гидравлического удара

мента времени $i-1$

$$H_{N-1,i-1} - H_{N,i} = k_{N-1} (Q_{N-1,i-1} - Q_{N,i}).$$

Подставляя $H_{N,i} = H_{\text{стат}}$, получаем искомый расход

$$Q_{N,i} = Q_{N-1,i-1} + (H_{\text{стат}} - H_{N-1,i-1})/k_{N-1}. \quad (4.13)$$

3. Промежуточное сечение $M-M$ (рис. 4.3, в). Искомые переменные $H_{M,i}$ и $Q_{M,i}$ находятся решением системы из двух цепных уравнений для смежных узлов по предыдущему моменту времени $i-1$:

$$\left. \begin{aligned} H_{M-1,i-1} - H_{M,i} &= k_{M-1} (Q_{M-1,i-1} - Q_{M,i}); \\ H_{M+1,i-1} - H_{M,i} &= -k_M (Q_{M+1,i-1} - Q_{M,i}). \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему относительно искомых переменных, получаем

$$Q_{M,i} = \frac{H_{M+1,i-1} - H_{M-1,i-1} + k_M Q_{M+1,i-1} + k_{M-1} Q_{M-1,i-1}}{k_M + k_{M-1}} \quad (4.14)$$

и

$$\left. \begin{aligned} H_{M,i} &= H_{M-1,i-1} + k_{M-1}(Q_{M,i} - Q_{M-1,i-1}) \\ \text{или} \\ H_{M,i} &= H_{M+1,i-1} + k_M(Q_{M+1,i-1} - Q_{M,i}). \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

4.3. Программы ГУ-У расчета гидравлического удара с учетом упругости

1. Расчет гидравлического удара в цилиндрическом напорном водоводе с постоянными по длине значениями диаметра D и скорости распространения упругой волны с при двух расчетных сечениях $N = 2$. Ввод исходных данных осуществляется в соответствии с табл. 4.2а. Расчеты этого наиболее простого случая выполняются по программе ГУ-У(1).

Таблица 4.2а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}, \text{м}$	$k_1 = c_1 / (gF_1)$
Регистр	P2	PA

Программа ГУ-У(1)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	ИПА	ИПД	x	2	:	/-	↑	Fx^2	ИП2	+
1	ИПА	ИПЗ	x	+	$F\sqrt{\quad}$	или	↑	Q_1	ИПД	x
2	\rightarrow	H_1	Fx^2	П0	ИП4	-	ИП0	Q_2	ИПВ	+
3	П3	C/P	ИП2	ИП0	-	ИПА	:	ИП1	ИП1	

В программе ГУ-У(1) адреса 00–18 занимают вычисление на шаге счета расхода Q_1 по (4.12) и адреса 20–21 – напора H_1 по (4.12), адреса 23–29 занимают вычисление расхода Q_2 по (4.13). Результаты вычислений по шагам счета регистрируются в табл. 4.2б.

Таблица 4.2б. Результаты вычислений

Шаг счета i	Время $t=\theta i, \text{с}$	$Q_1(t), \text{м}^{2,5}/\text{с}$	$H_1, \text{м}$	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	$H_2, \text{м}$	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	$H_3, \text{м}$	$Q_4, \text{м}^3/\text{с}$
		PD	P0	P1	P2	P3	P4	P5
0	0	Q_{10}	$H_{1,0}$	$Q_{1,0}$	$H_{\text{стат}}$	$Q_{2,0}$		

2. Расчет гидравлического удара в напорном водоводе с одним переходом, т.е. с одним промежуточным сечением при $N = 3$ (рис. 4.3, б), может осуществляться по программе ГУ-У(2). Число вводимых исходных данных при этом возрастает в соответствии с табл. 4.3а.

Таблица 4.3а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}, \text{м}$	$k_1 = c_1 / (gF_1)$	$k_2 = c_2 / (gF_2)$
Регистр	P4	PA	PB

Программы ГУ-У(2)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
0	ИПА	ИПД	x	2	:	/-	$+/-$	\uparrow	Fx^2	ИП2	+
1	ИПА	ИПЗ	x	+	$F\sqrt{\quad}$	или	\uparrow		ИПД	x	П1
2	\rightarrow	H_1	Fx^2	П0	ИП4	-	ИП0	Q_2	ИПВ	x	+
3	ИП1	ИПА	x	+	ИПА	ИПВ	+	: H_2	П3	ИП1	
4	-	ИПА	x	ИП0	$+/-$	П2	ИП4	ИП2	-	ИПВ	
5	:	ИПЗ	+	П5	C/P						

Программа ГУ-У(2) включает три блока. Первый, адреса 00–21, осуществляет вычисление Q_1 и H_1 по (4.12) на шаге счета (повторяют начало программы ГУ-У(1)). Второй, адреса 23–44, выполняет вычисление Q_2 по (4.14) и H_2 по (4.15). Третьим, адреса 46–53, является блок вычисления Q_3 по (4.13). Результаты вычислений по программе ГУ-У(2) регистрируются в табл. 4.3б.

Таблица 4.3б. Результаты вычислений

Шаг счета i	Время $t=i\theta, \text{с}$	$Q_1(t), \text{м}^{2,5}/\text{с}$	$H_1, \text{м}$	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	$H_2, \text{м}$	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	$H_3, \text{м}$	$Q_4, \text{м}^3/\text{с}$
		PD	P0	P1	P2	P3	P4	P5

3. Расчет гидравлического удара в напорном водоводе с двумя промежуточными сечениями, т.е. с двумя переходами при $N = 4$ (рис. 3.1, б), может производить-

ся с помощью программы ГУ-У(3). Исходные данные вводятся в соответствии с табл. 4.4а.

Таблица 4.4а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{старт}}$, м	$k_1 = c_1 / (gF_1)$	$k_2 = c_2 / (gF_2)$	$k_3 = c_3 / (gF_3)$
Регистр	P6	PA	PB	PC

Программа ГУ-У(3)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИПА	ИПД	x	2	:	/-	↑	Fx^2	ИП2	+
1	ИПА	ИП3	x	+	$F\sqrt{-}$	или	↑	ИПД	x	П1
2	\geq	Fx^2	П0	ИП4	ИП0	-	ИП5	ИПВ	x	+
3	ИП1	ИПА	x	+	ИПА	ИПВ	+	:	П3	ИП1
4	-	ИПА	x	ИП0	H_2	П2	ИП6	ИП2	-	ИП7
5	ИПС	x	+	ИП3	ИПВ	x	*	ИПВ	ИПС	+
6	Q_3	П5	ИП3	-	ИПВ	x	ИП2	H_3	+	П4
7	ИП4	-	ИПС	:	ИП5	Q_4	П7	С/П	ИП6	

Программа ГУ-У(3) состоит из четырех блоков. В первом блоке (адреса 00–21) вычисляются Q_1 и H_1 по (4.12) на шаге счета; во втором и третьем (адреса 24–45 и 46–67) вычисляются Q_2 , H_2 и Q_3 , H_3 по (4.14) и (4.15), и в четвертом блоке (адреса 70–76) вычисляется расход Q_4 по (4.13). До адреса 46 данная программа повторяет программу ГУ-У(2). Результаты вычислений по программе ГУ-У(3) регистрируются в табл. 4.4б.

Таблица 4.4б. Результаты вычислений

Шаг счета i	Время t , с	$Q_1(t)$, $\text{м}^{2,5}/\text{с}$	H_1 , м	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	H_2 , м	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	H_3 , м	$Q_3, \text{м}^3/\text{с}$	$H_4, \text{м}$	$Q_4, \text{м}^3/\text{с}$
	PD	P1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	

Аналогично можно составить программу для расчета гидравлического удара в напорном водоводе с пятью, шестью сечениями и более. Однако это требует увеличения используемых регистров памяти, что выходит за пределы возможностей микрокалькуляторов. Кроме то-

го, при этом возрастает трудоемкость расчетов. В связи с этим при расчете целесообразно ограничиться разбижкой напорного водовода на три участка и четыре расчетных сечения, что позволяет надежно решать практические задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации.

К расчету по программам ГУ-У. Программы построены таким образом, что каждый счет дает значения искомых параметров H и Q во всех расчетных сечениях для двух моментов времени $t+\theta$ и $t+2\theta$ со сдвигом на θ (см. табл. 4.5в).

4.4. Приведение напорных водоводов

Для использования программ ГУ-У необходимо привести реальный напорный водовод (разветвленный) к однониточному, состоящему из одного, двух или трех участков с постоянными значениями c и F . При этом требуется, чтобы θ на всех выделенных участках были равны (см. рис. 4.2, б).

Приведение разветвленного водовода к однониточному производится тем же способом, что и при жестком гидравлическом ударе (рис. 3.1, б), причем скорость упругой волны c для параллельных линий сохраняется. Например, если на участках с сечениями f_1 скорость равна c_1 , то и на объединенном участке F_1 скорость будет c_1 .

Принцип приведения однониточного водовода состоит в следующем: общая длина водовода сохраняется; общее время пробега упругой волны Θ по водоводу (и фаза удара) сохраняется; значения постоянных

инерции T_w или $\sum \frac{l}{F}$ отдельных участков и всего водовода в целом сохраняются. Если исходный водовод имеет N сечений (переходов) и $(N-1)$ участков длиной l_M с постоянными значениями c_M , то общее время пробега упругой волны составляет

$$\Theta = \sum_{M=1}^{N-1} \frac{l_M}{c_M}. \quad (4.16)$$

Расчетное время пробега θ , с, зависит от принимаемого числа расчетных участков r :

$$\theta = \frac{\Theta}{r}. \quad (4.16a)$$

Для приведенных выше программ $r=1, 2$ и 3 .

Представим формулы приведения для неразветвленного трубопровода с N сечениями при различных значениях r . При $r=1$ расчетная длина l' равна полной длине L :

$$l' = L.$$

Расчетные скорости упругой волны c' и площади сечения водовода F' определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} c' &= \frac{L}{\sum_{M=1}^{N-1} \frac{l_M}{c_M}} ; \\ F' &= \frac{L}{\sum_{M=1}^{N-1} \frac{l_M}{F_M}} . \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Если $r > 1$, то общую длину L надо разделить на расчетные участки длиной l'_1, l'_2, \dots так, чтобы время пробега упругой волны каждого участка равнялось θ по (4.16а) и сохранялось суммарное отношение l/F отдельных участков и всего водовода в целом. Для этого можно предложить рекуррентные формулы, позволяющие последовательно найти l'_1, l'_2 и т.д. Для первого расчетного участка (сечение II-II) формулы имеют вид (рис. 4.4)

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_k &= c_k \left(\theta - \frac{l_1}{c_1} - \frac{l_2}{c_2} - \dots - \frac{l_{k-1}}{c_{k-1}} \right) ; \\ l'_1 &= l_1 + l_2 + \dots + l_{k-1} + \Delta l_k ; \\ c'_1 &= \frac{l'_1}{\frac{l_1}{c_1} + \frac{l_2}{c_2} + \dots + \frac{l_{k-1}}{c_{k-1}} + \frac{\Delta l_k}{c_k}} ; \\ F'_1 &= \frac{l'_1}{\frac{l_1}{F_1} + \frac{l_2}{F_2} + \dots + \frac{l_{k-1}}{F_{k-1}} + \frac{\Delta l_k}{F_k}} . \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Первая формула в (4.18) определяет Δl_k – часть k -го участка водовода, входящего в I-й расчетный участок. Она основана на переборе участков с 1-го до k -го, пока выражение в скобках остается больше нуля, что позволяет найти k , когда оно становится отрицательным. Если уже с I-го участка l_1 выражение в скобке становится отрицательным, то $k = 1$ и $\Delta l_1 = c_1 \theta$. Это значит, что $l'_1 = \Delta l_1$, т.е. $l'_1 < l_1$.

Зная k и Δl_k , можно перейти к нахождению второго расчетного участка l'_2 (сечение III-III, рис. 4.4). Расчетные формулы при этом имеют структуру, аналогичную (4.18), но длина k -го участка, с которого начинается перебор, принимается равной $l_k - \Delta l_k$. При $r = 2$ длина 2-го участ-

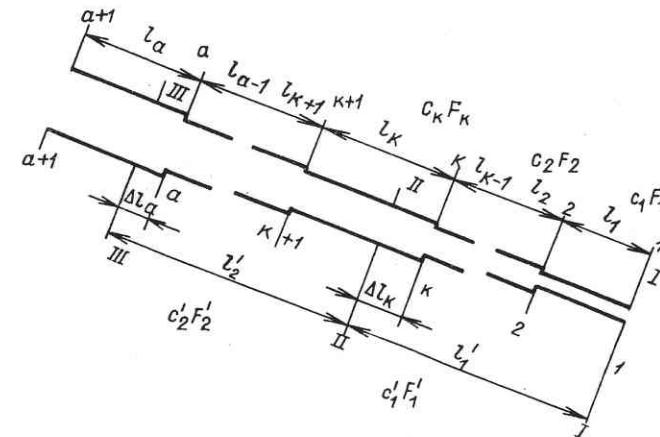


Рис. 4.4. Приведение напорного водовода

ка может быть определена разностью:

$$l'_2 = L - l'_1,$$

а при $r = 3$ длина 3-го расчетного участка

$$l'_3 = L - l'_1 - l'_2.$$

4.5. Рекомендации по использованию программ ГУ-У

Прежде всего необходимо выбрать число расчетных участков, т.е. r , что и определяет вид используемой программы. При этом должны учитываться два фактора: неоднородность напорного водовода и его длина.

Неоднородность напорного водовода характеризуется изменяемостью по длине скорости упругой волны c и площади сечения F . В качестве критерия неоднородности $f_{\text{неодн}}$ можно использовать соотношение

$$f_{\text{неодн}} = \frac{F_{N-1}}{F_1} \frac{c_1}{c_{N-1}}, \quad (4.19)$$

где F_1 и F_{N-1} – площади сечений; c_1 и c_{N-1} – скорости распространения упругой волны на первом и последнем участках напорного водовода.

Неоднородность напорного водовода в случае приведения по (4.17) и (4.18) сравнительно слабо сказывается на значениях гидравлического удара. Поэтому рекомендуются следующие оценки для выбора чис-

ла расчетных участков r :

$$\left. \begin{array}{l} f_{\text{неодн}} < 2 \text{ для } r = 1; \\ 2 < f_{\text{неодн}} < 4 \text{ для } r = 2; \\ f_{\text{неодн}} > 4 \text{ для } r = 3. \end{array} \right\} \quad (4.19a)$$

Длина водовода L согласно (4.16) является основным параметром, определяющим общее время пробега упругой волны Θ (скорость распространения упругой волны в обычных условиях изменяется не сильно). В то же время при расчете методом характеристик (рис. 4.2, б) видно, что шаг по времени определения значений H_1 и Q_1 в краевом сечении водовода у гидромашины равен 2θ . Следовательно, если время изменения открытия гидромашины или затвора равно T_s , то число расчетных значений (шагов) s_1 составит

$$s_1 = T_s / (2\theta). \quad (4.20)$$

Для получения достаточно полной картины расчета желательно иметь $s_1 \geq 8 \div 10$. Отсюда с учетом (4.16а) получаем число расчетных участков

$$r \geq (16 \div 20) \Theta / T_s. \quad (4.20a)$$

Например, при $\Theta = 0,5$ с и $T_s = 10$ с можно принимать $r = 1$, но если увеличить длину водовода в 3 раза, то при $\Theta = 1,5$ с в тех же условиях надо принимать $r = 3$.

После ввода в микрокалькулятор программы расчета и исходных данных необходимо полностью подготовить таблицу для записи результатов вычислений, заполнив графы i и t . Для этого в один из регистров памяти, например Р0, вводим значение θ и, последовательно нажимая клавиши ИП0 + один, два и т.д. раз, получаем на индикаторе значение t .

Кроме того, следует заранее заполнить графу $Q_1(t)$ – изменение пропускной способности во времени. Если эта зависимость задана графически в виде функции времени t , то, откладывая на оси t значения $0, 2\theta, 4\theta$ и т.д., вписывают в таблицу соответствующие значения $Q_1(0), Q_1(2\theta)$ и т.д. Если принимается линейное изменение $Q_1(t)$ от начального $Q_1(0)$ до конечного Q_{1k} за время T_s , то на шаге счета i получаем

$$Q_{1i} = Q_{10} + \sum_{i=1}^{0,5i} (Q_{1k} - Q_{10}) \frac{2\theta}{T_s}; \quad (4.21)$$

здесь принят расчетный интервал для сечения $1-1$ 2θ . Следовательно, сумма будет определяться через один шаг по θ , т.е. для $i = 0, 2, 4, \dots$. Значения Q_{1i} легко получить, если заранее вычислить $(Q_{1k} - Q_{10})2\theta/T_s$ и со своим знаком ввести в память регистра, например, Р1; затем далее набрать на индикаторе значение Q_{10} ; после этого, последовательно нажимая клавиши ИП1+, на индикаторе микрокалькулятора получают искомое $Q_{12}, Q_{14} \dots$

Расчет начинают с заполнения первой строчки $t = 0$ начальных значений $H_{1,0}, Q_{1,0}, H_{2,0}$ и т.д., которые вводятся в соответствующие регистры памяти. Начальные напоры определяются с учетом гидравлических потерь от бьефа до каждого сечения.

Для сокращения записей и уменьшения трудоемкости расчета можно не записывать в таблицу значения расходов в сечениях, если они не представляют специального интереса. Однако в случае какого-либо сбоя или ошибки придется расчет начинать с самого начала. Если же производится регистрация расходов, то расчет можно повторить с любого предыдущего шага.

Для конкретизации изложенных расчетных методов и оценки воздействия отдельных факторов приводятся примеры расчетов гидравлического удара с использованием программ ГУ-У.

Пример. 4.2. Напорный водовод стальной, телескопический, (см. пример 3.1). Параметры водовода по участкам приведены в табл. 4.5а, где

$$\Theta = \Sigma l/c = 1,875; \quad \Sigma \frac{l}{F} = 91,9.$$

Статический напор $H_{\text{стат}} = 150$ м, максимальный расход $Q_0 = 80 \text{ м}^3/\text{с}$, гидравлические потери всего трубопровода $h_{\text{пот}} = 4$ м. Начальная пропускная способность $Q_{10} = 80/\sqrt{146} = 6,6 \text{ м}^2 \cdot \text{s}/\text{с}$.

Определить гидравлический удар при полном закрытии турбин $Q_{1k} = 0$; время закрытия $T_s = 15$ с; пропускная способность изменяется линейно по времени.

Р е ш е н и е. Оценка условий приведения: по (4.19) $f_{\text{неодн}} = \frac{20}{14} \frac{915}{700} = 1,87$. Согласно (4.19а) можно принять $r = 1$; по (4.20а) $r = (16 \div 20) 1,875 / 15 = 2 \div 2,5$. Можно принять $r = 2$ или 3.

Далее расчет ведется для $r = 2$ (одно промежуточное сечение). Расчетный интервал времени $\theta = \Theta / r = 1,875 / 2 = 0,937$ с.

Приведенные показатели для первого участка по (4.18)

$$\Delta l_2 = 815 (0,973 - 500/915) = 319 \text{ м.}$$

Общая длина первого участка $l'_1 = 500 + 319,0 = 819$ м; скорости распро-

Т а б л и ц а 4.5а. Параметры трубопровода

Участок	$D, \text{м}$	$F, \text{м}^2$	Толщина стенки $\delta, \text{мм}$	$c, \text{м}/\text{с}$	$l, \text{м}$	$l/c, \text{с}$	$l/F, \text{м}^{-1}$
1	4,2	14	30	915	500	0,545	35,7
2	4,5	16	22	815	500	0,615	31,2
3	5	20	16	700	500	0,715	25

стремления упругой волны на первом участке $c_1 = \frac{819}{500/915 + 319/815} = 873$ м/с; площадь сечения $F'_1 = \frac{819}{500/14 + 319/16} = 14,72$ м². По

$$(4.11) k_1 = \frac{87,3}{9 \cdot 81 \cdot 14,72} = 6,045.$$

Для второго участка $l'_2 = 1500 - 819 = 681$ м;

$$c'_2 = \frac{681}{(500 - 319)/815 + 500/700} = 727 \text{ м/с};$$

$$F'_2 = \frac{681}{(500 - 319)/16 + 500/20} = 18,75 \text{ м}^2.$$

По (4.11) $k_2 = \frac{727}{9,81 \cdot 18,75} = 3,95$. Исходные данные вводятся в соответствии с табл. 4.5б.

Заполняем таблицу результатов (4.5в) согласно форме табл. 4.3б: столбцы $i = 0; 1; 2; 3; \dots; t = i\theta = 0; 0,937; 1,874; \dots$; изменения пропускной способности $Q_I(t)$. Поскольку режим регулирования турбины линейный, используем формулу (4.21). В данном случае конечное значение $Q_{Ik} = 0$ (полное закрытие) и изменение пропускной способности за время шага счета составляет $-Q_{I0} 2\theta/T_s = -6,6 \cdot 1,875/15 = -0,825$ м^{2,5}/с. Вводим в память регистра Р1 значение $-0,825$, набираем $Q_{I0} = 6,6$ м^{2,5}/с и клавишей ↑ переводим это значение в регистр Y, затем последовательно нажимаем клавиши ИП1, + и с индикатора считываем и заносим в таблицу $i = 0; Q_I = 6,6; i = 2; Q_I = 5,78; i = 4; Q_I = 4,95$ и т.д. до $Q_I = Q_{Ik} = 0$. Далее $Q_I = Q_{Ik} = 0$.

Заполняем строку $i = 0, t = 0$ — начальные условия: $H_{1,0} = 146$; $H_{2,0} = 148,5$; $H_{3,0} = 150$; расходы во всех сечениях $Q_{1,0}, Q_{2,0}$ и $Q_{3,0} = 80$.

В режиме F ПРГ в микрокалькулятор вводится программа ГУ-У(2) со знаком плюс по адресу 15, так как $Q > 0$ (может быть введена заранее) и далее в режиме F АВТ в соответствующие регистры вводятся расчетные данные и начальные условия. После проверки введенных значений приступают к последовательным расчетам с шагом, начиная с $i = 2, t = 1,874$ с введением в РД $Q_I(1,874) = 5,78$ и нажатием клавиш B/0

Таблица 4.5б. Общие исходные данные

Параметр	H_3	k_1	k_2
Регистр	P4	PA	PB
Значение	150	6,045	3,95

Таблица 4.5в. Результаты вычислений

i	$t = i\theta$	$Q_I(t), \text{м}^{2,5}/\text{с}$	$H_1, \text{м}$	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	$H_2, \text{м}$	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	$H_3, \text{м}$	$Q_3, \text{м}^3/\text{с}$
			PD	P0	P1	P2	P3	P4
0	0	6		146	80	148,5	80	150
1	0,937					148,5	80	80
2	1,874	5,78		172,8	76			150
3	2,81					168,6	75,3	80
4	3,75	4,95		200,3	70,6			150
5	4,68					171,1	65,2	70,6
6	5,62	4,12		207,1	59,3			150
7	6,56					174	53,8	59,9
8	7,5	3,3		210,1	47,8			150
9	8,43					173,5	41,8	47,7
10	9,37	2,47		209,9	35,8			35,8
11	10,31					173,7	29,8	
12	11,24	1,65		209,5	23,9			23,8
13	12,18					173,3	17,9	
14	13,12	0,828		209,2	12			12
15	14,06					173,4	6,1	
16	15	0		210,1	0			0,14
17	15,93					174,1	-6	
18	16,87	0		138	0			-12,1
19	17,81					116,5	-3,6	
20	18,74	0		94,9	0			4,9
21	19,68					140	7,5	
22	20,61	0		185,1	0			10
23	21,55					187,7	0,4	
24	22,49	0						-9,1
25	23,42					144,1	-7,6	
26	24,36	0		97,9	0			-6,2
27	26,3					114,7	2,8	
28	26,24							-11,7

и С/П. По окончании счета производится считывание с соответствующих регистров значений H и Q , которые записываются в табл. 4.5в со сдвигом на θ ("косой слой"). Затем в РД вводится следующее значение $Q_I(3,75) = 4,95$ и клавишами В/0 и С/П запускается счет для следующего шага. Процедура расчета повторяется до окончания расчета процесса гидравлического удара.

В табл. 4.5в значения напора H_3 не записываются, так как они остаются неизменными. Заполнять ее следовало бы, если бы в процессе регулирования изменился напор в этом сечении, что возможно, когда сечение расположено у сопряжения водовода с уравнительным резервуаром и из предварительного расчета колебаний уровней известно, как изменяется здесь напор во времени.

Полученные в результате расчета по программе ГУ-У(2) эпюры гидравлического удара в зависимости от периода времени показаны на

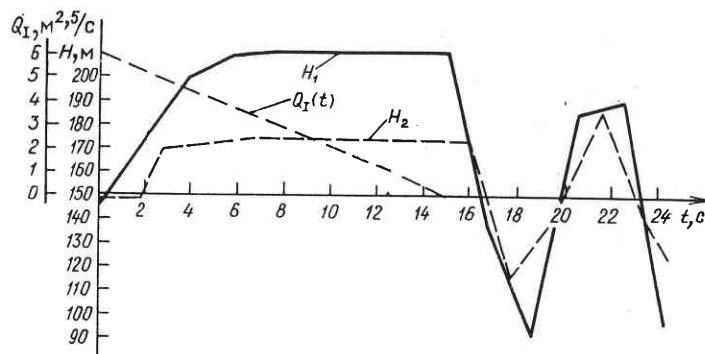


Рис. 4.5. Эпюра гидравлического удара, полученная расчетом по программе ГУ-У(2)

рис. 4.5 для сечения I—I (у турбины) и II-II (промежуточного), см. рис. 4.4. Сравнение с результатами расчетов без учета упругости по программе ГУ-Ж(3) (см. пример 3.1 и рис. 3.2) показывает, что влияние упругости привело к существенному изменению формы эпюры удара. С учетом упругости максимум давления в сечении I—I $H_1 = 210,1$ м соответствует $t = 7,5$ с, а без учета упругости эпюра удара менее полная и максимальное значение $H_1 = 208,2$ м соответствует $t = 15$ с, т.е. концу закрытия. Кроме того, важным фактором являются колебания давлений после достижения полного закрытия турбины, а именно с большим понижением давления против первоначального (противоудар). Это нельзя обнаружить, не учитывая упругие деформации. Такое понижение давления имеет особое значение для верховой части водовода при наличии малонапорного участка с небольшим уклоном.

4.6. Распределение динамического напора по длине напорного водовода

Для расчета напорных водоводов на прочность и для проверки на опасность разрыва сплошности потока большое значение имеет определение внутреннего давления, которое согласно (3.10а) зависит от динамического напора H_M , определяемого по (3.10). В результате расчетов гидравлического удара по программам ГУ-Ж и ГУ-У получают значения динамического напора для различных сечений H_M в зависимости от времени t (см. табл. 3.2в и 4.5в), с помощью которых можно построить эпюру максимальных значений динамического напора по длине трубопровода. Такие эпюры по результатам вычислений представлены на рис. 4.6. Они показывают, что для рассмотренных примеров расхождения между расчетом, полученным с учетом упругих деформаций [программа ГУ-У(2)], и без их учета [программа ГУ-Ж(3)], невелики (менее 2–3 м), но в других условиях могут быть существенными.

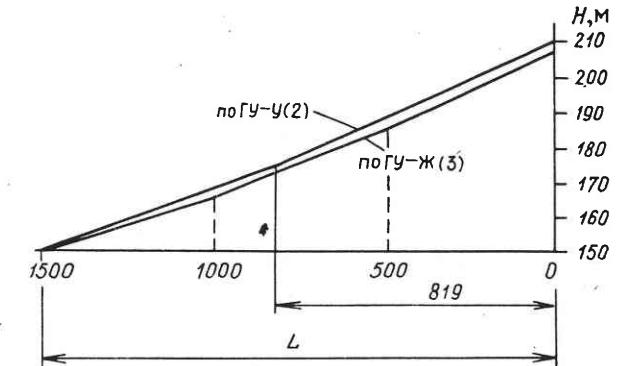


Рис. 4.6. Эпюры динамического напора по длине водовода, полученные расчетом

Отличие полученных результатов состоит в том, что если упругость не учитывается, то максимальные значения удара во всех сечениях водовода возникают одновременно. При учете упругости максимумы удара в различных сечениях возникают в различные моменты времени, т.е. в этих условиях кривая H_M макс представляет собой огибающую по пикам давления или динамического напора.

Глава 5

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ГЭС И ГАЭС С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОМАШИН

5.1. Постановка задачи и выбор расчетных зависимостей

Гидромеханические переходные процессы (см. гл. 1–4) можно представлять в форме траекторий мгновенных режимов, показанных на универсальной характеристике турбинного гидроагрегата на рис. 5.1. Положение каждой точки траектории, соответствующей данному моменту времени, определяется двумя координатами: открытием направляющего аппарата a (для ПЛ турбин также углом установки лопастей φ) и приведенной частотой вращения n'_1 . Изменения $a(t)$ и $\varphi(t)$, задаваемые в зависимости от времени, представляют режим регулирования гидромашины. Координата n'_1 зависит от динамического напора $H = H_0 + \Delta H$ с учетом гидравлического удара и от частоты вращения n . Оба эти показателя определяются в результате расчетов переходных процессов, и задать их заранее невозможно.

Имеются два способа учета воздействия n'_1 и особенностей характеристики данной гидромашины на протекание переходного процесса.

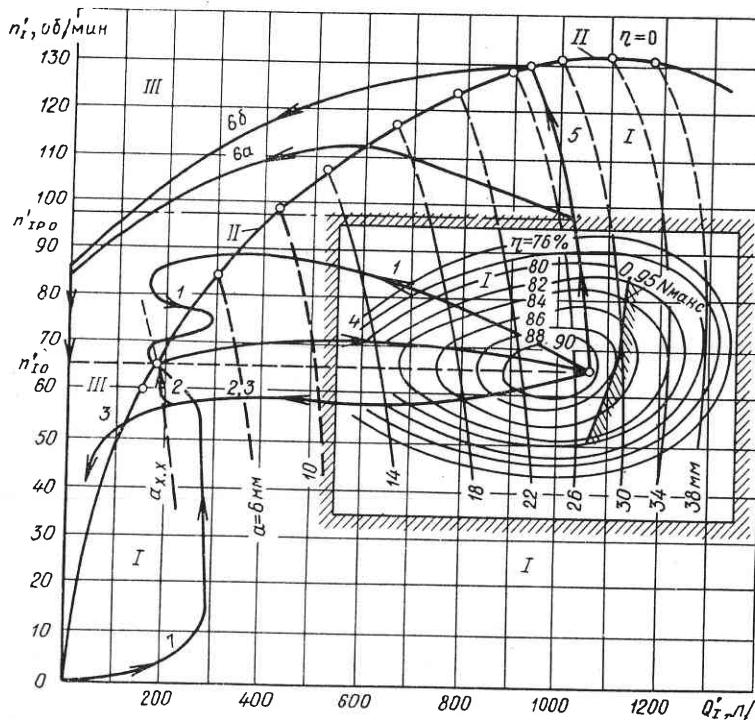


Рис. 5.1. Траектории мгновенных режимов гидроагрегата с радиально-осевой турбиной. Режимы:

I – турбинные; II – разгонные; III – тормозные. Процессы: 1 – сброс нагрузки; 2 – уменьшение нагрузки; 3 – остановка агрегата; 4 – увеличение нагрузки; 5 – выход в разгон при $a = \text{const}$; 6 – вывод из разгона (a – с разгонной частоты; b – с промежуточной частоты вращения); 7 – пуск агрегата

Раздельный расчет удара $H(t)$ и изменения частоты вращения $n(t)$. Сначала принимают некоторые значения n'_1 и по заданному режиму регулирования гидромашины определяют с помощью программ расчета ГУ-Ж или ГУ-У динамический напор; далее по нему определяют изменение частоты вращения; затем с учетом результатов первого расчета строят линию мгновенных режимов и выполняют повторный расчет.

Поступательный расчет гидравлического удара и изменения частоты вращения с определением на каждом шаге H_i и n_i методом последовательных приближений (итераций).

Способ раздельного расчета проще, но он дает хорошие результаты только в случаях, когда приведенная частота n'_1 не влияет или слабо влияет на пропускную способность Q'_1 (наклон линий постоянного открытия $a = \text{const}$; $\partial Q'_1 / \partial n'_1 \approx 0$). Точно это условие выдерживается толь-

ко у активных ковшовых турбин и достаточно близко у РО турбин, имеющих коэффициент быстроходности $n_s = 250 \div 300$ об/мин. Способ пошагового расчета не имеет каких-либо ограничений, является универсальным и целесообразным для практического использования.

Расчетные соотношения для определения гидравлического удара были приведены в гл. 3 и 4. Здесь рассмотрим зависимости, позволяющие определять изменение частоты вращения.

Уравнение движения вращающихся масс гидроагрегата имеет вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\Gamma M} - M_{\Theta M}, \quad (5.1)$$

где J – момент инерции вращающихся частей, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω – угловая частота вращения машины, с^{-1} . В практических расчетах вместо J обычно используют значение махового момента GD^2 :

$$J = GD^2 / 4. \quad (5.1a)$$

Угловая частота вращения ω выражается через частоту вращения n , об/мин:

$$\omega = 2\pi n / 60. \quad (5.1b)$$

Подставив (5.1a) и (5.1b) в (5.1), получаем

$$\frac{GD^2}{38,2} \frac{dn}{dt} = M_{\Gamma M} - M_{\Theta M}, \quad (5.1b)$$

$M_{\Gamma M}$, $M_{\Theta M}$ – моменты гидравлической и электрической машин гидроагрегата.

Уравнение вращения иногда представляют в безразмерных, относительных переменных:

$$\beta = \frac{n}{n_{\text{ном}}}, \quad (5.2)$$

где β – относительная частота вращения; $n_{\text{ном}}$ – номинальное значение для данного гидроагрегата (обычно синхронная частота вращения); m – относительный момент

$$m = \frac{M}{M_{\text{ном}}}, \quad (5.2a)$$

где $M_{\text{ном}}$ – номинальное значение момента, соответствующее номинальной мощности $N_{\text{ном}}$, кВт, и частоте вращения $n_{\text{ном}}$. В относительных переменных уравнение (5.1b) преобразуется к виду

$$T_a \frac{d\beta}{dt} = m_{\Gamma M} - m_{\Theta M}, \quad (5.3)$$

где T_a – постоянная времени или постоянная инерции вращающихся частей гидроагрегата, выражаемая формулой

$$T_a = \frac{GD^2 n_{\text{ном}}}{38,2 M_{\text{ном}}} \quad \text{или} \quad T_a = \frac{GD^2 n_{\text{ном}}^2}{365 \ 000 N_{\text{ном}}}, \quad (5.3a)$$

причем вторая формула для T_a получена из соотношения между M , Н·м, N , кВт, и n , об/мин:

$$M = 9550 N/n. \quad (5.3b)$$

В основном T_a определяется маховым моментом ротора генератора (маховой момент рабочего колеса гидромашины составляет 6–10 % махового момента ротора). Для гидроагрегатов ГЭС обычно $T_a = 7 \div 9$ с, для обратимых гидроагрегатов ГАЭС $T_a = 9 \div 11$ с (меньшее значение – для генераторов с непосредственным водяным охлаждением обмоток), для капсульных гидроагрегатов без мультиплексоров $T_a = 1,6 \div 2,5$ с.

Для определения приращения частоты вращения на шаге счета с интервалом по времени Δt , используя (5.1в) и (5.3), дифференциальное уравнение (5.1) записывается в конечных приращениях. Поскольку расчет выполняется для конкретных гидроагрегатов по данной универсальной характеристике гидромашины, то предпочтительной является форма (5.1в).

Учитывая, что при $t > 0$ значения моментов $M_{\text{ГМ}}$ и $M_{\text{ЭМ}}$ изменяются во времени непрерывно (рис. 5.2), приращение частоты вращения на i -м шаге счета можно выразить соотношением

$$\Delta n_i = \frac{19,1}{GD^2} \Delta t (M_{\text{ГМ}i} + M_{\text{ГМ}(i-1)} - M_{\text{ЭМ}i} - M_{\text{ЭМ}(i-1)}), \quad (5.4)$$

где $M_{\text{ГМ}}$, $M_{\text{ЭМ}}$, $M_{\text{ГМ}(i-1)}$, $M_{\text{ЭМ}(i-1)}$ – моменты, соответствующие началу и концу расчетного интервала времени, Н·м (приращение определяется по средним значениям моментов на данном шаге). На характеристиках моменты гидромашины часто приведены в технических единицах – кгс·м, при этом изменяется коэффициент $19,1/GD^2$, и формула (5.4) преобразуется в (5.4а):

$$\Delta n_i = \frac{187}{GD^2} \Delta t (M_{\text{ГМ}i} + M_{\text{ГМ}(i-1)} - M_{\text{ЭМ}i} - M_{\text{ЭМ}(i-1)}). \quad (5.4a)$$

Частота вращения на данный момент времени n_i находится суммированием

$$n_i = n_{i-1} + \Delta n_i, \quad (5.5)$$

где n_{i-1} – частота вращения к концу предыдущего шага счета.

Рис. 5.2. Изменение моментов гидроагрегата во времени

Приведенная частота вращения на конец данного шага счета вычисляется по формуле

$$n'_{li} = \frac{n_i D_1}{\sqrt{H_i}}, \quad (5.6)$$

где D_1 – номинальный диаметр рабочего колеса; H_i – динамический напор, учитывающий гидравлический удар в проточном тракте.

При расчетах гидромеханических переходных процессов в ГЭС и ГАЭС можно выделить три наиболее важных и типичных случая.

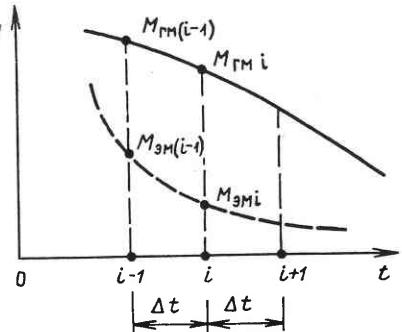
1. Процессы с постоянной частотой вращения (практически) $n = n_{\text{ном}}$, когда гидроагрегат включен в энергосистему и происходит изменение его нагрузки (набор нагрузки, снятие нагрузки). В этом случае нет необходимости определять частоту вращения по формулам (5.4).

2. Процессы с переменной частотой вращения, но когда момент сопротивления электрической машины $M_{\text{ЭМ}}$ мал или даже может быть принят равным нулю. Это аварийные процессы сброса нагрузки в турбинном режиме или потери привода, т.е. внезапного отключения электродвигателя от сети в насосном режиме, которые могут происходить в результате коротких замыканий. К ним относятся и нормальный эксплуатационный процесс пуска гидроагрегата в турбинном режиме до синхронизации с энергосистемой, и процесс включения гидроагрегата в сеть.

3. Процессы с переменной частотой вращения, в которых необходимо учитывать изменение и момента электрической машины $M_{\text{ЭМ}}$, и момента гидромашины $M_{\text{ГМ}}$. Типичным примером такого процесса является пуск обратимого гидроагрегата ГАЭС в насосный режим работы (см. рис. 1.3).

5.2. Построение приведенной моментной характеристики гидромашины

Для определения изменения частоты вращения на шаге счета, как показывают (5.4) и (5.4а), необходимо знать значения моментов электрической и гидравлической машин, составляющих гидроагрегат. Но для переходных процессов, возникающих при работе гидроагрегата под нагрузкой и при отключении, решающее влияние оказывает момент, развиваемый гидромашиной. В соответствии с законами подобия его значение определяется по приведенному (единичному) моменту



M'_I с помощью следующих формул:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для турбинного режима } M_{\Gamma M I} = M'_I k_{\text{КПД}} D_1^3 H_i; \\ \text{для насосного режима } M_{\Gamma M I} = \frac{M'_I}{k_{\text{КПД}}} D_1^3 H_i, \end{array} \right\} \quad (5.7)$$

где M'_I – приведенный момент, соответствующий режиму на данный момент времени, Н·м.; D_1 – номинальный диаметр турбины, м; H_i – динамический напор, м; $k_{\text{КПД}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение КПД турбины в зависимости от диаметра гидромашины. Для расчетов переходных процессов можно принять

$$k_{\text{КПД}} = 1 + \frac{1 - \eta_{\Gamma,0}}{\eta_{\Gamma,0}} \epsilon \left(1 - \sqrt[5]{\frac{D_M}{D_1}} \right), \quad (5.8)$$

где $\eta_{\Gamma,0}$ – гидравлический КПД оптимального режима модели (максимальный), %; D_M – диаметр модели (как правило, указывается на универсальных характеристиках), м; ϵ – коэффициент, отражающий отношение гидравлических потерь на трение в проточном тракте гидромашины к общим потерям (для турбинного режима $\epsilon = 0,75$, для насосного $\epsilon = 0,5$).

Универсальные модельные характеристики гидромашин обычно приводятся в координатах Q'_I и n'_I , и линии M'_I на них показываются редко, в большинстве случаев для обратимых насостурбин. Если значения M'_I не указаны, то их можно вычислить по формулам Н·м:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для турбинного} \quad M'_I = 93700 \frac{Q'_I}{n'_I} \eta \left(M'_I = 9550 \frac{Q'_I}{n'_I} \eta \right); \\ \text{режима} \\ \text{для насосного} \quad M'_I = 93700 \frac{Q'_I}{n'_I \eta} \left(M'_I = 9550 \frac{Q'_I}{n'_I \eta} \right), \end{array} \right\} \quad (5.9)$$

где η – КПД модели для данного режима, принятые по универсальным характеристикам (в скобках даны формулы для вычисления момента в технической системе, кгс·м).

В процессе счета возможны два способа использования формул (5.9): для определения по универсальной характеристике для каждого мгновенного режима по открытию a значений Q'_I , n'_I и η ;

для предварительного построения приведенной моментной характеристики $M'_I(a, n'_I)$.

Первый способ требует меньших затрат на подготовку исходных данных, но он удобен только для турбинных и насосных режимов при известных КПД. Для тормозных режимов понятие КПД не применяется,

а для условий $Q'_I = 0$, когда гидромашина полностью закрыта, $a = 0$, формулы (5.9) теряют смысл, так как в этом случае $M'_I \neq 0$. Следовательно, для определения всего переходного процесса, когда гидромашина работает в широком диапазоне режимов, более целесообразно применять второй способ, т.е. заранее строить моментную характеристику $M'_I(a, n'_I)$. Для этого используются универсальные и разгонные характеристики турбин.

Вычисление M'_I для каждого открытия a (для ПЛ турбин и угла φ) при различных n'_I осуществляется по формулам (5.9) с помощью микрокалькулятора. Для этого набирается очень простая программа, причем для каждой точки исходные параметры вводятся в следующие регистры: n'_I в Р1, Q'_I в Р2 и η в Р3. Искомое значение M'_I считывается с индикатора.

Программа расчета M'_I по (5.9) для турбинных режимов

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП2	ИП1	:	ИП3	×	9	3	7	0	0
1	M'_I	x		C/P						

Программа расчета M'_I по (5.9) для насосных режимов

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП2	ИП1	:	ИП3	:	9	3	7	0	0
1	M'_I	x		C/P						

Результаты расчетов представляются в табличной форме (табл. 5.1). В последней строке табл. 5.1 даны значения разгонной частоты вра-

Т а б л и ц а 5.1. Результаты расчетов приведенного момента по универсальной характеристике (числовой пример)

Частота вращения n'_I	Регистр	Параметр	Регистр	Открытие турбины a , мм				
				40	36	32	28	24
80	P1	$Q'_I, \text{м}^{2,5}/\text{с}$	P2	0,43	0,41	0,37	0,335	0,3
		$\eta, \%$	P3	0,78	0,8	0,78	0,76	0,74
	P1	$M'_I, \text{Н}\cdot\text{м}$	Индикатор	41,7	40,8	35,9	31,7	28,3
		$Q'_I, \text{м}^{2,5}/\text{с}$	P2	0,48	0,45	0,41	0,37	0,335
65	P1	$\eta, \%$	P3	0,855	0,87	0,89	0,893	0,885
		$M'_I, \text{Н}\cdot\text{м}$	Индикатор	62,8	59,9	55,9	50,6	45,4
	P1		Индикатор					
66	$n'_I \text{ разг}$	$M'_I = 0$		106	105	105	104	104

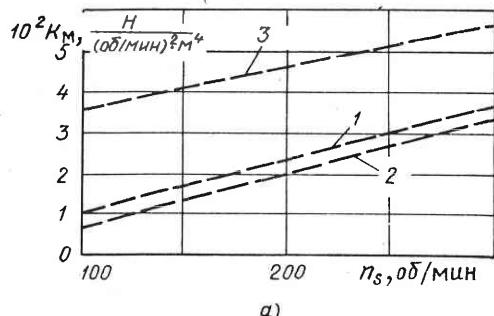
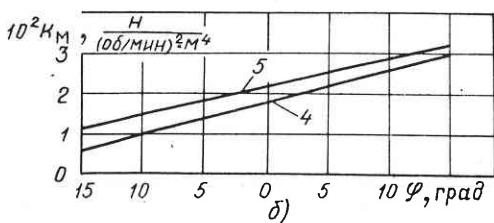


Рис. 5.3. Коэффициент момента рабочего колеса при нулевом открытии направляющего аппарата



шения для соответствующих открытых турбины. Моменты при $n'_1 > n'_{1\text{разг}}$ находятся экстраполяцией линий $M'_1(a)$. Для $a = 0$ используется соотношение

$$M'_{1a=0} = K_M (n'_1)^2, \quad (5.10)$$

в котором коэффициент K_M принимается по результатам экспериментальных данных и зависит от типа и быстроходности гидромашины.

На рис. 5.3, а показаны ориентировочные значения K_M в зависимости от изменения коэффициента быстроходности для РО гидротурбин 1, гидромашин РОНТ турбинного направления вращения 2 и для насосного направления вращения 3, который для турбинных режимов принимается по расчетному, а для насосных режимов — по среднему напору.

На рис. 5.3, б даны значения K_M для двух типов осевых турбин ПЛ 510 (4) и ПЛ 642 (5) в зависимости от угла установки лопастей рабочего колеса.

Возможны различные формы представления моментных характеристик. Часто используется раздельное представление моментных и расходных характеристик с общей осью приведенной частоты вращения (см. рис. 6.5 и 7.2). Такая форма достаточно удобна, но требует дублирова-

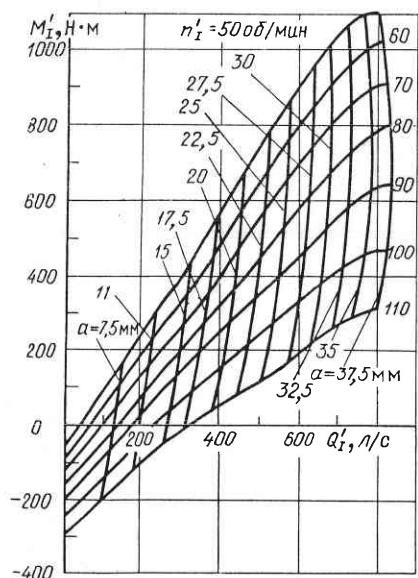


Рис. 5.4. Универсальная моментная расходная характеристика радиально-осевой гидротурбины

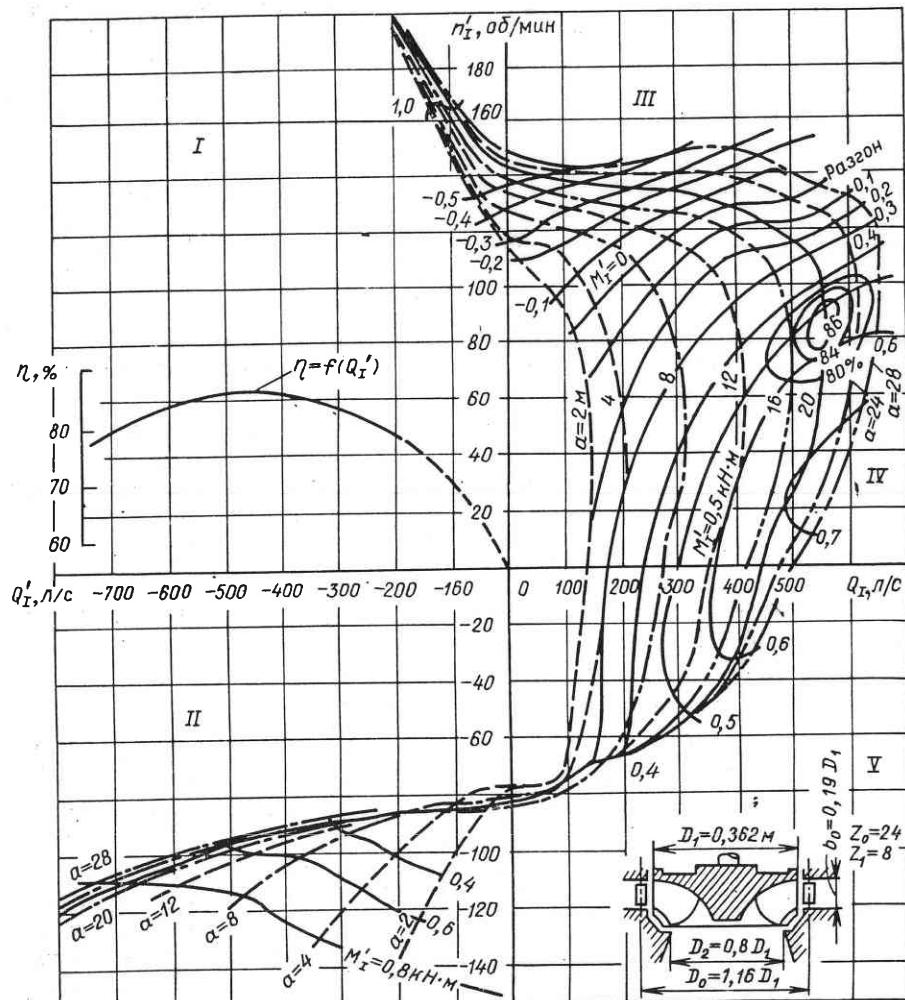


Рис. 5.5. Четырехквадрантная универсальная характеристика обратимой гидромашины РОНТ. Режимы:

I — обратные насосы; II — насосные; III — тормозные; IV — турбинные; V — тормозные (противотока)

ния линий открытия и соответственного смещения по линии $n'_1 = \text{const}$ для нахождения Q'_1 и M'_1 . Для гидротурбин применяют объединенную моментно-расходную характеристику в виде изолиний открытий α и приведенной частоты n'_1 (рис. 5.4). Для обратимых гидромашин РОНТ часто дается универсальная четырехквадрантная характеристика с изолиниями приведенного момента (рис. 5.5). Применение универсальных характеристик (рис. 5.4 и 5.5) наиболее целесообразно для расчетов переходных процессов.

Глава 6

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАБОТЕ ГИДРОАГРЕГАТА В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

6.1. Порядок расчетов

Главная особенность переходных процессов при работе гидроагрегата в энергосистеме вследствие увеличения или уменьшения нагрузки состоит в том, что частота вращения гидроагрегата сохраняется практически неизменной. Здесь подразумевается работа гидроэлектрической станции на достаточно мощную энергосистему. В этом случае расчеты переходных процессов можно производить и по универсальным характеристикам гидромашин, доведенным до разгонных режимов без предварительного построения моментной характеристики.

Основное отличие от рассмотренных ранее расчетов гидравлического удара (программы ГУ-Ж и ГУ-У) состоит в том, что в данном случае задается режим регулирования, т.е. изменение открытия направляющего аппарата $a(t)$, (для Пл турбин и угла установки лопастей $\varphi(t)$), а не изменение пропускной способности во времени $Q_1(t)$. Приведенный расход $\Sigma Q'_1$ для всех гидромашин, подключенных к данному водоводу, находится в процессе счета на каждом шаге методом последовательных приближений.

Структурная схема алгоритма расчетов переходных процессов при работе агрегата под нагрузкой (программы НАГР) приведена на рис. 6.1. После начала работы, ввода программы, осуществляется в 1 ввод в регистры памяти общих исходных данных: напора $H_{\text{старт}}$, интервала счета Δt , диаметра гидромашины D_1 , числа гидромашин m , частоты вращения n_0 , параметров напорного водовода. Затем в 2 устанавливаются и вводятся в соответствующие регистры начальные условия для $t = 0$: напоров H , расхода Q_0 , частоты вращения n , момента M_0 . Далее в 3 вводятся данные для каждого шага счета: открытие a , ожидаемое значение $n'_{\text{ож}}$, приведенный расход Q'_1 с характеристикой. Затем в 4 производится вычисление динамического напора H с учетом гидравлического удара, расхода Q и приведенной частоты вращения n'_1 . В 5 со-поставляются ожидаемые и полученные значения n'_1 . Показателем со-поставления является

$$|n'_1 - n'_{\text{ож}}| = \delta, \quad (6.1)$$

причем критерием приемлемости выполненного счета является условие

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (6.2)$$

где $\delta_{\text{доп}}$ — значение допустимой точности, например 1–2 об/мин (большая точность возможна, но здесь она неоправданна). Если условие не удовлетворено, то принимается новое значение $n'_{\text{ож}}$, и расчет возвращается в 3. Если же точность достаточна, то для найденной точки мгновенного режима (n'_1, a) с характеристикой снимается значение КПД η или M'_1 и вводится в соответствующий регистр памяти. После этого в 7 производится вычисление момента M с поправкой на изменение КПД по (5.8). Затем в 8 регистрируются в таблице все расчетные H , Q и др. Если время меньше установленного времени процесса, то вводятся новые значения a , $n'_{\text{ож}}$, Q'_1 и вычисления переводятся в 3.

Необходимо иметь в виду, что если не требуется определять изменение момента M , то операции 6 и 7 структурной схемы в программу не включаются и вычисляется только ударное давление ΔH или H и расход Q .

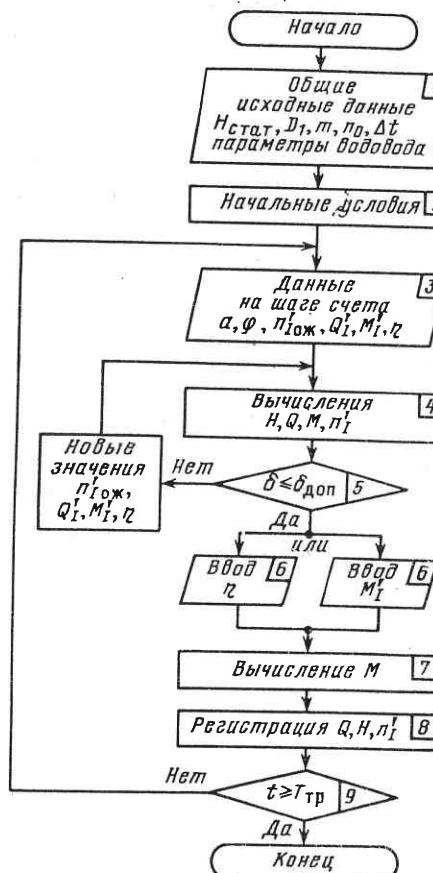


Рис. 6.1. Структурная схема алгоритма расчетов переходных процессов при работе гидроагрегата в энергосистеме

6.2. Программа НАГР-Ж расчетов гидравлического удара без учета упругости

Программа НАГР-Ж в качестве базы использует программу ГУ-Ж, но возмущающее воздействие задается режимом регулирования гидромашины $a(t)$, а пропускная способность определяется по ее универсальной характеристике с учетом изменения приведенной частоты вращения n'_1 . При этом принято, что все гидромашины, подключенные к данному водоводу, регулируются по открытиям синхронно.

Общие исходные данные вводятся в соответствии с табл. 6.1а, в которой $K_{\text{ин.тр}}$ вычисляется по (3.4а) для всего напорного тракта, включая тракт гидромашины, D_1 — ее диаметр; $k_{\text{КПД}}$ — по (5.8); m — число гидромашин на данном водоводе.

Таблица 6.1а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{старт}}$, м	Δt , с	$K_{\text{ин.тр}}$	D_1 , м	n_0	m	$k_{\text{КПД}}$
Регистры	P3	P5	PA	P6	P7	P8	P9

Программа НАГР-Ж

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	ИП6	Fx^2	ИПД	x	ИП8	Q_1	ПД	Fx^2	ИПА	x
1	ИП5	:	2	:	ИП4	+	ИПА	ИП5	:	x
2	↑	Fx^2	ИПД	Fx^2	ИП3	x	/-	ИП4	Fx^2	+
3	ИПА	Fx^2	x	ИП5	Fx^2	:	-	$F\sqrt{\quad}$	$\Delta H_{\text{тр}}$	П0
4	ИП3	+	$F\sqrt{\quad}$	↑	ИПД	Q	П4	↔	$F1/x$	ИП7
5	x	ИП6	x	C/P	КПД η					
					↔	:	ИПД	ИП8	$Q'_1 D_1^2$	x
6	ИП6	x	ИП9	x	ИП3	ИП0	+	x	9	3
7	7	0	0	x	C/P					

Исходные данные на шаге счета и результаты расчета регистрируются в табл. 6.1б.

Таблица 6.1б. Результаты вычислений

Шаг счета i	Время t , с	Исходные данные			$\frac{n'_1}{\text{Индикатор}}$	δ	$\frac{\Delta H_{\text{тр}}}{P0}$	$\frac{Q, \text{м}^3/\text{с}}{P4}$	η	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	$H_1, \text{м}$
		$a, \text{мм}$	$n'_{\text{лож}}$	$\frac{Q'_1}{\text{Индикатор}}$							
		PD									

Программа НАГР-Ж состоит из двух частей. В первой адреса 00–53 определяют общий гидравлический удар для всего напорного тракта $\Delta H_{\text{тр}}$, расход Q и приведенную частоту вращения n'_1 .

Вторая часть после остановки счета начинается с ввода значений КПД η в регистр X (при этом n'_1 автоматически смещается в регистр Y стековой памяти) и включает операции с адресами 54–73, осуществляющие вычисление момента M . Соответственно в таблице результатов расчетов выделены последние два столбца η и M . Если момент опре-

делять не требуется, то нижняя часть программы в микрокалькулятор не вводится.

В таблицу результатов вносится H_1 – динамический напор в каком-либо сечении, например, 1–1 напорного водовода, значения которого вычисляются по формуле

$$H_1 = \Delta H_{\text{тр}} \frac{K_{\text{ин.1}}}{K_{\text{ин.тр}}} + H_{\text{ст}}, \quad (6.2a)$$

где $K_{\text{ин.1}}$ – инерционный коэффициент для сечения 1–1, определенный по (3.4а) до сечения в верхнем или нижнем бьефе или до сопряжения с уравнительным резервуаром. H_1 обычно вычисляются по (6.2а) после завершения расчетов и определения $\Delta H_{\text{тр}}$, что осуществляется очень быстро с помощью следующей небольшой программы.

В регистры памяти P2 и P3 заранее вводятся соответственно $\frac{K_{\text{ин.1}}}{K_{\text{ин.тр}}}$ и $H_{\text{старт}}$. Программа вычисления H_1 (адреса 00–04):

ввод $\Delta H_{\text{тр}}$ 00.ИП2 01.х02.ИП3 03.+04.C/P.

Процесс счета следующий: набирается значение $\Delta H_{\text{тр}}$, нажимается клавиша С/П, и на индикаторе получают H_1 .

Использование программы расчета НАГР-Ж – см. числовой пример.

Пример 6.1. Гидроагрегат ГЭС с турбиной РО662 диаметром $D_1 = 5,5$ м, частотой вращения $n = 125$ об/мин, напором $H_0 = 100$ м, мощностью $N = 236$ МВт, расходом при полной мощности $Q = 260 \text{ м}^3/\text{с}$. Подводящий станционный водовод диаметром $D = 7,5$ м, длиной $L = 640$ м. Определить гидравлический удар и изменение момента во времени при снятии нагрузки. Время полного хода на закрытие $T_s = 9$ с. Изменение открытия принимается линейным по времени.

Решение 1: Определение коэффициентов инерции. Станционный водовод по (3.4а): $F = 44,3 \text{ м}^2$; $K_{\text{ин.в}} = \frac{1}{9,8} \frac{640}{44,3} = 1,474$.

Проточный тракт турбины: $v_{\text{сп}} = 9 \text{ м/с}$, угол охвата $\varphi_{\text{охв}} = 345^\circ$.

$$\text{По (3.8в)} \lambda_{\text{сп}} = 3,6; K_{\text{ин.сп}} = \frac{1}{9,8} \frac{3,6 \cdot 9}{345} \frac{260}{360} = 0,073.$$

Лопастная система: $\bar{b}_0 = 0,2$, $\bar{D}_2 = 1,1$. По (3.8г) $\lambda_{\text{лоп}} = 0,9$, тогда $K_{\text{ин.лоп}} = \frac{1}{9,8} \frac{0,9}{1,35 (0,2 + 1,1^2/4) \cdot 5,5} = 0,025$.

Отсасывающая труба: $\bar{h}_{\text{отс}} = 2,5$, $\bar{L}_{\text{отс}} = 4,5$. По (3.8д) $\lambda_{\text{отс}} = 2,5 + 4,5 = 7$. Выходное сечение два пролета $6,5 \times 6,5$; $F_5 = 85 \text{ м}^2$; $K_{\text{ин.отс}} = \frac{2}{9,8} \frac{7 \cdot 5,5}{1,1^2 \cdot 5,5^2 / 4 + 85} = 0,069$.

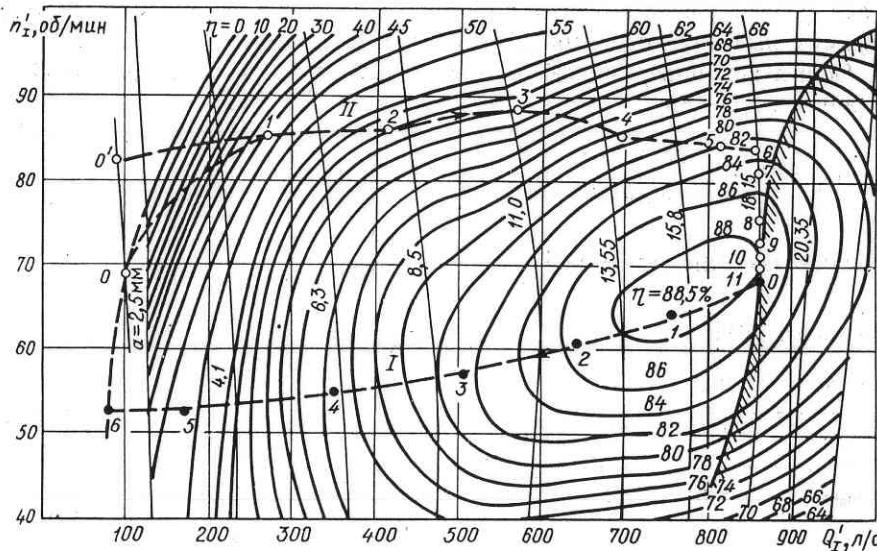


Рис. 6.2. Построение траекторий мгновенных режимов при уменьшении (I) и увеличении (II) нагрузки

Коэффициент инерционности напорного тракта $K_{\text{ин.тр}} = 1,474 + 0,073 + 0,025 + 0,069 = 1,64$.

2. Положение начального режима. Полная универсальная характеристика турбины до разгонной частоты вращения показана на рис. 6.2. Начальное значение открытия $Q'_10 = Q/(D_1^2 \sqrt{H}) = 260/(5,5^2 \sqrt{100}) = 0,86 \text{ м}^{2,5}/\text{с}$. Приведенная частота вращения $n'_1 = nD_1/\sqrt{H} = 125 \times 5,5/\sqrt{100} = 68,8$. Режимной точке $Q'_1 = 0,86$ и $n'_1 = 68,8$ соответствует открытие $a = 18,15 \text{ мм}$ (диаметр модели $D_m = 250 \text{ мм}$).

3. Режим регулирования. Как указано в условии примера, изменение открытия турбины линейно по времени. Время полного хода $T_s = 9 \text{ с}$. Принимаем расчетный интервал времени $\Delta t = 1,5 \text{ с}$. Режим закрытия турбины по интервалам времени следующий:

$t, \text{ с} \dots \dots$	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9
$a, \text{ мм} \dots \dots$	18,15	15,125	12,1	9,075	6,05	3,025	0

Конечное открытие, холостой ход, определяем по характеристике продлением кривой $\eta = 0$ (разгонные режимы) до $n'_1 = 68,8$ (точка 0). По интерполяции от $a = 2,5 \text{ мм}$ до $a = 0$ (ось $Q'_1 = 0$) находим $a_{x.x} = 2,1 \text{ мм}$. Время закрытия от $a = 18,15 \text{ мм}$ до $a_{x.x} = 2,1 \text{ мм}$ составляет

$$T = T_s = \frac{a_0 - a_{x.x}}{a_0} = 9 \frac{18,25 - 2,1}{18,25} = 8 \text{ с.}$$

Если режим регулирования во времени представлен графиком, то требуемые значения открытия определяются по нему.

4. Общие исходные данные представлены в табл. 6.2а. Поправочный коэффициент по (5.8)

$$k_{\text{КПД}} = 1 + \frac{1 - 0,885}{0,885} 0,75 \left(1 - \sqrt{\frac{0,25}{5,5}} \right) = 1,045;$$

Начальное значение момента по (5.36) $M = 9550 \frac{236000}{125} = 18 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$

Таблица 6.2а

Параметр	$H_0, \text{ м}$	$\Delta t, \text{ с}$	$K_{\text{ин.тр}}$	$D_1, \text{ м}$	n_0	m	$k_{\text{КПД}}$
Регистр	P3	P5	PA	P6	P7	P8	P9
Значение	100	1,5	1,64	5,5	125	1	1,045

5. Результаты расчета по программе НАГР-Ж даны в табл. 6.2б.

Таблица 6.2б. Результаты вычислений

Шаг сче-та i	Время $t, \text{ с}$	Исходные данные			$\frac{n'_1}{PD}$ Индикатор
		$a, \text{ мм}$	$n'_{10ж}, \text{ об}/\text{мин}$	$\frac{Q'_1, \text{ м}^{2,5}/\text{с}}{PD}$	
0	0	18,15	68,8	0,86	68,8
1	1,5	15,125	63	0,76	64,1
2	3	12,1	61	0,645	60,8
3	4,5	9,075	58	0,507	57,7
4	6	6,05	56	0,345	54,9
5	7,5	3,025	53	0,165	52,5
6	8,3	1,4	51,5	0,075	52,3

$\delta, \text{ об}/\text{мин}$	$\frac{\Delta H_{\text{тр}}, \text{ м}}{P_0}$	$\frac{Q, \text{ м}^3/\text{с}}{P_4}$	$\frac{\eta_M, \%}{\text{Индикатор}}$	$\frac{10^6 M, \text{ Н}\cdot\text{м}}{\text{Индикатор}}$	$H_1, \text{ м}$ по (6.2)
0	0	260	0,88	18	100
1,1	14,9	246,4	0,882	19,6	113,4
0,2	28	220,8	0,865	19,2	125,2
0,3	41,7	182,6	0,815	16,5	137,5
1,1	56,8	130,6	0,725	11,6	151,1
0,5	71,4	65,3	0,52	4,6	164,2
0,8	77,8	29,8	0	0	165,4

К процедуре счета по программе НАГР-Ж.

1. Исходная режимная точка $i = 0$ (рис. 6.2) определяется начальными условиями. Режимные точки $i = 1, 2, \dots$, положение которых определяется заданными значениями $a(t)$ и вычисленными значениями n'_1 , рекомендуется в процессе счета откладывать на универсальной характеристике, т.е. проводить траекторию мгновенных режимов (рис. 6.2).

2. Ожидаемые значения приведенной частоты вращения $n'_{1\text{ож}}$ принимаются произвольно; можно брать значение по предыдущей точке $n'_{1\text{ож}} = n'_{1(i-1)}$, но это приводит к необходимости расчета второго, а иногда и третьего шага. Лучше "предвидеть" ход траектории мгновенных режимов. Например, по рис. 5.1 известно, что при уменьшении мощности гидроагрегата значения n'_1 снижаются. В соответствии с этим для точки 1 принято $n'_{1\text{ож}} = 63$ об/мин, и это оказалось достаточно близко к полученному расчетом $n'_1 = 64,1$ об/мин, $\delta = 1,1$ об/мин, что исключило необходимость повторных вычислений. Далее, проводя траекторию по точкам 0–1, принимаем для точки 2 $n'_{1\text{ож}} = 61$ об/мин, что также оказалось удачным, и т.д.

3. После вычисления n'_1 , если выполнено условие (6.1), вводится значение η в регистр X (индикатор) и нажатием клавиши С/П производится вычисление M (вторая часть программы).

4. Последняя точка счета 6 лежит на линии $\eta = 0$ ($M = 0$). Продолжив траекторию мгновенных режимов левее точки 5, по интерполяции между $a = 2,5$ мм и $a = 0$ (ось $Q'_1 = 0$) находится соответствующее открытие $a_6 = 1,4$ мм и по заданному закону закрытия по времени (линейному) – время $t = 8,3$ с. Приращение $\Delta t = 8,3 - 7,5 = 0,8$ с вводится в Р5, и после этого выполняется счет для $n'_{1\text{ож}} = 51,5$ об/мин.

Следует отметить, что одной из особенностей программ расчетов "жесткого" гидроудара является возможность изменять длительность расчетного интервала времени в процессе счета.

5. Значения H_1 – динамического напора в сечении водовода у турбины – вносятся в табл. 6.2б после завершения расчетов и определения $\Delta H_{\text{тр}}$. Вычисления выполнены по (6.2) и соответствующей программе при следующих значениях:

$$\frac{K_{\text{ин.1}}}{K_{\text{ин.тр}}} = \frac{1,474}{1,64} = 0,899 \text{ и } H_{\text{ст}} = 100 \text{ м.}$$

Пример 6.2. Для условий примера 6.1 определить гидравлический удар и изменение момента (нагрузки) во времени при наборе нагрузки от холостого хода $M = 0$ до полной. Время полного хода на открытие турбины $T_s = 9$ с. Режим открытия линейный во времени.

Решение 1. Значения постоянных инерций сохраняются, как в примере 6.1. Коэффициент инерционности тракта $K_{\text{ин.тр}} = 1,64$.

2. Положение начального режима, холостого хода при $n'_1 = 68,8$ об/мин, $a_{x,x} = 2,1$ мм (см. пример 6.1).

Начальный расход. По характеристике для $a = 2,1$ мм и $n'_1 = 68,8$ об/мин, $Q'_1 = 0,105 \text{ м}^3/\text{с}, Q_0 = 0,105 \cdot 5,5^2 \sqrt{100} = 31,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

3. Режим регулирования. Расчетный интервал $\Delta t = 1,5$ с. Режим открытия турбины по интервалам времени:

$t, \text{ с} \dots$	0	1,5	3	4,5	6	7,5	8
$a, \text{ мм} \dots$	2,1	5,1	8,1	11,1	14,1	17,1	18,5

4. Общие исходные данные представлены в табл. 6.3а. Коэффициент изменения КПД $k_{\text{КПД}} = 1,045$ (см. пример 6.1).

Таблица 6.3а. Общие исходные данные

Параметр	$H_0, \text{ м}$	$\Delta t, \text{ с}$	$K_{\text{ин.тр}}$	$D_1, \text{ м}$	n_0	m	$k_{\text{КПД}}$
Регистр	P3	P5	PA	P6	P7	P8	P9
Значение	100	1,5	1,64	5,5	125	1	1,045

5. Результаты расчета по программе НАГР-Ж даны в табл. 6.3б.

Изменение $\Delta H_{\text{тр}}$ и M при сбросе и наборе нагрузки, полученные в результате расчетов по табл. 6.2б и 6.3б, представлены на рис. 6.3. Здесь при закрытии турбины инерционное повышение давления нарастает плавно во времени, а в течение всего хода на открытие понижение давления сохраняет почти постоянное значение и после достижения конечного открытия плавно возвращается к условиям стационарного режима. Большое практическое значение имеет изменение момента M , во времени, так как характеризует быстродействие гидроагрегата по изменению нагрузки. Полученные результаты показывают, что инерционность напорного тракта снижает быстродействие и ухудшает условия регулирования.

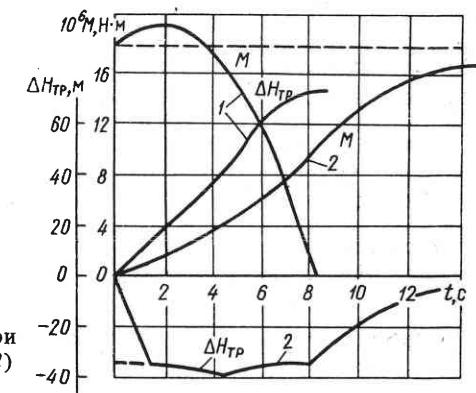


Рис. 6.3. Переходные процессы при уменьшении (1) и увеличении (2) нагрузки

Таблица 6.3б. Результаты вычислений

Шаг оче- та <i>i</i>	Исходные данные						n'_1 Индикатор	δ , об/мин	$\frac{\Delta H_{\text{тр},M}}{P_0}$	$\frac{Q, \text{м}^3/\text{с}}{P_0}$	$\eta, \%$ Инди- катор	$10^6 M, \text{Н}\cdot\text{м}$	$H_1, \text{м}$ по (6.2)	Примечания
	Время <i>t, с</i>	$a, \text{мм}$	$n'_{\text{лож}}$ об/мин	$Q'_1, \text{м}^2/\text{с}$	PD	n'_1 Индикатор								
0	0	2,1	68,8	0,105	68,8	-8,4	0	31,5	0	0	0	1,45	67,5	Повторный расчет с из- мененным n'_1
1	1,5	5,1	78	0,27	86,4	1	-36,1	65,4	0,45	1,45	100			
1	1,5	5,1	85	0,267	86									
2	3	8,1	85	0,41	86,6	1,6	-37	98,4	0,64	3,1	66,7			
3	4,5	11,1	86	0,575	88,7	2,7								
3	4,5	11,1	88	0,568	88,1	0,1	-39,1	134,1	0,66	4,2	64,8			
4	6	14,1	87	0,685	85,6	1,4	-35,4	166,5	0,76	6,41	68,2			
5	7,5	17,1	83	0,81	85	2	-34,6	198,2	0,82	8,33	68,9			
6	8	18,5	80	0,855	85	5								
6	8	18,5	84	0,852	84,9	0,9	-34,5	208,7	0,835	8,95	69			
7	8,5	18,15	78	0,86	81,8	3,8								
7	8,5	18,15	89	0,855	81,7	1,7	-29,2	217,6	0,85	10,26	73,7			
8	10	18,15	75	0,86	76,2	1,2	-18,7	234,6	0,87	13,02	83,2			
9	11,5	18,15	72	0,86	73	1	-11,3	245,0	0,88	14,99	89,8			
10	13	18,15	70	0,86	71,2	1,2	-6,5	251,5	0,88	16,2	94,2			
11	14,5	18,5	70	0,86	70,1	0,1	-3,9	255,1	0,88	16,9	96,5			

4572

вания нагрузки. При закрытии турбины вместо снижения момента (мощность) возрастает и в течение $t = 3,8$ с превышает первоначальное значение, а при открытии (достижении конечного открытия) момент (мощность) составляет всего $8,95/18 = 0,497$, или 47,2 % требуемой, и только еще через 7,5 с момент (мощность) достигает $16,9/18 = 0,939$, или 93,9 % требуемой.

6.3. Программа НАГР-ЖМ

В § 5.2 было указано, что если при переходных процессах гидромашина работает в различных режимах (тормозном или противотоком), то значения приведенного момента рабочего колеса нужно определять не по (5.9), а непосредственно с моментной характеристикой турбины. При этом расчеты переходных процессов в условиях постоянства частоты вращения могут производиться по программе НАГР-ЖМ, которая до адреса 53 повторяет программу НАГР-Ж, а далее отличается тем, что момент M в регистре Р1 находится непосредственно по моменту M'_1 , вводимому в регистр РС, и тем, что предусматривается вычисление гидравлического осевого усилия, действующего на рабочее колесо P , получаемого на индикаторе, что особенно важно для осевых турбин. Для этого используют формулу

$$P = P'_1 D_1^2 H, \quad (6.3)$$

где P'_1 – приведенная осевая гидродинамическая нагрузка рабочего колеса, принимается по модельной универсальной характеристике и вводится на шаге счета в регистр РВ; D_1 – диаметр турбины, м; H – напор с учетом гидравлического удара, м.

Программа НАГР-ЖМ. Адреса 00–53 сохраняются по программе НАГР-Ж

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5				C/P	ИПС	ИП9	x		ИП6	Fx^2
6	x	x		ИП3	ИП0	+	x	P1	ИПВ	ИП3 ИП0
7	+	x		ИП6	Fx^2	x		C/P		

Если нет необходимости определять осевое усилие P , например при работе РО турбин, то операции по адресам 66–75 исключаются, а оператор С/П ставится по адресу 66.

6.4. Особенности расчетов переходных процессов для гидроагрегатов с поворотно-лопастными турбинами

В период переходного процесса для гидроагрегатов с ПЛ турбинами нарушается оптимальная комбинаторная зависимость между открытием направляющего аппарата a и углом установки лопастей рабочего колеса φ . Поэтому при расчетах приходится использовать пакет пропеллерных универсальных характеристик, каждая из которых построена для данного φ и различных a в координатах Q'_I и n'_I .

Режим регулирования ПЛ турбин задается двумя функциями времени $a(t)$ и $\varphi(t)$, показанными на рис. 6.4, а). Здесь же даны значения $\varphi_1, \varphi_2, \dots$, соответствующие имеющимся пропеллерным характеристикам. Для определения искомых параметров в данный момент времени t_i , например Q'_I , η_M и др., используются две пропеллерные характеристики, между которыми лежит значение φ_i , в данном случае между φ_2 и φ_3 (рис. 6.4, б). Обозначим смежные характеристики φ_a и φ_b , причем всегда $\varphi_a < \varphi_b$. Текущий угол φ_i лежит между φ_a и φ_b :

$$\varphi_a \leq \varphi_i < \varphi_b.$$

Обозначим искомый параметр S_i (это может быть и Q'_I , η или другой). Для его нахождения используется линейная интерполяция:

$$S_i = S_{ai} + (S_{bi} - S_{ai}) \frac{\varphi_i - \varphi_{ai}}{\varphi_b - \varphi_a}, \quad (6.3a)$$

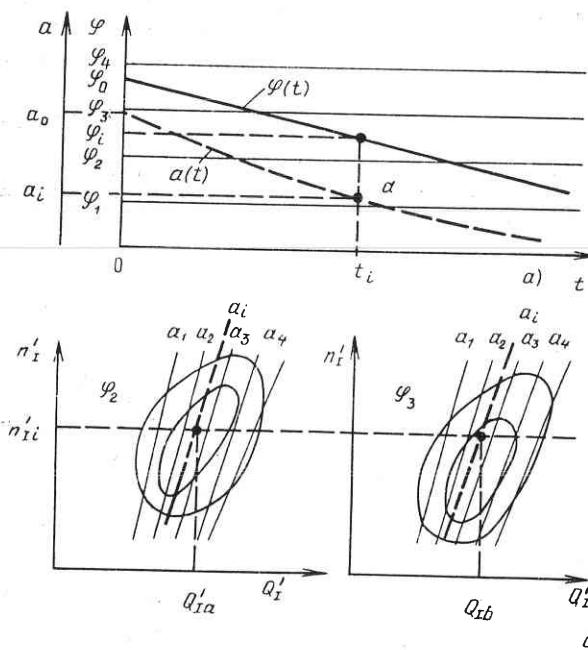


Рис. 6.4. Определение точек мгновенных режимов поворотно-лопастных турбин

где S_{ai} и S_{bi} – параметры, найденные по характеристикам φ_a и φ_b по координатам a_i и n'_I (рис. 6.4, б).

Отличие процедуры счета для ПЛ турбин от рассмотренного расчета РО турбин (см. примеры 6.1 и 6.2) состоит в том, что определение параметров на каждом шаге осуществляется не по одной, а по двум смежным характеристикам φ_a и φ_b с помощью интерполяционной формулы (6.3а).

Пропеллерные характеристики обычно приводятся для узкой зоны режимов (открытый), и если требуемая точка лежит за ее пределами, то приходится продлевать характеристику "на глаз". При этом нужно использовать и имеющиеся разгонные характеристики.

Осевые нагрузки. При расчетах переходных процессов гидроагрегатов с ПЛ, особенно осевыми турбинами обычно требуется определять и осевые гидродинамические нагрузки P рабочего колеса, воспринимаемые подпятником, которые в общем случае вычисляются по формуле (6.3).

Режимы, когда осевая нагрузка меняет знак и направлена в сторону, обратную потоку, наиболее интересны. В вертикальных гидроагрегатах ей противодействует сила веса вращающихся частей гидроагрегата (ротор генератора, рабочее колесо и др.). Если обратная осевая нагрузка превысит эту силу, то произойдет подъем вращающихся частей, в большинстве случаев сопровождающийся поломками и необходимости аварийной остановки гидроагрегата. В горизонтальных гидроагрегатах на восприятие обратной гидродинамической нагрузки должна быть рассчитана контрпрята.

Нужно выбрать такие режимы регулирования турбин $a(t)$ и $\varphi(t)$, чтобы при всех переходных процессах обеспечивалась безаварийная работа гидроагрегата.

Для решения этой задачи целесообразно непосредственно использовать пакеты универсальных характеристик: расходный $Q'_I(a, n'_I, \varphi)$, моментной $M'_I(a, n'_I, \varphi)$ и осевых усилий $P'_I(a, n'_I, \varphi)$, как показано на

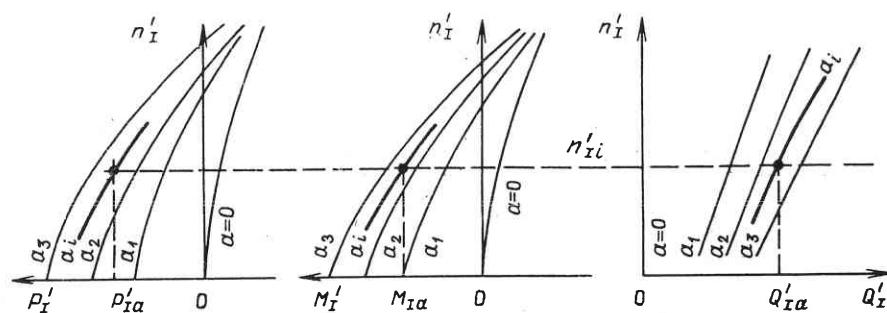


Рис. 6.5. Определение параметров данной режимной точки по открытию и приведенной частоте вращения для данного угла установки лопастей φ_a

Таблица 6.4. Результаты расчетов для гидроагрегата с поворотно-лопастной

Шаг <i>i</i>	Вре- мя <i>t</i> , с	Исходные данные на шаге								Результаты	
		<i>a</i> , мм	φ_i , град	φ_a , град	φ_b , град	$n'_{\text{лож}}$	Q'_{Ia} , $\text{м}^{2,5}/\text{с}$	Q'_{Ib} , $\text{м}^{2,5}/\text{с}$	$Q'_{I, \text{м}^{2,5}/\text{с}}$ PD	n'_I	δ , об/мин

рис. 6.5. Это тем более важно, что наибольшие обратные осевые нагрузки возникают в зоне тормозных режимов, при малых и нулевых значениях открытия *a*, когда определять M'_I через КПД нельзя.

Для расчетов переходных процессов при закрытии и открытии турбин в условиях работы гидроагрегата в энергосистеме при постоянстве частоты вращения $n = n_0 = \text{const}$ может использоваться программа НАГР-ЖМ, результаты расчетов по которой регистрируются в табл. 6.4.

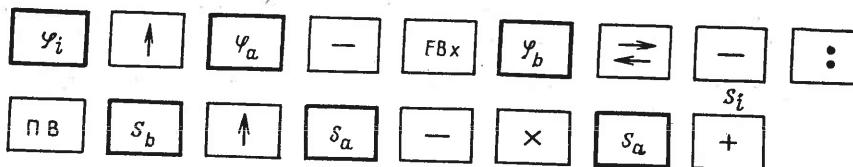
К процедуре счета по программе НАГР-ЖМ для ПЛ турбины 1. Общие исходные данные записываются в табл. 6.1а.

2. Исходная режимная точка $i = 0$ определяется начальными условиями. Последующие режимные точки $i = 1, 2, \dots$ определяются заданным режимом регулирования $a(t)$ и $\varphi(t)$. Для каждого значения φ_i устанавливаются φ_a и φ_b по пропеллерным характеристикам. Все требуемые параметры Q'_I , M'_I и P'_I вычисляются по интерполяционным формулам (6.3) и (6.3а). Здесь эти вычисления не автоматизированы из-за ограниченности имеющихся регистров.

Однако, как видно из табл. 6.4, на каждом шаге приходится выполнять интерполяции по крайней мере 3 раза для нахождения Q'_{Ib} , M'_{Ib} и P'_{Ib} . Для снижения трудоемкости расчетов рекомендуется производить интерполяции с помощью микрокалькулятора по следующим процедурам счета.

Первая интерполяция на шаге для нахождения Q'_{Ii} производится по процедуре ИНТЕР-1, включающей 17 операций (здесь и далее в утолщенных рамках показан ввод цифровых данных).

ИНТЕР-1



Последующие интерполяции на данном шаге можно производить по сокращенной процедуре ИНТЕР-2, включающей только восемь операций. Сокращение достигнуто тем, что значение дроби в (6.3а) не зависит от

турбиной

этапа 1				Результаты этапа 2						
$\Delta H_{\text{тр}, \text{м}}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	n	M'_{Ia}	M'_{Ib}	M'_I	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	P'_{Ia}	P'_{Ib}	P'_I	P
P_0	P_4	P_7	P_C	P_1	P_B	S_i				Индика- тор

параметров S_i , и на первой интерполяции она уже введена в регистр памяти P_B (затем этот регистр используется для ввода P'_I).

ИНТЕР-2



3. На каждом шаге первоначально выполняются вычисления первого этапа (адреса 00–53), в результате получают значение n'_I . Если оно близко к исходному $n'_{\text{лож}}$ ($\delta \leq \delta_{\text{доп}}$), то далее вводят соответствующие значения M'_{Ii} и P'_{Ii} , и нажатием клавиши С/П выполняют расчет второго этапа адреса 54–75 с определением M и P .

Если же $\delta > \delta_{\text{доп}}$, то изменяют значение $n'_{\text{лож}}$, вводят новое значение Q'_I и повторяют счет первого этапа.

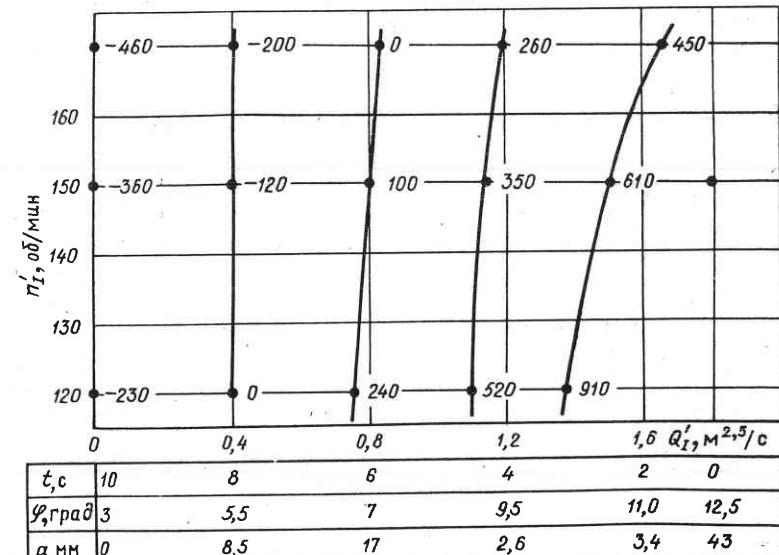


Рис. 6.6. Интерполяционная характеристика поворотно-лопастной турбины

Метод построения интерполяционной характеристики турбины. Расчеты переходных процессов гидроагрегатов с ПЛ турбинами с интерполяцией на каждом шаге счета являются весьма трудоемкой операцией. Результаты расчетов в этом случае могут представляться в форме табл. 6.4. Такой способ обычно применяется, если характеристика турбины предварительно вводится в память ЭВМ. Для микрокалькуляторов это неосуществимо. Для упрощения расчетов можно использовать метод, предложенный ГМО САО Гидропроекта (инж. Л.М. Шифрин) и заключающийся в предварительном построении интерполяционной характеристики, отвечающей заданному режиму регулирования $a(t)$ и $\varphi(t)$ (см. рис. 6.4, а).

Интерполяционная характеристика строится следующим образом. Для каждого момента времени t_i в координатах n'_1 и Q'_1 проводится по точкам кривая, соответствующая a_i и φ_i , на которой фиксируются точки с определенными M'_1 или η . Вид интерполяционной характеристики показан на рис. 6.6.

Зная интерполяционную характеристику, расчеты переходных процессов ПЛ турбин можно выполнять по программам НАГР-Ж или НАГР-ЖМ как для турбин одиночного регулирования (примеры 6.1 и 6.2). В этом случае осевое гидродинамическое усилие P определяется отдельно по известным параметрам режима a_i , φ_i и n'_i с помощью формул (6.3) и (6.3а) и с учетом найденного инерционного напора тракта ΔH_{tp} .

6.5. Программы НАГР-У расчетов гидравлического удара с учетом упругости

Расчеты гидравлического удара с учетом упругих деформаций воды и водовода производятся по программам ГУ-У по задаваемому возмущающему воздействию в виде $Q_1(t)$. Отличие приводимых ниже программ НАГР-У состоит в том, что возмущающее воздействие задается в форме изменения открытия гидромашины $a(t)$ (турбины или насос-турбины), а пропускная способность находится по приведенному расходу Q_1 для данной режимной точки характеристики, определяемой двумя координатами a и n'_1 . Структурная схема расчета дана на рис. 6.1. Особенность расчетов с учетом упругих деформаций состоит в том, что шаг счета во времени должен соответствовать θ по (4.10), а время пробега упругой волны зависит от длины расчетного участка водовода.

Ниже приводятся программы НАГР-У(1), когда весь напорный водовод представляется одним приведенным участком ($r = 1$ по (4.20а)) и НАГР-У(2), когда напорный водовод представляется двумя участками ($r = 2$). Обе программы базируются на программах ГУ-У(1) и ГУ-У(2) с введением некоторых изменений, связанных с заданием Q'_1 вместо Q_1 , определяемого приведенной частотой вращения n'_1 , и

момента M (если требуется). В этой части программы НАГР-У аналогичны программе НАГР-Ж и ориентированы на использование универсальных характеристик с изолиниями КПД и определением момента по формулам (5.9).

Общие исходные данные для расчета по программе НАГР-У(1) вводятся в соответствии с табл. 6.5а.

Таблица 6.5а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}$, м	$k_1 = \frac{c_1}{gF_1}$	D_1 , м	n_0	m	$k_{\text{КПД}}$
Регистр	P2	PA	P6	P7	P8	P9

Программа НАГР-У(1)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП6	Fx^2	ИПД	\times	ИП8	Q_1	ПД	ИПА	\times	2
1	:	/-	↑	Fx^2	ИП2	$+ Q_1$	ИПА	ИП3	\times	+
2	$F\sqrt{-}$	или	↑	ИПД	\times	П1	\Rightarrow	Fx^2	П0	ИП2
3	ИП0	-	ИПА	:	ИП1	Q_1	П3	ИП6	ИП7	\times
4	ИП0	$F\sqrt{-}$:	С/П	КПД		ИПД	ИП8	:	\times
5	ИП6	\times	ИП9	\times	ИП0	x	9	3	7	0
6	0	\times	С/П							

Исходные данные на шаге счета и полученные результаты регистрируются в табл. 6.5б.

Общие исходные данные для расчета по программе НАГР-У(2) вводятся в соответствии с табл. 6.6а.

Исходные данные на шаге счета и полученные результаты регистрируются в табл. 6.6б.

Пример 6.3. Два гидроагрегата $A1$ и $A2$ подключены к разветвленному напорному водоводу длиной 1600 м, параметры которого показаны на рис. 6.7, а. Каждый гидроагрегат имеет турбину типа РО310, диаметр ее рабочего колеса $D_1 = 4,2$ м, частота вращения $n_0 = 250$ об/мин, мощность 315 МВт. Статический напор $H_{\text{стат}} = 265$ м, расход $139 \text{ м}^3/\text{s}$, гидравлические потери при работе двух гидроагрегатов 5 м.

Таблица 6.5б. Результаты вычислений

Шаг сче-та i	Время t , с	Исходные данные на шаге			n'_I Индикатор
		a , мм	$n'_{I\text{ож}}$, об/мин	$\frac{Q'_I, \text{м}^2/\text{s}}{\text{PD}}$	
δ , об/мин	$\frac{H_1, \text{м}}{P_0}$	$\frac{Q_1, \text{м}^3/\text{с}}{P_1}$	$\frac{Q_2, \text{м}^3/\text{с}}{P_3}$	$\eta, \%$ Индикатор	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$ Индикатор

Т а б л и ц а 6.6а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{старт}}$, м	$k_1 = \frac{c_1}{gF_1}$	$k_2 = \frac{c_2}{gF_2}$	D_1 , м	n_0	m	$k_{\text{КПД}}$
Регистр	P4	PA	PB	P6	P7	P8	P9

Программа НАГР-У(2)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП6	Fx^2	ИПД	x	ИП8	Q_I				
1	:	/-	↑	Fx^2	ИП2	x	ПД	ИПА	x	2
2	F	✓	+ или	↑	ИПД	Q_I	+	ИП3	x	+
3	ИП0	-	ИП5	ИПВ	x	П1	↔	H_1	П0	ИП4
4	ИПА	ИПВ	+	Q_2	:	П3	ИП1	-	ИПА	x
5	H_2	+ П2	ИП4	ИП2	-	ИПВ	:	ИП3	Q_3	ИП0
6	ИП6	ИП7	x	ИП0	$F\sqrt{\quad}$	n'_I	C/P	КПД η	+	П5
7							↔		:	ИПД
8	ИП8	$Q'_ID_1^2$:	x	ИП6	x	ИП9	x	ИП0	x
9	3	7	0	0	M	x	C/P			9

Определить гидравлический удар в водоводе и изменение момента (нагрузки) при синхронном закрытии двух турбин от полной мощности до холостого хода. Режим закрытия в относительных параметрах

Т а б л и ц а 6.6б. Результаты вычислений

Шаг сче- та i	Время $t, \text{ с}$	Исходные данные на шаге			n'_I Индика- тор	$\delta,$ об/мин	→
		$a, \text{ мм}$	$n'_{I\text{ож}},$ об/мин	$\frac{Q_I, \text{ м}^2\text{/с}}{\text{PD}}$			
$H_1, \text{ м}$	$Q_1, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_2, \text{ м}$	$Q_2, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\eta, \%$	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	
$P0$	$P1$	$P2$	$P3$	$P5$	Индика- тор	Индикатор	

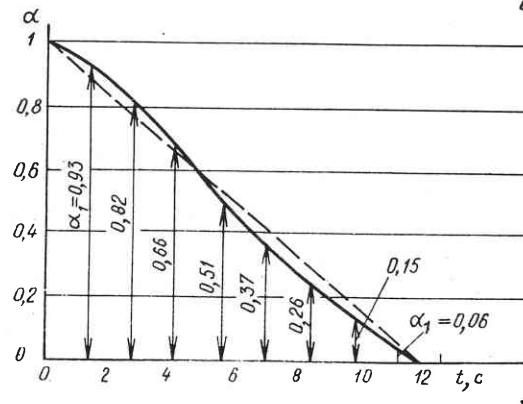
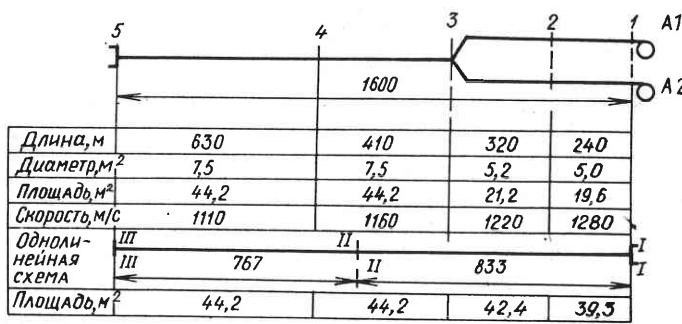


Рис. 6.7. Параметры напорных водоводов и режим регулирования (к примеру 6.3)

$a = a/a_{\max}$ — см. рис. 6.7, б. Универсальная характеристика турбины с экстраполяцией (штрих-пунктирная линия) показана на рис. 6.8, а.

Решение 1. Определение исходных условий. Начальный приведенный расход $Q'_{10} = \frac{139}{4.2^2 \sqrt{260}} = 0,49 \text{ м}^3/\text{с.}$

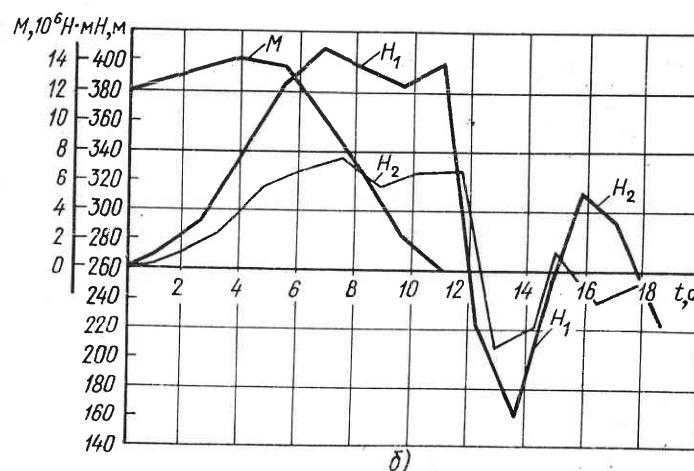
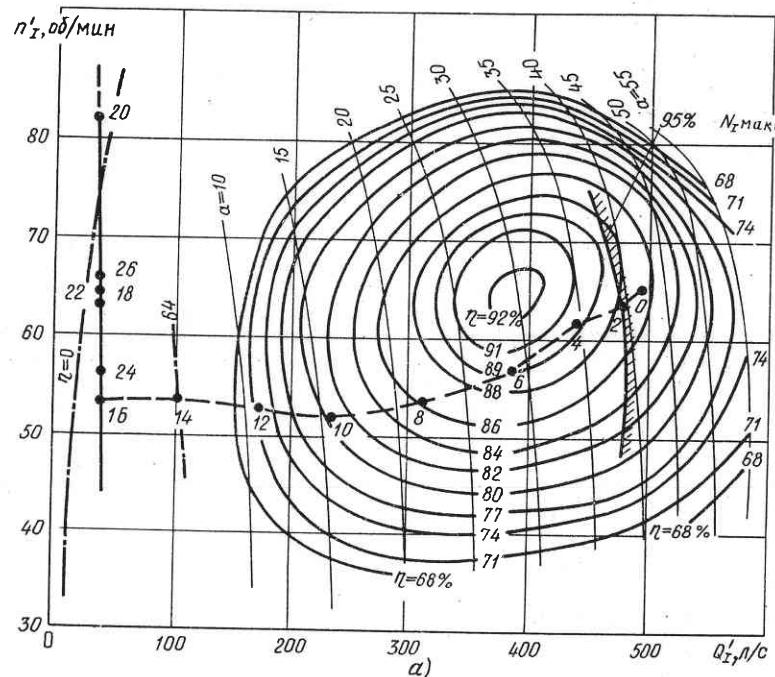


Рис. 6.8. Построение траекторий мгновенных режимов и параметры переходного процесса (к примеру 6.3)

Начальная приведенная частота вращения $n'_I = \frac{250 \cdot 4,2}{\sqrt{260}} = 65$ об/мин.

Начальное открытие по модели $a_0 = 32$ мм.

Скорости упругой волны по участкам, вычисленные по (4.3), приведены на рис. 6.7, а. Полное время пробега волны по (4.16) при $n = 5$

$$\Theta = \sum_{m=1}^{n-1} \frac{l_m}{c_m} = 1,37 \text{ с.}$$

2. Разбивка водовода на участки. Поскольку расчетный шаг $\Delta t = 2\theta$, то в данном случае следует принять $r = 2$ (два участка). Тогда по (4.16а) $\theta = 1,37/2 = 0,686$ с и число шагов счета на полный ход составит $12/(0,686 \cdot 2) > 8$.

Разбивка на участки по (4.18). Находим значение k – номера участка, до которого распространяется первый расчетный участок, определяемого перебором по условию

$$s = \left(\theta - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{l_j}{c_j} \right) \text{ мин} > 0.$$

При $k - 1 = 1$ $s = 0,685 - 0,1875 = 0,4975$; при $k - 1 = 2$ $s = 0,685 - 0,1875 - 0,262 = 0,2355$; при $k - 1 = 3$ $s = 0,685 - 0,1875 - 0,262 - 0,353 = -0,1175$.

В соответствии с требованием принимаем $k - 1 = 2$, $k = 3$, $s = 0,2355$, тогда в первый расчетный участок входит часть участка 3: $\Delta l'_1 = 1160 \times 0,2355 = 273$ м.

Обычно в расчетах нет необходимости выписывать значения s при различных $k - 1$. Здесь это сделано для большей наглядности.

Тогда $l'_1 = 240 + 320 + 273 = 833$ м. По разности находим второй участок $l'_2 = 1600 - 833 = 767$ м; $c'_1 = \frac{833}{0,1875+0,262+0,235} = 1216$ м/с;

$$F'_1 = \frac{833}{6,1+7,53+6,18} = 42,06; c'_2 = \frac{767}{\frac{410-273}{1160} + \frac{630}{1119}} = 1119 \text{ м/с}; F'_2 = 44,2 \text{ м}^2.$$

3. Общие исходные данные. Поправка на КПД по (5.8) на основании характеристики: $D_M = 0,6$ м; $\eta_{M0} = 0,92$; $\epsilon = 0,75$; $k_{\text{КПД}} = 1 - \frac{1-0,92}{0,92} 0,75^5 \sqrt{\frac{0,4}{4,1}} = 1,02$. Коэффициенты цепных уравнений по (4.11) $k_1 = \frac{1216}{9,81 \cdot 42,06} = 2,95$; $k_2 = \frac{1119}{9,81 \cdot 44,2} = 2,58$.

Общие исходные данные записывают в табл. 6.7а по форме, аналогичной табл. 6.6а.

Таблица 6.7а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{старт}}$, м	k_1	k_2	D_1 , м	n_0	m	$k_{\text{КПД}}$
Регистр	P4	PA	PB	P6	P7	P8	P9
Значение	265	2,95	2,58	4,2	250	2	1,02

4. Расчет переходного процесса. Значения открытия модели по шагам счета на основании заданного режима закрытия $a(t)$ приведены на рис. 6.7,б:

t	0	1,37	2,74	4,11	5,48	6,85	8,22	9,59	10,96	12,33
a	1	0,93	0,82	0,66	0,51	0,37	0,26	0,15	0,06	0
a	32	29,8	26,2	21,1	16,3	11,8	8,3	4,8	1,92	0

Таблица 6.7б. Результаты расчета процесса сброса нагрузки

i	Время t , с	Исходные данные на шаге			n'_I Индикатор	δ , об/мин	H_1 , м P0
		a , мм	$n'_{\text{тож}}$, об/мин	Q'_I , м ^{2,5} /с PD			
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	42,5	65	0,49	65	—	260
1	0,685	39,5	63	0,475	63,9	0,9	270,3
2	1,37	34,9	62	0,445	61,4	0,6	292,3
3	2,06	28	59	0,375	56,4	2,5	339,7
4	2,74	21,7	55	0,31	53,5	1,5	385,8
5	3,43	15,7	51	0,235	51,9	0,9	408,6
6	4,11	11	52	0,75	52,8	0,8	396,1
7	4,8	6,4	55	0,105	53,6	1,4	384,1
8	5,48	2,5	54	0,04	52,7	1,3	397,4
9	6,17	—	0,04	63,5	—	223,5	
10	6,85	2,5	—	0,04	82,6	—	161,5
11	7,54	—	—	0,04	63,8	—	270,7
12	8,22	—	—	0,04	56,7	—	243,5
13	8,9	—	—	0,04	66,2	—	251
14	9,59	—	—	0,04	—	—	
15	10,28	—	—	0,04	—	—	
16	10,96	—	—	0,04	—	—	
17	11,65	—	—	0,04	—	—	
18	12,3	—	—	0,04	—	—	
19	13,02	—	—	0,04	—	—	
20	13,7	—	—	0,04	—	—	
21	14,39	—	—	0,04	—	—	
22	15,07	—	—	0,04	—	—	
23	15,76	—	—	0,04	—	—	
24	16,44	—	—	0,04	—	—	
25	17,13	—	—	0,04	—	—	
26	17,81	—	—	0,04	—	—	
27	18,5	—	—	0,04	—	—	

При расчетах эти значения можно отдельно не выписывать, а сразу занести в таблицу результатов 6.7б.

Результаты расчетов по программе НАГР-У(2) приведены в табл. 6.7б, точки мгновенных режимов — на рис. 6.7,а, а изменение параметров по времени — на рис. 6.7,б.

К процедуре счета. 1. Начальное значение момента для $t = 0$ определяется по (5.7) и (5.9):

$$M'_1 = 93700 \frac{0,49}{65} 0,865 \cdot 1,02 = 623,7; M = 623,7 \cdot 4,2^3 \cdot 260 = \\ = 12 \cdot 10^6, \text{Н}\cdot\text{м}.$$

Для проверки результаты расчета полезно сопоставить с исходными

Q_1 , м ³ /с P1	H_2 , м P2	Q_2 , м ³ /с P3	Q_3 , м ³ /с P5	η , % Индикатор	$10^6 M$, Н·м	
					Индикатор	Индикатор
9	10	11	12	13	14	
278	263	278	278	0,865	12	
275,5	270,9	275,7	278	0,877	12,5	
268,4	284,6	265,8	273,4	0,892	13,4	
247,1	315,1	238,88	258,2	0,89	14,3	
214,8	327,6	195,1	219,3	0,862	13,7	
167,6	336,5	143,1	170,8	0,805	10,5	
122,9	315,9	95,7	115,4	0,72	6,7	
72,6	325,1	52,6	75,9	0,45	2,4	
28,1	328,4	4,7	29,3	0,08	0,17	
23,3	209,6	1,7	-19,8	0	0	
17,9	223,9	39,1	21,4	0	0	
23,2	311,4	37	55	0	0	
26,15	291,8	8,6	19	0	0	
22,2	225,4	13,6	-1,8			

данными по формуле (5.3б) $M = 9550 \frac{315\ 000}{250} = 12,03 \cdot 10^6$ Н·м. Совпадение получилось очень хорошее.

2. Порядок заполнения таблицы по времени аналогичен приведенному в примере 4.2 (см. табл. 4.5в).

3. На шаге $i = 6$ пришлось выполнить повторный расчет, так как δ оказалось большим. Для этого были снова введены значения H_1 , Q_1 и т.д., полученные на шаге $i = 5$, и новое значение Q'_1 .

4. На шаге $i = 16$ достигнуто открытие $a = 2,5$ мм, примерно соответствующее холостому ходу. При дальнейших расчетах сохраняются открытие $a = 2,5$ и приведенный расход $Q'_1 = 0,04 \text{ м}^3/\text{с}$. Расчеты на шагах 9–13 выполнены для оценки характера затухания колебаний. Поскольку при этих условиях n'_1 практически не влияет на изменение Q'_1 , то корректировка по n'_1 и δ не производилась.

Полученные основные результаты вычислений показаны на графике рис. 6.8, б. Здесь видно, что максимум давления в водоводе появляется через 5 с после начала закрытия и держится примерно в течение 6 с в сечении I–I на уровне 380–400 м, а именно максимум давления 408,6 м (относительное давление $h_{1\max} = 408,6/260 = 1,57$, гидравлический удар $\Delta h_1 = 0,57$ или 57 %), а в сечении II–II – на уровне 320 м, максимум 336,5 м ($h_{2\max} = 336,5/260 = 1,29$, $\Delta h_2 = 0,29$, или 29 %). После достижения конечного открытия давление в водоводе резко снижается (противоудар): в сечении I–I почти на 100 м против начального, а в сечении II–II на 50 м.

Представляет интерес оценка постоянной инерции напорного водовода по (3.6а). Для всего водовода получаем $T_w = \frac{278}{9,81 \cdot 260} \left(\frac{240}{39,3} + \frac{320}{42,4} + \frac{1040}{44,2} \right) = 4,05$ с. Водовод высокоинерционный. Для промежуточного сечения $T_{w2} = \frac{278}{9,81 \cdot 260} \frac{767}{44,2} = 1,89$ с. Если произвести

оценку гидравлического удара по отношению T_w/T_{w1} , как это часто делается, то гидравлический удар $\Delta h_2 = 0,57 \cdot 1,89 / 4,05 = 0,266$, что значительно меньше, чем полученный более точным расчетом.

Существенное значение имеет изменение момента M , так как оно характеризует быстродействие гидроагрегата по изменению нагрузки. В данном случае при закрытии турбины в течение 6,1 с момент нагрузки не только не снижается, но даже превышает начальное значение, достигая на 4-й с 1,19 начального. И лишь после этого момент быстро уменьшается. Повышение момента – следствие высокой инерционности напорного водовода, приводящей к снижению быстродействия гидроагрегата по изменению нагрузки.

Г л а в а 7

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЯХ ГИДРОАГРЕГАТОВ ОТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

7.1. Особенности расчетов процессов при отключениях гидроагрегатов

Сбросы нагрузки (см. гл. 1) возникают в результате коротких замыканий при внезапном отключении гидроагрегатов от энергосистемы и являются аварийными процессами. Для ГЭС рассматриваются случаи сбросов нагрузки при работе гидроагрегата в генераторном режиме, а для ГАЭС – сбросы нагрузки при работе в генераторном режиме и отключение гидроагрегата при работе в насосном режиме (так называемая потеря привода).

Главная особенность процессов сбросов нагрузки состоит в том, что они протекают при изменяющейся частоте вращения, которая на каждом шаге счета должна определяться по (5.4) и (5.5). Причем момент сопротивления электрической машины $M_{эм}$ обычно принимается равным нулю (фактически имеется момент сопротивления за счет вентиляционных потерь, особенно при повышении частоты вращения, но он невелик, и это дает некоторый запас при определении максимального повышения частоты).

Основной задачей расчетов сброса нагрузки является определение отклонения частоты вращения (временной неравномерности хода) и изменения давления в проточном тракте, включающем напорные водоводы (гидравлический удар), т.е. определение так называемых гарантий регулирования, которые нормируются. Кроме того, часто требуется установить наиболее благоприятные режимы регулирования – изменения во времени открытия направляющего аппарата $a(t)$, а для ПЛ турбин и изменения угла установки лопастей рабочего колеса $\varphi(t)$.

Расчеты переходных процессов при сбросах нагрузки выполняются на базе универсальных модельных характеристик (могут вводиться корректировки по имеющимся натурным данным). Поскольку эти процессы всегда сопровождаются попаданием гидромашины в тормозные, а иногда и в насосные режимы, рекомендуется использовать две группы характеристик: расходные $Q'_1(a, n'_1)$ и моментные $M'_1(a, n'_1)$ (последние можно построить по универсальным характеристикам в соответствии с § 5.2).

Структурная схема алгоритма расчетов переходных процессов при сбросах нагрузки и отключениях гидроагрегатов от сети (программы СБРОС) показана на рис. 7.1. После начала счета, ввода программы осуществляется ввод общих исходных данных 1: статического напора $H_{стат}$, диаметра турбин или насостурбин D_1 , числа агрегатов m , коэффициента маховых масс гидроагрегата $K_{\Delta u}$, динамических параметров

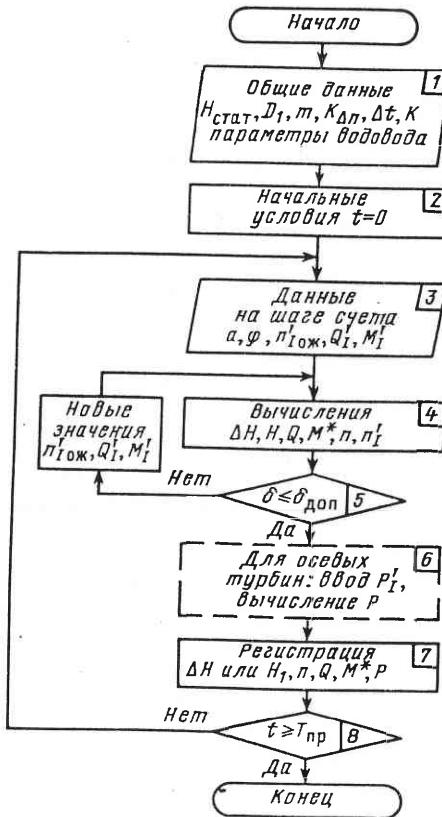


Рис. 7.1. Структурная схема алгоритма расчетов переходных процессов при внезапных отключениях гидроагрегата от энергосистемы

напорного тракта (разные для жесткого и упругого гидравлического удара).

Затем в 2 устанавливаются и заносятся в соответствующие регистры памяти начальные условия при $t = 0$: напоры H , расход Q , частота вращения n , момент M^* . Далее в 3 последовательно регистрируются и вводятся исходные данные для каждого шага счета: открытие a (для ПЛ турбин и φ), ожидаемое значение приведенной частоты n' _{1ож}, Q'_1 , M'_1 . Следующим этапом в 4 является вычисление на шаге значений ΔH или H , расхода Q , момента M^* , частоты вращения n и фактической приведенной частоты n'_1 . В 5 производится сравнение исходного значения n'_1 _{ож} с фактическим. Если расхождение меньше допустимого, то можно переходить к следующему шагу. Предусмотрена операция 6, позволяющая вводить P'_1 и определять осевое усилие P , что может требоваться для осевых турбин. Затем выполняется 7 – регистрация полученных значений на шаге (занесение в таблицу результатов), и если процесс не закончен в 8 $t < T_{пр}$, то вводятся данные для следующего шага счета, и процедура повторяется с 3. Если же в 5 расхождение оказалось выше допустимого, то приходится изменить значение n'_1 _{ож}, соответственно изменить Q'_1 и M'_1 , снова ввести параметры предыдущего шага (H , Q , M^* и др.) и повторить счет 3. Когда в 8 $t \geq T_{пр}$, счет окончен.

Основные расчетные зависимости используются те же, что и в программе НАГР. Добавляется только соотношение (5.4), определяющее приращение частоты вращения Δn_i на шаге, которое используется в форме

$$\Delta n_i = K_{\Delta n} \Delta t (M_i^* + M_{i-1}^*), \quad (7.1)$$

где $K_{\Delta n}$ – коэффициент маховых масс гидроагрегата.

Для турбинного режима

$$K_{\Delta n} = \frac{19,1}{GD^2} k_{\text{КПД}}; \quad (7.1a)$$

для насосного режима

$$K_{\Delta n} = \frac{19,1}{GD^2 k_{\text{КПД}}}, \quad (7.1b)$$

где GD^2 – маховой момент вращающихся частей гидроагрегата (ротор и рабочее колесо); $k_{\text{КПД}}$ – поправка на КПД по (5.8); Δt – интервал времени; M_i^* и M_{i-1}^* – моменты рабочего колеса без учета поправки на КПД (с целью экономии регистров памяти $k_{\text{КПД}}$ включена в $K_{\Delta n}$). Для тормозных режимов поправку на КПД вводить не следует.

Поскольку в n'_1 входит определяемый неизвестный параметр n , то при расчетах по программам СБРОС требуется более высокая точность, и допустимое отклонение $\delta_{\text{доп}}$ в (6.1) не должно превышать 1 % n'_1 , т.е. 0,6–1,2 об/мин.

По программам СБРОС расчеты могут осуществляться, как в условиях жесткого гидравлического удара, без учета упругости (при малой длине напорных водоводов, а также для низконапорных ГЭС с осевыми и диагональными турбинами), так и с учетом упругости (упругий гидравлический удар).

7.2. Программа СБРОС-Ж без учета упругости

Расчеты процессов сброса нагрузки при определении жесткого гидравлического удара осуществляются по программе СБРОС-Ж, которая построена на базе программы НАГР-Ж.

Общие исходные данные вводятся в соответствии с табл. 7.1а.

В программе СБРОС-Ж первоначально по адресам 00–38, повторяющим программу НАГР-Ж, вычисляется общий инерционный напор всего тракта $\Delta H_{\text{тр}}$ по (3.9). Правило знаков по адресу 38 берется согласно пояснениям к программе ГУ-Ж (стр. 32). Последующими операциями 40–49 осуществляется вычисление момента M_i^* и операциями 55–61 – определение Δn и n . Завершается основная часть программы вычислением расхода Q (адрес 71) и приведенной частоты вращения n'_1 (адрес 74). Дополнительная часть программы (адреса 76–83) набирается, только когда производится вычисление осевого усилия P . Эта часть программы начинается с ввода в регистр X значения P'_1 , полученного по характеристике гидромашины.

Результаты вычислений по программе СБРОС-Ж для гидромашин одиночного регулирования, РО и Пр регистрируются в табл. 7.1б.

Таблица 7.1а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{старт}}$, м	Δt , с	D_1 , м	m	$K_{\Delta n}$ по (7.1а)	$K_{\text{ин.тр}}$ по (3.4а)
Регистр	P3	PS	P6	P8	P9	PA

Программа СБРОС-Ж

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП6	Fx^2	ИПД	x	ИП8	x	ПД	Fx^2	ИПА	x
1	ИП5	:	2	:	ИП4	+	ИПА	ИП5	:	x
2	↑	Fx^2	ИПД	Fx^2	ИП3	x	/-	ИП4	Fx^2	+
3	ИПА	Fx^2	x	ИП5	Fx^2	:	-	$F\sqrt{-}$	или	П0
4	ИПС	ИП6	↑	Fx^2	x	x	ИП0	ИП3	H	M_i^*
5	M_{i-1}^*	ИП1	↗	+ F_Bx	M_i^* П1	↗	ИП9	x	+	x
6	n	ИП7	П7	ИП6	x	ИП0	ИП3	H	Δn	
7	ИПД	x	П4	FQ	:	С/П	P_1	$F\sqrt{-}$	↑	
8	ИП3	H	P	C/П		ИП6	Fx^2	x	ИП0	

Таблица 7.1б. Результаты вычислений

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	Исходные данные на шаге				→
		<i>a</i> , мм	$n'_{\text{ож}}$ об/мин	Q'_I , м ^{2,5} /с PD	M'_I , Н·м PC	
→	Индикатор	n'_I δ, об/мин	$\Delta H_{\text{тр}}$, м P0	M^* , Н·м P1	Q , м ³ /с P4	n P7

Если выполняются расчеты для гидроагрегатов с турбинами двойного регулирования ПЛ, то нужно иметь пакет пропеллерных характеристик, как было указано выше, и для нахождения значений параметров на шаге Q'_I , M'_I и др. производить интерполяции по (6.3а) между характеристиками φ_a и φ_b или предварительно строить в соответствии с заданным режимом регулирования интерполяционную характеристику (см. рис. 6.6) и по ней выполнять расчет, как для турбин одиночного регулирования.

Целесообразно использовать процедуры интерполяций ИНТЕР-1 и ИНТЕР-2, приведенные в пояснениях в программе НАГР-ЖМ. Результаты вычислений для ПЛ гидромашин, если они выполняются с интерполяцией на каждом шаге, регистрируются в табл. 7.1в.

К процедуре счета по программе СБРОС-Ж.
1. После набора программы производится ввод общих исходных данных в соответствии с табл. 7.1а, определяются начальные условия для $i = 0$, $t = 0$, и они вводятся в регистры и таблицу результатов 7.1б или 7.1в. При этом для турбинного режима M^* выражается формулой

$$M^* = M/k_{\text{КПД}}, \quad (7.2)$$

одновременно для проверки можно определять M по (5.3б).

2. В таблицу результатов рекомендуется заранее вписать шаги счёта i , время $t \neq \sum \Delta t$ и значения a_i и φ_i в соответствии с заданным режимом регулирования.

3. Каждая последующая точка $i = 1, 2, \dots$ получается расчетом после ввода исходных данных на шаге в соответствии с принятым $n'_{\text{ож}}$, а именно Q'_I и M'_I . Эти значения определяют по расходной и моментной универсальным характеристикам, причем определяющими координатами являются открытие a_i , а для ПЛ турбин и φ_i . Для гидромашин с одиночным регулированием или по интерполяционным характеристикам рекомендуется непосредственно на характеристики наносить режимные точки и строить траектории мгновенных режимов, что облегчает правильный выбор $n'_{\text{ож}}$. Для ПЛ турбин двойного регулирования требуемые значения Q'_I и M'_I на шаге получаются интерполяцией между двумя группами пропеллерных характеристик φ_a и φ_b . При этом рекомендуется использовать процедуры ИНТЕР-1 и ИНТЕР-2. Таким же образом находится P'_I на втором этапе, при котором вычисляется осевое усилие P .

4. Произвольно назначается $n'_{\text{ож}}$, но желательно предусмотреть ход траектории мгновенных режимов. Критерием достаточной точности является разность:

$$\delta = |n'_{\text{ож}} - n'| \leq \delta_{\text{доп}},$$

причем при расчетах сбросов нагрузки $\delta_{\text{доп}}$ берется около 1 % n' , следовательно, $\delta_{\text{доп}} = 0,6 \div 1,2$ об/мин в зависимости от быстроходности гидромашины. Если $\delta \leq \delta_{\text{доп}}$, то регистрируются полученные значения

Таблица 7.1в. Результаты вычислений для гидроагрегата с поворотно-лопастной турбиной

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	Исходные данные на шаге								
		<i>a</i> , мм	φ , град	φ_a , град	φ_b , град	n'_1 ож., об/мин	Q'_{Ia} , $m^{2,5}/c$	Q'_{Ib} , $m^{2,5}/c$	$Q'_{I, M^{2,5}/c}$ PD	M'_{Ia} , Н·м

и переходят к следующему шагу счета. Если же $\delta > \delta_{\text{доп}}$, то нужно изменить n'_1 ож., ввести новые значения Q'_I и M'_I и восстановить значения $\Delta H_{\text{тр}}$, M^* , Q и n предыдущего шага в соответствующих регистрах памяти.

5. При полном закрытии направляющего аппарата $a = 0$, $Q'_I = 0$. В (3.9) $A = 0$, тогда подкоренная разность должна быть равна нулю. Однако из-за погрешностей округления она может оказаться отрицательным числом, очень малого абсолютного значения, что приводит к остановке счета и появлению сигнала ошибки ЕГГОГ. Чтобы этого не происходило, рекомендуется вместо $Q'_I = 0$ принимать какое-то небольшое значение, например $Q'_I = 0,0001$, что не влияет на результат, но исключит сбой в выполнении программы.

6. Следует иметь в виду, что программа СБРОС-Ж допускает широкое варьирование интервала Δt и других параметров, например $H_{\text{стат}}$, в процессе счета.

Использование программы СБРОС-Ж показано на конкретном числовом примере.

Пример 7.1. Обратимый гидроагрегат ГАЭС мощностью 204 МВт при напоре 100 м, частоте вращения $n_0 = 150$ об/мин имеет верховой стационарный трубопровод диаметром $D = 7,5$ м, длиной $L_B = 670$ м. Маховой момент вращающихся частей $GD^2 = 30 \cdot 10 \text{ т} \cdot \text{м}^2$. Гидромашина типа РОНТ быстроходностью около $n_s = 250$, универсальные характеристики которых, расходные и моментные, показаны на рис. 7.2. Параметры проточного тракта гидромашины: $D_1 = 6,3$ м, $b_0 = 0,14$, $\bar{D}_2 = 0,8$, отсасывающая труба изогнутая, отрицательная высота $\bar{h}_{\text{от}} = 2,5$, отрицательная длина диффузора $\bar{L}_{\text{от}} = 5$. Определить гидравлический удар и повышение частоты вращения при сбросе нагрузки. Время закрытия $T_s = 30$ с, режим регулирования линейный. Статический напор 102 м.

Решение. 1. Определение начальных параметров: расход, принимаем КПД 92 %, тогда $Q = \frac{204 \cdot 1000}{9,8 \cdot 100 \cdot 0,92} = 226 \text{ м}^3/\text{с}$, приведенный расход $Q'_I = 226 / (6,3^2 \sqrt{100}) = 0,57 \text{ м}^3/\text{с}$.

По расходной характеристике начальное открытие $a_0 = 28$ мм (модельное). Приведенная частота вращения $n'_1 = 150 \cdot 6,3 / \sqrt{100} = 94,5$ об/мин. Гидравлические потери в трубопроводе 2 м.

		Результаты 1-го этапа расчета					Результаты 2-го этапа расчета				
M'_{Ib} , Н·м	$M'_{I, H \cdot m}$ PC	n'_1 Индикатор	δ , об/мин	$\Delta H_{\text{тр}}$ P0	M^* P1	Q P4	n P7	P'_{Ia}	P'_{Ib}	P_I PB	P Индикатор

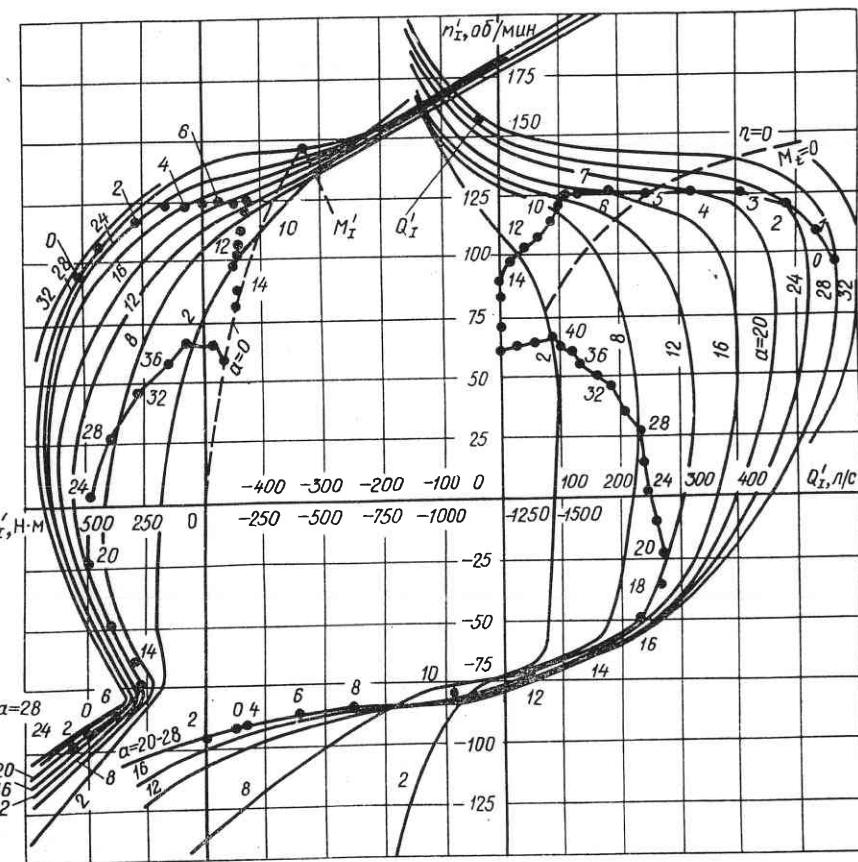


Рис. 7.2. Универсальная характеристика обратимой гидромашины РОНТ и траектории мгновенных режимов

2. Определение коэффициента инерционности напорного тракта.

Водовод площадью сечения $F_B = 44 \text{ м}^2$, тогда $K_{\text{ин.тр}} = \frac{1}{9,8} \frac{670}{44} = 1,55$. Для спиральной камеры ($\varphi_{\text{охв}} = 350$, $v_{\text{сп}} = 9,5 \text{ м/с}$) по (3.8в) $K_{\text{ин.сп}} = \frac{1}{9,8} \frac{3,6 \cdot 9,5}{226 \cdot 350 / 360} 6,3 = 0,1$. Для лопастной системы по (3.8г)

$$K_{\text{ин.лоп}} = \frac{1}{9,8} \frac{0,9}{1,35(0,14 + 0,8^2/4) \cdot 6,3} = 0,036. \text{ Для отсасывающей трубы по (3.8д) выходное сечение } F_5 = 2(6 \times 7) = 84 \text{ м}^2, \lambda_{\text{отс}} = 2,5 + 5 = 7,5, \text{ тогда } K_{\text{ин.тр}} = \frac{2}{9,8} \frac{7,5 \cdot 6,3}{0,8^2 \cdot 6,3^2 / 4 + 84} = 0,09. \text{ Суммарный коэф-}$$

фициент инерционности тракта $K_{\text{ин.тр}} = 1,55 + 0,1 + 0,036 + 0,09 = 1,78$.

3. Определение $K_{\text{КПД}}$. Диаметр модели $D_M = 357 \text{ мм}$, максимальный

$$\text{КПД } 91\%. \text{ По (5.8) } K_{\text{КПД}} = 1 + \frac{1 - 0,91}{0,91} 0,75^5 \sqrt{\frac{0,37}{6,3}} = 1,03.$$

4. Коэффициент маховых масс по (7.1а)

$$K_{\Delta n} = \frac{19,1 \cdot 1,03}{30 \ 000 \ 000} = \frac{19,67}{30 \ 000 \ 000}.$$

Общие исходные данные записывают в табл. 7.2а.

Таблица 7.2а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}$, м	Δt , с	D_1 , м	m	$K_{\Delta n}$	$K_{\text{ин.тр}}$
Регистр	P3	P5	P6	P8	P9	PA
Значение	102	2	6,3	1	$\frac{19,67}{30 \ 000 \ 000}$	1,78

Определение начального момента. По мощности (5.3,6) $M_0 = 9550 \cdot 204 \ 000 / 150 = 12,99 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и по (7.2) $M_0^* = 12,99 \cdot 10^6 / 1,03 = 12,61 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Непосредственно по моментной характеристике $a_0 = 28$; $n'_I = 94,5$; $M'_I = 500 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_0^* = 500 \cdot 6,3^3 \cdot 100 = 12,5 \cdot 10^6$. Совпадение удовлетворительное.

Основные результаты вычислений по программе СБРОС-Ж – см. табл. 7.2б.

Полученные в процессе счета режимные точки и линия мгновенных режимов показаны на универсальной расходной характеристике (рис. 7.2).

К процедуре счета по программе СБРОС-Ж.

1. При сбросе нагрузки n'_I зависит от двух изменяющихся параметров

100

n и $H = H_{\text{стат}} + \Delta H_{\text{тр}}$, поэтому правильно назначить величину n'_I сразу удастся редко и на большинстве шагов приходится выполнить по две итерации (иногда требуются и три) для обеспечения требуемой точности.

2. Наиболее трудно установить положение режимной точки по n'_I в области, где линии открытия $a = \text{const}$ идут с малым наклоном к оси Q'_I (это специфическая особенность гидромашин РОНТ). В данном случае эта область лежит при $n'_I > 110 \div 120$. Здесь решающую роль играет приведенный расход Q'_I .

3. На шагах 15–17 направляющий аппарат закрыт полностью, но с целью избежать сбоя счета принято $Q'_I = 0,0001$.

4. Динамический напор H_I в сечении у гидромашины вычислен по (6.2) по соответствующей программе при $K_{\text{ин1}}/K_{\text{ин.тр}} = 1,55/1,78 = 0,871$ и $H_{\text{стат}} = 102 \text{ м}$. Полученное расчетом (табл. 7.2б) изменение

Таблица 7.2б. Результаты вычислений по программе СБРОС-Ж

Шаг i	Время t , с	Исходные данные на шаге				n'_I Индикатор
		a , мм	n'_I отж., об/мин	Q'_I , м ³ /с PD	M'_I , Н·м PC	
0	0	28	94,5	0,57	500	94,5
1	2	26,1	100	0,54	455	111,3
			109	0,53	420	109,8
2	4	24,2	117	0,5	300	123,9
			121	0,485	265	121,6
3	6	22,4	124	0,425	180	128,2
			125	0,41	140	125,5
4	8	20,5	125	0,35	45	129
			126	0,32	25	124,9
5	10	18,7	125	0,25	0	126,3
6	12	16,8	125	0,2	-40	128,8
			125,5	0,18	-90	124,5
7	14	14,9	125	0,12	-140	120,8
			124,5	0,14	-120	124,7
8	16	13	124	0,1	-120	120,5
			120	0,12	-100	124,5
9	18	11,2	122	0,1	-120	120,7
10	20	9,3	120	0,1	-130	119,1
11	22	7,5	115	0,07	-130	109
			112	0,08	-120	110,9
12	24	5,6	107	0,065	-120	106,2
13	26	3,7	105	0,04	-120	99,4
			101	0,045	-110	100,4
14	28	1,9	95	0,03	-110	96,4
15	30	0	90	0,0001	-130	89
16	32	0	88	0,0001	-120	88,1
17	34	0	84	0,0001	-110	83,3

Продолжение табл. 7.2б.

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	δ , об/мин	$\Delta H_{\text{тр}}$, м	$10^6 M^*$, Н·м	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	n	$H_1, \text{м}$ по (6.2)
				P0			
0	0	—	0	12,5	226	150	100
1	2	11,3	—	—	—	—	—
		0,8	6,3	11,37	218,9	181,3	106,9
2	4	6,9	—	—	—	—	—
		0,6	11,9	7,55	205,5	206,1	111,3
3	6	4,2	—	—	—	—	—
		0,5	21,8	4,33	181	221,7	119
4	8	4,2	—	—	—	—	—
		1,1	30,8	0,83	146,4	228,5	126
5	10	1,3	29,1	0	113,6	229,6	124,7
6	12	3,8	—	—	—	—	—
		1	28,5	-2,94	81,6	225,7	124,2
7	14	4,2	—	—	—	—	—
		0,2	18,4	-3,61	61	217,1	116,3
8	16	3,5	—	—	—	—	—
		1,5	9,5	-2,79	50,3	208,7	109,4
9	18	1,3	7,8	-3,29	41,6	200,7	108,1
10	20	0,9	1,1	-3,35	40,3	192	102,9
11	22	6	—	—	—	—	—
		1,1	6,4	-3,25	33,1	183,3	107
12	24	0,8	5,6	-3,23	26,8	174,8	106,4
13	26	5,6	—	—	—	—	—
		0,6	7,2	-3	16,7	166,6	107,6
14	28	0,6	5,6	-2,96	12,4	158,8	106,4
15	30	1	10,9	-3,67	0,04	150,1	110,5
16	32	0,1	3,4	-3,06	0,04	141,2	104,7
17	34	0,7	0	-2,8	0,04	133,6	102

во времени динамического напора H_1 в сечении у гидромашины, частоты вращения n , момента на валу M^* , расхода Q и открытия направляющего аппарата a (по модели), характеризующие протекание переходного процесса, сброса нагрузки, показаны на рис. 7.3. Здесь особенно наглядно видно, что, несмотря на длительное время регулирования $T_s = 30$ с, наиболее интенсивные динамические процессы происходят в течение первой трети этого времени. Нулевое значение момента M^* и максимум частоты вращения $\beta_{\max} = 229,6/150 = 1,53$ достигаются при $t = 10$ с. В то же время наблюдается пик динамического напора $H_1 = 126$ м и $\Delta H_{\max} = (126 - 102)/102 = 0,235$. При $t > 10$ с насостурбина переходит в тормозной режим, причем значение момента держится почти постоянным $M^* = (-3 \div -3,5) \cdot 10^6$ Н·м, что определяет равномерное снижение частоты вращения гидроагрегата.

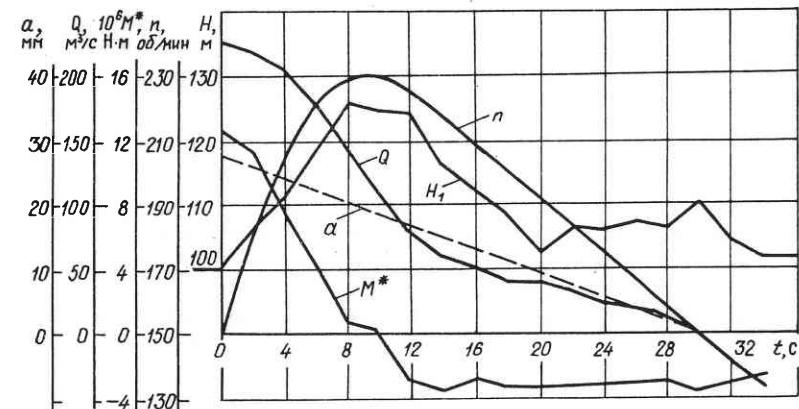


Рис. 7.3. Процесс сброса нагрузки

Все эти особенности характерны для обратимых гидроагрегатов с насостурбинами. В случае турбинных гидроагрегатов обычно время регулирования T_s значительно меньше $T_s = 8 \div 16$ с, и оно в основном определяет динамические показатели переходного процесса сброса нагрузки.

7.3. Программы СБРОС-У с учетом упругости

Расчеты переходных процессов сбросов нагрузки при учете упругого гидравлического удара осуществляются по программам СБРОС-У(1) и СБРОС-У(2), которые базируются на программах НАГР-У(1) и НАГР-У(2). Как и в программах НАГР-У, одна из особенностей расчетов переходных процессов с учетом упругого гидравлического удара состоит в том, что расчетный интервал времени не может выбираться произвольно, как при жестком гидравлическом ударе, а определяется по θ по (4.10), т.е. зависит от длины напорного водовода и числа расчетных участков r по (4.20а). Данные программы рассчитаны на $r = 1$ и 2. При сбросах нагрузки одновременно решается уравнение (7.1), поэтому дополнительно нужно ввести три расчетных параметра: M'_1 — приведенный момент на валу, определяемый по характеристике (открытием a) и приведенной частоте вращения; M'_{i-1} — момент без поправки на КПД предыдущего шага; коэффициент маховых масс $K_{\Delta n}$ по (7.1а) и Δt , причем в данном случае $\Delta t = 2\theta$. С целью экономии ячеек памяти вводится единый коэффициент $K_{\Delta n} \cdot 2\theta$.

Общие исходные данные для расчета по программе СБРОС-У(1) вводятся в соответствии с табл. 7.3а.

Результаты вычислений регистрируются в табл. 7.3б.

Таблица 7.3а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}, \text{м}$	$D_1, \text{м}$	m	$K_{\Delta n} \cdot 2\theta$	$k = \frac{c}{gF}$
Регистр	P2	P6	P8	P9	PA

Программа СБРОС-У(1)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП6	Fx^2	ИПД	\times	ИП8	\times	ПД	ИПА	\times	2
1	:	/-	\uparrow	Fx^2	ИП2	$+$	ИПА	ИП3	\times	$+$
2	$F\sqrt{\quad}$	или	\uparrow	ИПД	\times	П1	\rightleftarrows	H_1	Fx^2	П0
3	ИП0	$-$	ИПА	:	ИП1	Q_2	П3	ИПС	ИП6	\uparrow
4	D_1^3				M_i^*	M_{i-1}^*			M_i^*	
5	Fx^2	\times	\times	ИП0	\times	ИП4	\rightleftarrows	$+ \ F_B x$		П4
6	\rightarrow	Δn	n							
7	n'_1	ИП9	\times	ИП7	$+$	П7	ИП6	\times	ИП0	$F\sqrt{\quad}$
8	:	C/P								

Таблица 7.3б. Результаты вычислений

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	Данные на шаге					\rightarrow	
		<i>a</i> , мм	$n'_{\text{лож}}$, об/мин	$Q'_B \text{ м}^{2,5}/\text{с}$ PD	$M'_I, \text{Н}\cdot\text{м}$ PC			
\rightarrow								
		n'_I	$\delta, \text{об}/\text{мин}$	$H_1, \text{м}$ P0	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$ P1	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$ P3	$M^*, \text{Н}\cdot\text{м}$ P4	n P7
		Индикатор						

Программа СБРОС-У(1) до адреса 36 повторяет программу НАГР-У(1). Здесь вычисляются значения Q_1 , H_1 , расхода и напора в сечении 1–1 (у гидромашины), а также Q_2 – расхода в верховом сечении 2–2. Операциями по адресам 38–44 осуществляется вычисление момента M_p^* 45–54 – частоты вращения n_i и 56–61 – n'_{IIi} .

Одна из особенностей расчета по программе СБРОС-У(2) состоит в том, что для ввода всех исходных данных, общих и на шаге, а также

расчетных параметров требуется 15 регистров памяти; например, новые микрокалькуляторы "Электроника МК-61" и "МК-52" имеют 15 регистров памяти, в том числе дополнительный РЕ, а в более старых микрокалькуляторах только 14. При наличии 14 регистров памяти один из общих параметров, а именно m , вводится непосредственно при наборе в программы. При этом общие исходные данные составляют в соответствии с табл. 7.4а.

Таблица 7.4а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}, \text{м}$	$D_1, \text{м}$	$K_{\Delta n} \cdot 2\theta$	$k_1 = \frac{c_1}{gF_1}$	$k_2 = \frac{c_2}{gF_2}$
Регистр	P4	P6	P9	PA	PB

Программа СБРОС-У(2)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИП6	Fx^2	ИПД	\times	m	Q_1	\times	ПД	ИПА	\times
1	:	/-	\uparrow	Fx^2	ИП2	$+$	ИПА	ИП3	\times	$+$
2	$F\sqrt{\quad}$	или	\uparrow	ИПД	\times	П1	\rightleftarrows	H_1	Fx^2	П0
3	ИП0	$-$	ИП5	ИПВ	\times	Q_2	$+$	ИП1	ИПА	\times
4	ИПА	ИПВ	$+$:	П3	ИП1	$-$	ИПА	\times	ИП0
5	H_2	$+$	П2	ИП4	ИП2	$-$	ИПВ	:	ИП3	Q_3
6						D_1^3			M_i^*	M_{i-1}^*
7	ИПС	ИП6	\uparrow	Fx^2	\times	\times	ИП0	Δn_i	n'_I	ИП8
8	n'_I	$\delta, \text{об}/\text{мин}$	$H_1, \text{м}$ P0	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$ P1	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$ P3	$M^*, \text{Н}\cdot\text{м}$ P4	n P7			ИП6

Исходные данные на шаге счета и полученные результаты регистрируются в табл. 7.4б.

Программа СБРОС-У(2) до адреса 60 повторяет программу НАГР-У(2), за исключением адреса 04, где вводится значение m (число гидроагрегатов) цифрой от 1 до 9. Здесь определяются значения динамических напоров в расчетных сечениях H_1 и H_2 и расходов Q_1 , Q_2 и Q_3 со сдвигом по времени на θ . Далее производится вычисление момента M_p^* (адреса 60–67), приращения частоты вращения Δn (по адресу 77) и приведенной частоты n'_I (по адресу 83).

Таблица 7.46. Результаты вычислений

Шаг счета i	Время $t, \text{с}$	Данные на шаге				n'_I Индикатор	→	
		$a, \text{мм}$	$n'_{\text{лож}}, \text{об/мин}$	Q'_I PD	M'_I PC			
→	$\delta, \text{об/мин}$	$H_{1,\text{м}} / P_0$	$Q_{1,\text{м}^3/\text{с}} / P_1$	$H_{2,\text{м}} / P_2$	$Q_{2,\text{м}^3/\text{с}} / P_3$	$Q_{3,\text{м}^3/\text{с}} / P_5$	n / P_7	$M^*, \text{Н}\cdot\text{м} / P_8$

К процедуре счета по программам СБРОС-У (1) и (2). 1. Перед выполнением расчетов необходимо привести напорный водовод к однониточному, если он разветвленный, и выполнить разбивку на участки, если $r = 2$ по (4.18) (см. § 4.4).

2. Начальные значения для $i = 0$ и $t = 0$ определяются по начальному режиму $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_0$ и $H_1 = H_{\text{стат}} - h_{\text{пот1}}$ и $H_2 = H_{\text{стат}} - h_{\text{пот2}}$, где $h_{\text{пот1}}$ и $h_{\text{пот2}}$ – гидравлические потери на всей длине водовода и на верховом участке до сечения 2–2. Начальный момент M_0^* вычисляется по (7.2) и (5.36), а также следует проверить расчет по (5.8) в соответствии с параметрами начального режима a и $n'_{\text{лож}}$ по универсальной характеристике.

3. Рекомендуется в соответствии с принятым режимом регулирования заранее определить открытие направляющего аппарата для шагов счета с интервалом по времени 2θ , где θ определяется по (4.16а).

4. Выбор $n'_{\text{лож}}$ и контроль точности выполняются в соответствии с п. 4 к процедуре счета по программе СБРОС-Ж. Отличие состоит лишь в том, что $Q = Q_1$ и $H = H_1$.

5. Каждый счет по программе дает значения искомых параметров для всех расчетных сечений со сдвигом по времени на θ . Соответственно заполняется таблица результатов (см. табл. 7.26).

Использование программ СБРОС-У показано на числовом примере.

Пример 7.2. Для обратимого гидроагрегата ГАЭС (пример 7.1) рассчитать процесс потери привода при следующих начальных условиях: $H_{\text{стат}} = 102 \text{ м}$, подача $Q_0 = 180 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_{\text{пот}} = 2 \text{ м}$. Режим закрытия направляющего аппарата линейный, $T_s = 30 \text{ с}$.

Решение. Определение начальных параметров (направление расхода и вращения, обратное турбинному, считаем отрицательным). Приведенный расход $Q'_I = -180/6,3^2 \sqrt{104} = -0,445 \text{ м}^3/\text{с}$. Приведенная частота вращения $n'_I = -150 \cdot 6,3/104 = -92,7 \text{ об/мин}$. По универсальной характеристике (рис. 7.2) определяем $a_0 = 20 \text{ мм}$, что соответствует максимуму КПД.

2. Общие исходные данные: скорость распространения упругой волны по (4.3) и (4.5) для железобетонного трубопровода $c = 1050 \text{ м/с}$ (среднее значение). При этом по (4.16) $\Theta = 670/1050 = 0,64 \text{ с}$ и по (4.20а)

$r \geq (16 \div 20) 0,64/30 = 0,4$. Принимаем $r = 1$, тогда расчетный интервал составляет $2 \cdot 0,64 = 1,28 \text{ с}$.

Для обратимых насостурбин, у которых на характеристике имеются участки, где наклон линий открытия a мал, часто предпочитают брать меньший интервал по времени. В данном случае, если принять $r = 2$, интервал счета составит $0,64 \text{ с}$, но при этом вдвое увеличится трудоемкость расчетов.

Исходные данные: для насосного режима

$$K_{\Delta n} \cdot 2\theta = \frac{19,1 \cdot 1,28}{30\ 000\ 000 \cdot 1,03} = \frac{23,74}{30\ 000\ 000};$$

$$\text{для тормозного режима } K_{\Delta n} \cdot 2\theta = \frac{19,1 \cdot 1,28}{30\ 000\ 000} = \frac{24,45}{30\ 000\ 000}; \text{ для}$$

$$\text{турбинного режима } K_{\Delta n} \cdot 2\theta = \frac{19,1 \cdot 1,28 \cdot 1,03}{30\ 000\ 000} = \frac{25,18}{30\ 000\ 000}. \text{ По (4.11)}$$

$$k_1 = c_1 / (gF_1) = 1050 / (9,8 \cdot 44,2) = 2,42.$$

3. Начальные и расчетные данные. Начальный момент на валу: по характеристике для начального режима $M'_I = 510 \text{ Н}\cdot\text{м}$; КПД по (5.9) $\eta = 93\ 700 Q'_I / (n'_I M'_I) = 93\ 700 \cdot 0,445 / (92,7 \cdot 510) = 0,88 \%$. Поправка на диаметр по (5.8) при $\epsilon = 0,5$ $k_{\text{КПД}} = 1 + \frac{1 - 0,88}{0,88} 0,5 \left(1 - \sqrt[5]{\frac{0,357}{6,3}} \right) = 1,03$. Тогда $M_0^* = M'_I D_1^3 H = 510 \cdot 6,3^3 \cdot 104 = 13,26 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

$$\text{Начальная мощность на валу по (5.36)} N_0 = \frac{M_0^* n}{9550 k_{\text{КПД}}} = \frac{13,26 \cdot 10^6 \cdot 150}{9550 \cdot 1,03} = 202\ 200 \text{ кВт.}$$

Далее исходные данные и результаты приведены в табл. 7.5, 7.5а, 7.5б.

Таблица 7.5. Изменение открытия турбины во времени

t	0	1,28	2,56	3,84	5,12	6,4	7,68	8,96	10,24	11,52	12,8
a	20	19,15	18,3	17,44	16,6	15,7	14,9	14	13,2	12,3	11,5
t	14,08	15,36	16,64	17,92	19,2	20,48	21,76	23,04	24,32	25,6	
a	10,6	9,8	8,9	8,1	7,2	6,3	5,5	4,6	3,8	2,9	
t	26,88	28,16	29,44	30,72	32						
a	2,1	1,2	0,4	0	0						

Таблица 7.5а. Общие исходные данные

Параметр	$H_{\text{стат}}, \text{м}$	$D_1, \text{м}$	m	$K_{\Delta n} \cdot 2\theta$	k_1
Регистр	P2	P6	P8	P9	PA
Значение	102	6,3	1	23,74 или 24,45 или 25,8	2,42
				30 000 000	

Таблица 7.56. Результаты вычислений по программе СБРОС-У(1)

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	Исходные данные на шаге				n'_1 Индикатор	δ , об/мин
		a	$n'_{1\text{ож}}$	$Q'_1, \text{м}^2/\text{s}$ PD	$M'_1, \text{Н}\cdot\text{м}$ PC		
0	0	20	-92,7	-0,445	510	-	-
1	0,64						
2	1,28	19,1	-98	-0,5	550	-98,5	0,5
3	1,92						
4	2,56	18,3	-99	-0,54	600	-128,8	29,8
			-95	-0,47	525	-104,6	9,6
			-93	-0,44	510	-93,8	0,8
5	3,2						
6	3,84	17,4	-91	-0,41	490	-119	28
			-87	-0,34	400	-87	0
7	4,48						
8	5,12	16,6	-85	-0,23	340	-84,5	0,5
9	5,76						
10	6,4	1,57	-83	-0,1	280	-395	
			-82	-0,08	280	-108	26
11	7,04		-83	0,09	280	-84	1
12	7,68	14,9	-73	0,055	270	-71,8	1,2
13	8,32						
14	8,96	14	-63	0,16	330	-62,4	0,6
15	9,6						
16	10,24	13,2	-47	0,25	420	-53,1	6,1
			-50	0,22	410	-49	1
17	10,88						
18	11,52	12,3	-35	0,27	485	-38,6	3,6
			-38	0,265	470	-37,6	0,4
19	12,16						
20	12,8	11,5	-24	0,27	490	-23,3	0,7
21	13,44						
22	14,08	10,6	-10	0,26	500	-9,8	0,2
23	14,72						
24	15,36	9,8	2	0,255	490	3,2	1,2
25	16						
26	16,64	8,9	15	0,24	440	15,7	0,7

$H_1, \text{м}$	$Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_2, \text{м}^3/\text{с}$	$10^6 M^*, \text{Н}\cdot\text{м}$	n	Примечания		
						P0	P1
104	-180	-180	13,26	-150	По адресу 21 введен знак минус		
71	-167,2	-180	9,76	-131,8			
	-154,4				Первое значение в регистр P9		
62,5	-138,1	-121,8	7,97	-117,8			
59,8	-104,4	86,9	5,98	-106,8			
53,9	-67	-47,2	4,58	-98,4			
47,1	-24,5	-1,8	3,3	-92,2	По адресу 21 введен знак плюс		
57,6	16,6	34,9	3,9	-86,5			
63,8	50,7	5,26	-79		Второе значение в регистр P9		
	66,5						
77,2	76,7	7,9	-68,3				
82	95,3	9,64	-54				
97	105,6	11,9	-36,5				
105,7	106,1	13,2	-16				
104,6	103,5	12,8	5,2				
109,1	99,5	12	26		Третье значение в регистр P9		

Продолжение таблицы 7.5б

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	Исходные данные на шаге				n'_1 Индикатор	δ , об/мин
		<i>a</i>	$n'_{\text{лож}}$	$Q'_1, \text{м}^2/\text{s}$ PD	$M'_1, \text{Н}\cdot\text{м}$ PC		
27	17,28						
28	17,92	8,1	27	0,23	400	27,5	0,5
29	18,56						
30	19,2	7,2	36	0,21	340	37	1
31	19,84						
32	20,48	6,3	45	0,19	265	45,4	0,4
33	21,12						
34	21,76	5,5	50	0,16	220	51	1
35	22,4						
36	23,04	4,6	56	0,135	160	57,3	1,3
37	23,68						
38	24,32	3,8	62	0,12	120	62,9	0,9
39	24,96						
40	25,6	2,9	64	0,1	80	64,2	0,2
41	26,24						
42	26,88	2,1	68	0,085	40	67,5	0,5
43	27,52						
44	28,16	1,2	70	0,05	-50	58	12
			63	0,055	-30	63,5	0,5
45	28,8						
46	29,44	0,4	64	0,025	-30	64,8	0,8
47	30,08						
48	30,72	0	64	0	-30	63,7	0,3
49	31,46						
50	32	0	70	0	-50	71,5	1,5
51	32,6						
52	33,28	0	62	0	-30	61,7	0,3
53	33,92						

$H_1, \text{м}$	$Q_1, \text{м}^3/\text{s}$	$Q_2, \text{м}^3/\text{s}$	$10^6 M^*, \text{Н}\cdot\text{м}$	n	Примечания	
					P0	P1
107,1	94,5	92,4	10,7	45,1		
112	88,2	84,1	9,5	62,1		
112,2	79,9	75,7	7,4	76,3		
118,1	69	62,4	6,5	88		
114,3	57,3	52,2	4,6	97,3		
108,4	49,6	46,9	3,3	103,9		
113,4	42,3	37,6	2,3	108,5		
108	35,1	32,6	1,1	11,3		
122,4	24,1	15,7	-0,9	111,4		
114,4	10,6	5,5	-0,86	110		
115,3	0	-5,5	-0,86	108,5		
88,7	0	5,5	-1,1	106,9		
115,3	0	-5,5	-0,86	105,2		

К процедуре счета по программе СБРОС.У(1). 1. Одна из особенностей состоит в том, что в процессе счета в программе изменялся знак по адресу 21: до $i = 9$ сохранялся знак минус, а затем знак плюс. Первая строка $i = 10$ подсчитана при знаке минус, и при этом сбалансировать $n'_{\text{лож}}$ и n'_1 не представляется возможным (высокое значение n'_1 получается за счет резкого снижения H_1).

2. В процессе счета изменялось значение коэффициента в РА: $i = 1 \div 13$ – насосный режим (первое значение), $i = 14 \div 24$ режим противотока (второе) и $i \geq 26$ – турбинный режим (третье).

3. В ряде случаев требовалось выполнить несколько итераций, чтобы получить достаточную точность (допустимое расхождение $\delta \leq \delta_{\text{доп}}$). На шагах 4 и 10 потребовались три итерации, на 6, 16, 18, 44 – по две.

110

4. В процессе счета точки мгновенных режимов наносились на универсальную расходную характеристику (см. рис. 7.2).

5. В насосных режимах при $Q'_1 < 0$, при неправильном задании приведенного расхода подкоренное выражение для Х по (4.12) может оказаться отрицательным. В результате счет остановится с индикацией ЕГГОГ на адресе 20. Это указывает на то, что нужно ввести другое значение Q'_1 и начать счет снова.

Полученное расчетом (табл. 7.5б) изменение во времени динамического напора H_1 в сечении у насосотурбины, частоты вращения n , момента на валу M^* , расхода Q_1 и открытия направляющего аппарата a (модели), характеризующие протекание переходного процесса потери привода при работе в насосном режиме, показаны на рис. 7.4. Особенность переходного процесса потери привода – резкое изменение параметров –

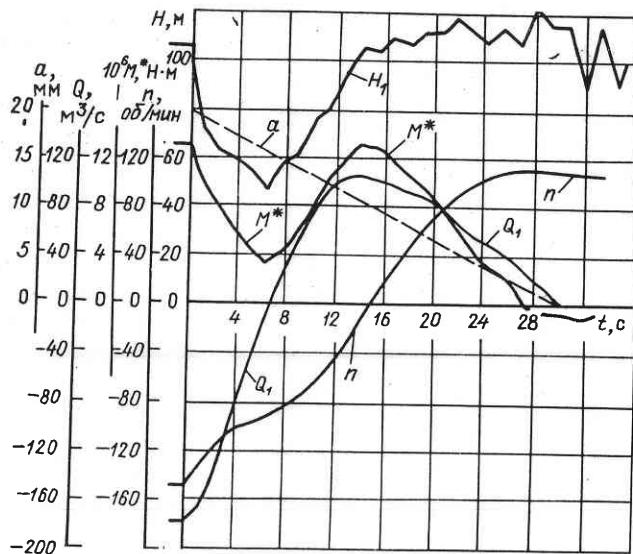


Рис. 7.4. Процесс потери привода

подтверждают результаты расчета. После отключения от сети гидроагрегата резко падает напор со 104 до 47,4 м (гидравлический удар $\Delta h = (47,4 - 102)/102 = -0,55$ при $t = 6$ с). К этому же времени резко снижается момент M^* . Наиболее характерными временными показателями являются время изменения направления расхода T_Q и направления вращения. В данном случае $T_Q = 7$ с, а $T_n = 15$ с. Поскольку осуществляется закрытие направляющего аппарата, максимальная частота вращения не достигла номинального значения и составила 111,4 об/мин при $t = 28$ с. К этому моменту достиг максимума и положительный гидравлический удар $H_{1\max} = 122,4$ м или $\Delta h = (122,4 - 102)/102 = 0,2$, что достаточно мало. После достижения полного закрытия при $t = 30$ с наблюдаются пульсации H_1 в диапазоне 115,3–88,7 м, вызванные влиянием упругости.

Глава 8

РАСЧЕТЫ КОЛЕБАНИЙ В НАПОРНЫХ СИСТЕМАХ ГЭС И ГАЭС С УРАВНИТЕЛЬНЫМИ РЕЗЕРВУАРАМИ

8.1. Содержание задачи и выбор расчетных зависимостей

Расчеты колебаний в напорных системах проводятся для определения изменений уровня в резервуарах и давления в месте их сопряжения с водоводом, в частности для нахождения соответствующих экстремальных значений. При наличии камер производится определение требуемого их объема. В некоторых случаях представляют интерес и временные показатели колебаний — время до достижения максимума или минимума уровня (давления), быстрота затухания колебаний и др. При проектировании ГЭС и ГАЭС в результате расчетного анализа требуется оптимизировать конструктивную схему и параметры уравнительного резервуара, чтобы обеспечить минимальные объемы работ и капиталовложения по всей системе при удовлетворении требований эксплуатации гидроагрегатов и гидроэлектростанций. Так как объемы работ и стоимости уравнительных резервуаров и напорных водоводов относительно большие, решение задач оптимизации является важным фактором улучшения технико-экономических показателей ГЭС и ГАЭС.

Определение колебаний в напорных водоводах с уравнительными резервуарами сводится к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений при заданных начальных условиях и возмущающем воздействии, которым, как правило, является изменение стационарного расхода во времени $Q_{ст}(t)$. При этом все геометрические размеры должны быть заданы заранее. Если требуется выполнить анализ влияния одного или нескольких факторов, связанных с конструкцией, например размера сечения резервуара, коэффициента добавочного сопротивления в сопряжении резервуара с водоводом, то выполняются расчеты для нескольких вариантов и на основании полученных данных строятся соответствующие графики.

Принципиальная схема напорного водовода с уравнительным резервуаром показана на рис. 8.1, а. Рассматриваются открытые резервуары, в которых давление над уровнем воды равно атмосферному, и оно не зависит от положения уровня z ; в закрытых резервуарах — пневматических — давление над уровнем жидкости зависит от его положения, т.е. от z . Все высотные параметры, уровень z , м, и пьезометрическая высота P , м, характеризующая давление, отчитываются от уровня бьефа (на рис. 8.1 в верховых резервуарах — от верхнего бьефа ВБ, в низовых — от нижнего НБ).

Дифференциальные уравнения, описывающие движение в системе бьеф — уравнительный резервуар (открытый) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_d}{dt} &= - \frac{gF_d}{L_d} (z + h_d + h_{ck} + h_p); \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{1}{F_p} (Q_d - Q_{ст} - Q_{доп}), \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

где h_d — гидравлические потери в деривационном напорном водоводе по длине и местные, определяемые по формуле

$$h_d = K_d Q_d |Q_d|, \quad (8.2)$$

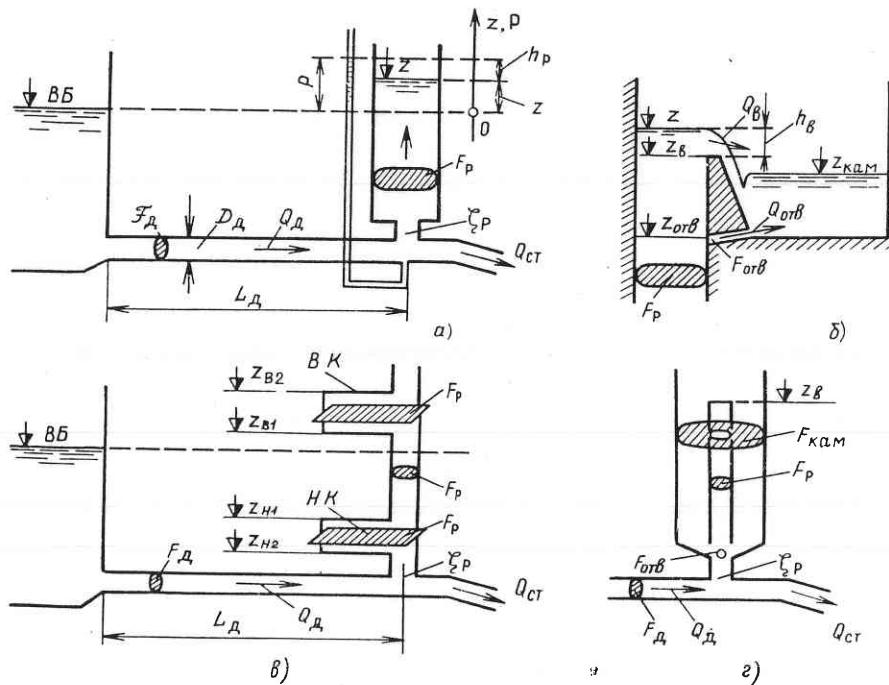


Рис. 8.1. Напорные водоводы с уравнительными резервуарами (схемы и обозначения):

а – цилиндрический резервуар; *б* – верхняя камера с водосливом; *в* – камерный; *г* – дифференциальный

причем K_d – коэффициент потерь,

$$K_d = \left(\frac{L_d}{C_d^2 R_d} + \frac{1}{2g} \sum \zeta_d \right) / F_d^2, \quad (8.3)$$

где C_d – коэффициент Шези, $m^{0,5}/c$; R_d – гидравлический радиус деривации, м; $\sum \zeta_d$ – сумма коэффициентов местных потерь в деривации, включая потери в водоприемнике.

Скоростной напор h_{ck} отнесен к скорости в деривации

$$h_{ck} = K_{ck} Q_d^2; \quad (8.4)$$

$$K_{ck} = 1/(2g F_d^2). \quad (8.4a)$$

Гидравлические потери на сопряжении между водоводом и уравнительным резервуаром h_p определяют по формуле

$$h_p = \xi_p K_{ck} (Q_d - Q_{ct}) |Q_d - Q_{ct}|, \quad (8.5)$$

где ξ_p – коэффициент местных потерь на сопряжении, отнесенный к сечению деривации F_d ; Q_d – расход деривации, m^3/c .

Стационарный расход $Q_{ct}(t)$ обычно задан и представляет собой возмущающее воздействие. Для упрощения рассматривают возмущение в виде мгновенного скачка, и тогда $Q_{ct}(t)$ определяется соотношением $Q_{ct} = Q_0$ для $t \leq 0$ и $Q_{ct} = Q_{kon}$ для $t > 0$, где Q_0 и Q_{kon} – соответственно начальный и конечный расходы.

Дополнительный расход Q_{dop} в (8.1) учитывается только в дифференциальных или камерных резервуарах с водосливом в верхней камере (рис. 8.1, *б*) в период, когда происходит течение в камере или из нее через водослив с расходом Q_b и через отверстия с расходом Q_{otv} . Кроме того, Q_{dop} может представлять собой расход, поступающий в деривацию или забираемый из нее через шахту резервуара. Расход Q_{dop} положителен, если течение направлено в стояк резервуара. Согласно этому

$$Q_{dop} = Q_b + Q_{otv}. \quad (8.6)$$

Расход водослива определяют по формуле

$$Q_b = m \sigma_p b_b \sqrt{2g} h_b^{3/2}, \quad (8.7)$$

где m – коэффициент расхода (обычно около 0,45); σ_p – коэффициент подтопления; b_b – длина водослива, м; h_b – высота переливающегося слоя воды на водосливе, м.

Расход отверстий

$$Q_{otv} = \pm F_{otv} \mu \sqrt{2g |z - z_{kam}|}, \quad (8.8)$$

где F_{otv} – суммарная площадь отверстий, m^2 ; μ – коэффициент расхода, обычно равен 0,7–0,85; z_{kam} – уровень воды в камере. Необходимо учитывать правила знаков. Расходы Q_b и Q_{otv} положительны при течении в камере.

Метод решения. Поскольку для системы (8.1) не имеется общего решения, позволяющего выразить искомые функции $z(t)$, $Q_d(t)$ и $P(t)$ в виде аналитических зависимостей, то применяют численные методы решения. Учитывая ограниченные возможности микрокалькуляторов, будем ориентироваться на наиболее простой и широко используемый при графических расчетах колебаний метод, аналогичный методу Эйлера. При этом расчеты ведутся по шагам с интервалом по времени Δt , все параметры для i -го шага находятся по определенным параметрам на предыдущем шаге $i-1$, а для первого шага $i=1$ – по заданным начальным условиям. В соответствии с этим имеем следующие соотношения:

для уровня воды в резервуаре

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_i &= \Delta t (Q_d(i-1) - Q_{cti} + Q_{dop}(i-1)) / F_p \\ \text{и} \\ z_i &= z_{i-1} + \Delta z_i; \end{aligned} \right\} \quad (8.9)$$

для расхода в деривации

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_{\text{д}i} &= -\Delta t \frac{gF_{\text{д}}}{L_{\text{д}}} (z_i + h_{\text{д}}(i-1) + h_{\text{сК}}(i-1) + h_{\text{р}}(i-1)) \\ Q_{\text{д}i} &= Q_{\text{д}}(i-1) + \Delta Q_{\text{д}i}. \end{aligned} \right\} \quad (8.10)$$

В (8.10) перепады на шаге вычисляются по формулам согласно (8.2) и (8.3):

$$h_{\Delta(i-1)} = K_{\Delta} Q_{\Delta(i-1)} |Q_{\Delta(i-1)}|; \quad (8.11)$$

$$h_{\text{cK}}(i-1) = K_{\text{cK}} Q_{\text{D}}^2(i-1); \quad (8.12)$$

потери в сопряжении резервуара с деривацией – по (8.5):

$$h_{pi} = \xi_p K_{CK} (Q_{di} - Q_{CTi}) |Q_{di} - Q_{CTi}|, \quad (8.13)$$

Пьезометрический уровень (давление) в месте сопряжения резервуара с деривацией (рис. 8.1, а)

$$P_i = z_i + h_{pi}. \quad (8.14)$$

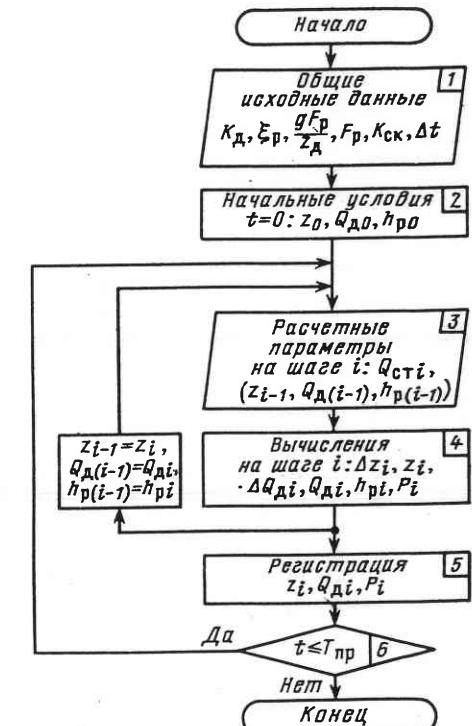
8.2. Программа УР-1 для цилиндрических и камерных резервуаров

Рассмотрим уравнительный резервуар цилиндрический (рис. 8.1, а) или камерный (рис. 8.1, в), не имеющий ни водослива, ни отверстий и для которого нет необходимости учитывать $O_{\text{дел}}$ в (8.9).

Для составления алгоритма расчетов на шаге счета Δt прежде всего нужно установить вводимые параметры. Учитывая ограниченные возможности микрокалькулятора, стремятся их число свести к минимальному. Все вводимые данные разделим на две группы: 1) общие для всего расчета или для нескольких шагов счета, т.е. K_d (8.3), ζ_p , gF_d/L_d , m^2/c^2 , F_p , m^2 , K_{ck} по (8.40) и Δt ; 2) расчетные для каждого шага счета, т.е. Q_{cti} , m^3/c , z_{i-1} , m , и $h_p(f_{i-1})$, m .

Укрупненная структурная схема программы УР-1 показана на рис. 8.2. В 1 осуществляется ввод общих исходных данных (используются регистры Р0—Р5); в 2 — ввод начальных условий и данных на шаге счета (регистры РА—РД), причем вручную вводится только $Q_{ст}$ в регистр РС, а остальные заносятся автоматически. В 3 осуществляется вычисление параметров на шаге. При этом требуемые значения для расчетов следующего шага заносятся в соответствующие регистры памяти. После окончания счета в 4 осуществляется регистрация искомых значений, и если в 5 время счета не окончено, т.е. $t < T_{пп}$, то вводятся новые данные

Рис. 8.2. Структурная схема программы УР-1 расчета цилиндрических и камерных резервуаров



в 2. Если же дальнейшего расчета процесса не требуется, то счет заканчивается.

Текст программы УР-1 приведен ниже, причем с целью облегчения ее применения и проверки над некоторыми операторами подписаны значения соответствующих параметров.

Вычисления начинаются с определения Δz_i и \dot{z}_i по (8.9) (адреса 00–08). Затем определяются ΔQ_{di} и Q_{di} по (8.10) (адреса 10–32). (Здесь сначала вводится $Q_d(i-1)$ (адрес 10), затем последовательным осуществлением операций Fx^2 и $F\sqrt{\quad}$ находится модуль $|Q_d(i-1)|$ (адреса 12 и 13.) Далее вычисляются потери $h_d(i-1)$ (адрес 16) и $h_{ск}(i-1)$ (адрес 20). Значение $h_p(i-1)$ вводится из регистра PD (адрес 22). После определения и суммирования всех четырех членов в скобках (8.10) производится умножение на gF_d/L_d (адрес 27) и на Δt (адрес 29) и смена знака (адрес 30). Полученное новое значение Q_{di} вво-

Программа УР-1

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИПВ	ИПС	-	ИП5	x	ИП3	Δz	ИПА	z	ПА
1	ИПВ	\uparrow	Fx^2	$F\sqrt{-}$	x	ИП0	h_d	ИП4	ИПВ	Fx^2
2	h_{ck}	$+/-$	h_p	ИПД	$+/-$	ИПА	$+/-$	ИП2	x	ИП5
3	ΔQ_d		Q_d				$Q_d - Q_{ct}$			x
4	ИП4	x	ИП1	x	ПД	ИПА	P	C/P		

дится в регистр РВ (адрес 33). Затем вычисляется перепад на местном сопротивлении в сопряжении резервуара с деривацией h_{pi} по (8.13) (адреса 34—43). Заключительным этапом является определение давления в месте сопряжения резервуара с деривацией P_i по (8.14) по адресам 45 и 46 и остановка — адрес 47.

Следует обратить внимание на то, что в процессе счета значения параметров в регистрах, отвечающие предыдущему шагу счета $i-1$, последовательно заменяются на новые значения, определенные на данном шаге i (соответствующие адреса 09, 33 и 44). Таким образом, при переходе на счет следующего шага нужно изменить только значение возмущающего воздействия Q_{ct} , если происходит изменение стационарного расхода. Все остальные параметры уже подготовлены для выполнения вычислений на следующем шаге. Если же стационарный расход не меняется, то после нажатия клавиш В/О и С/П автоматически осуществляется счет следующего шага.

Порядок расчетов. В режиме F ПРГ производится набор программы на калькуляторе, в режиме F АВТ вводятся общие исходные, а затем начальные значения, соответствующие $t = 0$, z_0 в регистр РА, Q_{d0} в регистр РВ, h_{d0} в регистр РД и Q_{ct1} в регистр РС к концу первого шага, после чего нажимаются клавиши В/О (возврат на нулевой адрес) и С/П. Осуществляется счет первого шага. После остановки считаются и заносятся в таблицу значения P_i — с индикатора, z_i с регистра РА и Q_{di} с регистра РВ (h_{pi} , находящееся в регистре РД, можно не вносить в таблицу; в случае какой-либо ошибки или необходимости провести повторный расчет для произвольного шага, например с другим Δt , требуемое значение $h_{pi}(i-1)$ для ввода в регистр РД можно определить по соответствующей разности $h_{pi}(i-1) = P_{i-1} - z_{i-1}$).

Применение программы УР-1 для расчета колебаний в уравнительном резервуаре рассмотрено в следующих числовых примерах.

Пример 8.1. Схема напорной деривации приведена на рис. 8.1, а. Уравнительный резервуар цилиндрический с добавочным сопротивлением. Параметры системы: $L_d = 3200$ м, $D_d = 5$ м, $F_d = 20$ м², $F_p = 60$ м², $\zeta_d = 1,5$, коэффициент шероховатости $n = 0,012$. Определить переходный процесс при закрытии турбин и уменьшении расхода от $Q_0 = 110$ м³/с до $Q_{kon} = 10$ м³/с за время $T_s = 12$ с (расход изменяется линейно во времени). Местное сопротивление $\zeta_p = 9$.

Решение. 1. Определение общих расчетных параметров: $C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1 \cdot 1,25^{1/6}}{0,012} = 86,5$; по (8.3) $K_d = \left(\frac{3200}{86,5^2} + 1,5/19,6 \right) / 20^2 = 0,00105$; по (8.4а) $K_{sk} = 1/(2 \cdot 9,8 \cdot 20^2) = 0,000127$;

$$\frac{gF_d}{L_d} \cdot 9,8 \cdot 20 / 3200 = 0,0613.$$

Общие исходные данные вводятся в соответствии с табл. 8.1а.

2. Начальные значения: $z_0 = -h_{d0} - h_{sk0} = -(0,00105 + 0,000127) \times 110^2 = -14,24$ м; $P_0 = z_0 = -14,24$ м вод. ст.

3. Результаты расчетов приведены в табл. 8.1б. Полученный расчетом переходный процесс показан на рис. 8.3. Максимальный подъем уровня 37,4 м достигается через $t = 56$ с после начала закрытия. Наибольший перепад давления на диафрагме (сопротивлении) возникает в конце закрытия и составляет $\Delta h_{dia} = 8,9 - (-1,1) = 10$ м.

Пример 8.2. Параметры напорной системы те же, что и в примере 8.1. Уравнительный резервуар камерный по схеме рис. 8.1, в; диаметр шахты 6 м, $F_p = 28$ м², отметка дна верхней камеры $z_{v1} = +10$ м, ширина камеры 6 м, длина 50 м, площадь горизонтального сечения $F_p = 6,50 \times 6,6 = 336$ м². Определить переходный процесс при закрытии турбины $Q_0 = 110$ м³/с, $Q_{kon} = 10$ м³/с, время закрытия $T_s = 10$ с (изменение

Таблица 8.1а. Общие исходные данные

Параметр	K_d	ζ_p	$\frac{gF_d}{L_d}$	F_p	K_{sk}	Δt
Регистр	P0	P1	P2	P3	P4	P5
Значение	0,00105	9	0,0613	60	0,000127	4

Таблица 8.1б. Результаты расчетов

Шаг i	Время t , с	Q_{ct}	z	P	Q_d
		PC	PA	Индикатор	PB
0	0	110	-14,24	-14,2	110
1	4	76,7	-12	-10,8	109,5
2	8	43,3	-7,6	-2,9	107,6
3	12	10	-1,1	8,9	103,3
4	16	10	4,9	23,7	96,6
5	20	10	10,9	18	89,1
6	24	10	16,2	21,9	81,1
7	28	10	20,9	25,4	72,7
8	32	10	25,1	28,4	63,9
9	36	10	28,7	31	54,9
10	40	10	31,7	33,1	45,7
11	44	10	34	34,8	36,4
12	48	10	35,8	36,1	27
13	52	10	36,9	37	17,7
14	56	10	37,4	37,4	8,4
15	60	10	37,3	37,2	-0,8
16	64	10	36,6	36,2	-9,7
17	68	10	35,3	34,4	-18,3

Примечание. При $i = 0, t = 0$ в регистре РД введен 0.

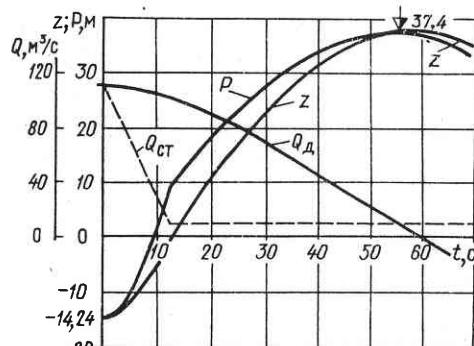


Рис. 8.3. Подъем уровня в цилиндрическом резервуаре

расхода линейное во времени), коэффициент сопротивления в сопряжении $\xi_p = 3$.

Решение. Расчетные параметры и начальные условия те же, что и в примере 8.1, общие исходные данные вводятся в соответствии с табл. 8.2а.

Начальные условия те же, что в примере 8.1. Результаты расчетов даны в табл. 8.2б.

К процедуре счета. 1. На третьем шаге $i = 3$ уровень в резервуаре поднялся выше дна камеры $z = 13,5 > 10$. Чтобы найти момент поступления воды в камеру, возвращаемся на предыдущий шаг $i = 2$, устанавливаем $\Delta t = 2$ с в регистре Р5 и повторяем счет третьего шага. Получим $z = 5,5 < 10$. Устанавливаем $\Delta t = 1,2$ с для следующего шага $i = 4$. Получим $z = 9,15 < 10$. Следующий шаг $\Delta t = 0,3$ с, $t = 11,5$ с, $z = 10$ (можно допустить отклонение $\pm 0,1$ м).

2. С $i = 6$ устанавливаем $F_p = 336 \text{ м}^2$ и $\Delta t = 2,5$ с. Далее переходим на $\Delta t = 4$ с.

Полученный расчетом переходный процесс показан на рис. 8.4. Вода начинает заполнять верхнюю камеру через 11,5 с после начала закрытия турбин. Максимальный подъем $z_{\max} = 19$ м достигается через 80 с. Объем заполнения камеры за вычетом объема стояка составляет $W_{\text{кам}} = (336 - 28) \cdot 9 = 2775 \text{ м}^3$. Давление P идет выше линии z , но нигде не превышает z_{\max} . Это указывает, что дополнительное сопротивление $\xi_p = 3$ вполне допустимо и его можно даже немного увеличить, что приведет к уменьшению объема камеры.

Таблица 8.2а. Общие исходные данные

Параметр	K_d	ξ_p	$\frac{gF_d}{L_d}$	F_p	$K_{\text{ск}}$	Δt
Регистр	P0	P1	P2	P3	P4	P5
Значения	0,00105	3	0,0613	28 и 336	0,000127	4

Таблица 8.2б. Результаты расчетов

Шаг i	Время t , с	$Q_{\text{ст}}$ $\text{м}^3/\text{с}$ PC	z , м PA	P , м Индикатор	Q_d $\text{м}^3/\text{с}$ PB	Примечания
0	0	110	-14,24	-14,24	110	$F_p = 28$
1	4	76,7	-9,5	-9,1	108,8	
2	8	43,3	-0,1	-1,35	105,4	
3	12	10	13,5	16,5	98,5	$z > 10$ повторный расчет на $i = 2$
3	10	26,6	5,5	7,7	102,7	$\Delta t = 2$
4	11,2	16,6	9,2	11,9	101	$\Delta t = 1,2$
5	11,5	14,2	10	12,2	99	$\Delta t = 0,3$
6	14	10	10,7	13,4	95,2	$\Delta t = 2,5$, $F_p = 336$
7	18	10	11,7	14,1	89	$\Delta t = 4$
8	22	10	12,6	14,7	83	
9	26	10	13,5	15,2	77,2	
10	30	10	14,3	15,7	71,6	
11	34	10	15	16,2	66,1	
12	38	10	15,7	16,7	60,7	
13	42	10	16,3	17,1	55,4	
14	46	10	16,8	17,5	50,2	
15	50	10	17,3	17,8	45,1	
16	54	10	17,7	18,1	40	
17	58	10	18,1	18,3	35	
18	62	10	18,4	18,5	30,1	
19	66	10	18,6	18,7	25,2	
20	70	10	18,8	18,8	20,4	
21	74	10	18,9	18,9	15,7	
22	78	10	19	19	10,9	
23	82	10	19	19	6,2	
24	86	10	18,9	18,9	1,6	

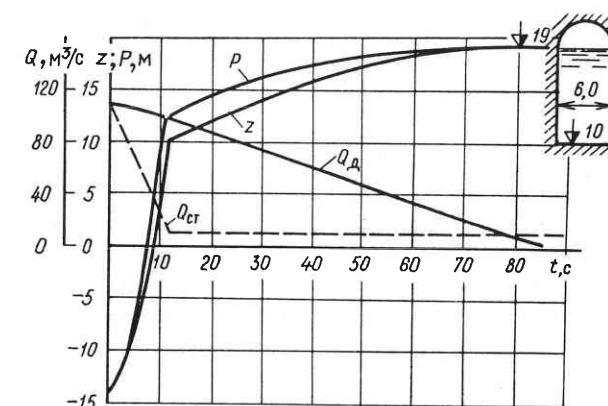


Рис. 8.4. Подъем уровня в камерном уравнительном резервуаре

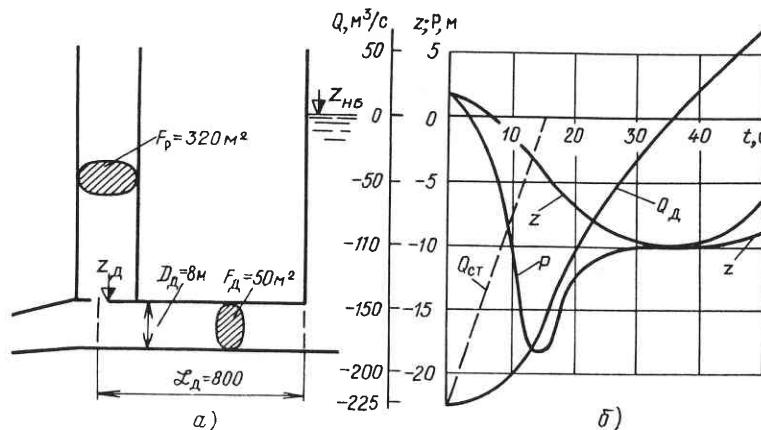


Рис. 8.5. Переходный процесс в низовом цилиндрическом уравнительном резервуаре при закрытии турбин

Пример 8.3. Схема и параметры низового напорного водовода с уравнительным резервуаром показаны на рис. 8.5, а). Коэффициент шероховатости деривации $n = 0,013$; коэффициент местных потерь $\xi_d = 1,5$; максимальный расход $Q_0 = 225 \text{ м}^3/\text{с}$, конечный расход $Q_{\text{кон}} = 0$. Определить переходный процесс при закрытии турбин и уменьшении расхода от Q_0 до $Q_{\text{кон}}$ за $T_s = 15 \text{ с}$ (расход изменяется линейно во времени) для коэффициента сопротивления в примыкании резервуара к деривации $\xi_p = 25$.

Решение 1. Общие расчетные параметры: $R = D/4 = 2 \text{ м}$; $C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1}{0,013} 2^{1/6} = 86,4$; $K_d = (800/(86,4^2 \cdot 2) + 1,5/19,6)/50 = 0,000052$; $K_{\text{ск}} = 1/(19,6 \cdot 50^2) = 0,00002$; $gF_d/L_d = 9,8 \cdot 50/800 = 0,551$. Эти данные вводятся в соответствии с табл. 8.3а.

Таблица 8.3а. Общие исходные данные

Параметр	K_d	ξ_p	$\frac{gF_d}{L_d}$	$F_p, \text{м}^2$	$K_{\text{ск}}$	Δt
Регистр	P0	P1	P2	P3	P4	P5
Значение	0,000052	25	0,551	320	0,00002	3

2. Начальные условия. С учетом правила законов $Q_0 = -225 \text{ м}^3/\text{с}$ (течение в деривации в сторону бьефа от резервуара), $z_0 = (0,000052 - 0,00002) 225^2 = 1,62 \text{ м}$, $P_0 = 1,62 \text{ м}$.

Начальные условия определены с учетом правила знаков для расхода при течении от резервуара к бьефу – расход отрицателен. Результаты расчетов даны в табл. 8.3б.

Таблица 8.3б. Результаты расчетов

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	$Q_{\text{ст}}, \text{м}^3/\text{с}$	$z, \text{м}$	$P, \text{м}$	$Q_d, \text{м}^3/\text{с}$	Примечания
		PC			Индикатор	
0	0	-225	1,62	1,62	-225	
1	3	-180	1,2	0,2	-224,3	
2	6	-135	0,4	-3,3	-220,6	
3	9	-90	-0,9	-8,1	-210,5	
4	12	-45	-2,4	-15,7	-192,2	
5	15	0	-4,2	-17,9	-165,4	
6	20	0	-6,8	-12,5	-106,5	
7	25	0	-8,5	-10,7	-65,6	
8	30	0	-9,5	-10,1	-33,9	
9	35	0	-10	-10	-4,6	
10	40	0	-10,1	-9,8	23,3	
11	45	0	-9,7	-8,5	49,3	
12	50	0	-9	-6,5	70,2	

$$\Delta t = 5 \text{ с}$$

Переходный процесс при сбросе нагрузки показан на рис. 8.5, б). Наибольшее понижение уровня в резервуаре на 10,1 м относительно отметки нижнего бьефа возникает при $t = 35 \div 40 \text{ с}$, а наибольшее понижение пьезометрического уровня $P = -17,9 \text{ м}$ – к концу закрытия при $t = 15 \text{ с}$. Важно проверить, нет ли опасности разрыва сплошности потока под диафрагмой. В качестве критерия применяют $H_{\text{вак.д}}$ вакуума, определяемого разностью:

$$H_{\text{вак.д}} = z_d - P_{\text{мин}},$$

где z_d – отметка низа диафрагмы относительно нижнего бьефа (рис. 8.5). В данном случае $H_{\text{вак.д}} = 15 + (-17,9) = 2,9 \text{ м вод.ст.}$, что считается допустимым. Опасным является вакуум $H_{\text{вак.д}} > 8 \div 8,5 \text{ м}$. В этом случае надо либо уменьшить ξ_p , либо понизить отметку заглубления деривации, т.е. увеличить $|z_d|$. Особо следует проверить сохранение сплошности течения в отсасывающей трубе (см. § 3.5).

8.3. Блок непрерывного счета

Программа УР-1 приспособлена для вычисления на одном шаге по времени, что позволяет построить весь процесс колебаний уровней воды в резервуаре. Однако при проектировании часто требуется определить только экстремальные значения уровней и давлений и иногда временных показателей. В связи с этим желательно дополнить программу блоком

Программа УР-1 с блоком Н.сч.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	Адреса 00–44 программы УР-1 ИП4 x ИП1 x ПД					ИП8 $Fx \neq 0$ 59		ИП9 ИП5		
5	+ П9 ИПВ ИПС –					или 59 БП 00		ИПД		
6	ИПА + С/П					$Fx \geq 0$				$Fx < 0$

ком, обеспечивающим осуществление непрерывного счета, что позволит еще больше снизить затраты труда и времени. Процесс подъема или опускания уровней воды в резервуаре, как видно и из приведенных примеров, можно разделить на два этапа: 1) процесс при переменном значении $Q_{ст}$ и 2) процесс, когда $Q_{ст}$ сохраняется неизменным, т.е. $Q_{ст} = Q_{кон}$.

Первый этап сравнительно кратковременный, и здесь лучше сохранить пошаговый счет, так как введение в программу $Q_{ст} = \text{var}$ потребовало бы дополнительных ячеек. На непрерывный счет (Н.сч.) можно переходить только на втором этапе.

Указание на вид счета представим в форме $Fx = 0$. При $x = 0$ – пошаговый счет, при $x = 1$ – непрерывный счет. Значения x введем в регистр Р8. Автоматическая остановка непрерывного счета должна производиться при достижении экстремального уровня в резервуаре, что определяется условием $Q_d = Q_{ст}$.

Поскольку точно выдержать это условие невозможно из-за конечности шага Δt , то примем, что счет производится, пока удовлетворено соотношение $Q_d - Q_{ст} \geq 0$ – для увеличения расхода деривации с учетом правила знаков и $Q_d - Q_{ст} < 0$ – для уменьшения расхода деривации с учетом правила знаков.

В блоке Н.сч. в регистре памяти Р9 производится накопление суммы Δt , характеризующей время процесса.

Поскольку в программу УР-1 после адреса 44 – ПД введен блок Н.сч., то пришлось предусмотреть дополнительную операцию по адресу 59 – ИПД (вызов h_p), необходимую для пошагового счета.

Использование блока Н.сч. показано на следующих числовых примерах.

Пример 8.4. Рассчитать подъем уровня для условий примера 8.1 с использованием блока Н.сч.

Решение. Исходные данные, общие и расчетные, сохраняются. Первые три интервала времени до $t = 12$ с выполняем пошаговым счетом с $\Delta t = 4$ с. Получаются те же показатели, что приведены в табл. 8.16 (первые четыре строки). Затем вводим $x = 1$ в регистр памяти Р8 и, нажимая клавиши В/О и С/П, начинаем счет. Примерно через 8 мин получаем результат, приведенный в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Результаты вычислений

Параметр	$\Sigma \Delta t$, с	z , м	Q_d , $\text{м}^3/\text{с}$	P , м
Регистр	Р9	РА	РВ	Индикатор
Значение	44	37,44	8,37	37,44

Следовательно, общее время подъема составляет $12 + 44 = 56$ с. Значения экстремумов точно совпали с пошаговым счетом.

Пример 8.5. Для условия примера 8.1 выбрать оптимальное значение местного сопротивления ξ_p из условия $P_{\max} = z_{\max}$.

Решение. С некоторым запасом примем, что расход уменьшается с 110 до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ за первый шаг счета $\Delta t = 4$ с. Используем программу УР-1 с блоком Н.сч., причем на непрерывный счет переходим со второго шага. Полученные результаты даны в табл. 8.5.

Таблица 8.5. Результаты вычислений для $\Delta t = 4$ с

ξ_p	t , с	z , м	P , м	Q_d , $\text{м}^3/\text{с}$
P1	Р9	РА	Индикатор	РВ
–	0	-14,24	-14,24	110
9	4	-7,6	3,5	108,4
9	48	37,2	37,2	8,3
15	4	-7,6	10,9	108,4
15	48	34,5	34,5	6,7
25	4	-7,6	23,2	108,4
25	48	30,8	10,8	4,9
30	4	-7,6	29,3	108,4
30	48	29,2	29,1	4,3
35	4	-7,6	35,4	108,4
35	48	27,7	27,6	3,8

Как видно из табл. 8.5, поставленному условию отвечает значение $\xi_p = 30$, при котором $z_{\max} = 29,2$ м и $P_{\max} = 29,3$ м (на первом шаге). Следует обратить внимание, что на первом шаге значение ξ_p не влияет на z и Q_d , а сказывается только на изменении пьезометрического уровня P . Этот результат того, что все изменение расхода принято за один шаг. Если изменение расхода разбить на два или большее число шагов, то к концу закрытия турбины от ξ_p будет зависеть не только P , но и z и Q_d . Общее время достижения максимального уровня одинаково для всех ξ_p и составляет в данном случае 52 с. Это подтверждает, что период колебаний уровней воды в системе практически не зависит от ξ_p .

Пример 8.6. Используя блок непрерывного счета, проверить влияние длительности шага счета на результаты.

Решение. С этой целью для условий примера 8.1 с $i = 4$ после $t = 12$ с (табл. 8.1б) введем $\Delta t = 1$ с в регистр Р5, $z = -1,1$ в регистр РА.

$Q_{\text{ст}} = 10$ в регистр РС и $h_{p12} = 8,9 - (-1,1) = 10$ в регистр РД и начинаем счет. Примерно через 20 мин получим результат, приведенный в табл. 8.6.

Таблица 8.6. Результаты вычислений при $\Delta t = 1$ с

Параметр	$\Sigma \Delta t$, с	z , м	$Q_{\text{д}}$, $\text{м}^3/\text{с}$	P , м
Регистр Значения	P9 46	PA 37,38	PB 8,41	Индикатор 37,38

Сравнивая с результатами примера 8.1, видим, что в данных условиях длительность шага счета Δt оказывает слабое влияние на результат, например по z — на 6 см.

Блок непрерывного счета может использоваться и при расчетах камерных уравнительных резервуаров. При этом переход на непрерывный счет производится тогда, когда стационарный расход достигает конечного значения и после того, как уровень превысит отметку дна верхней камеры или станет ниже верха нижней камеры.

8.4. Дифференциальные уравнительные резервуары.

Программа УР-2

Дифференциальный уравнительный резервуар (см. рис. 8.1, г) состоит из вертикальной трубы стояка F_p , диаметр которой обычно равен диаметру деривации или близок к ней по площади сечения и наружной камеры $F_{\text{кам}}$. В нижней части стояка имеются отверстия $F_{\text{отв}}$, соединяющие его с камерой. При увеличении нагрузки и открытии турбин стационарный расход $Q_{\text{ст}}$ быстро возрастает, уровень в стояке z снижается и за счет создавшейся разности уровней в камере $z_{\text{кам}}$ и стояке z вода из камеры поступает в стояк и водоводы. При закрытии турбин и уменьшении $Q_{\text{ст}}$ уровень в стояке быстро повышается, вода поступает в камеру через отверстия, а затем в верхнюю кромку стояка z_v как через водослив (см. рис. 8.1, б). Смысл такой конструкции состоит в том, что за счет быстрого понижения или повышения уровня воды в стояке соответственно изменяется давление в деривации в месте присоединения уравнительного резервуара, что повышает действующий на массу воды в деривации перепад давлений, соответственно увеличивается абсолютное значение ускорения, снижается время приближения к конечному расходу и уменьшается требуемый объем резервуара. Таким образом, эффект стояка дифференциального резервуара аналогичен эффекту добавочного сопротивления в цилиндрических резервуарах ξ_p (см. рис. 8.1, а), хотя по их гидравлическим показателям имеются некоторые отличия. В связи с этим в дифференциальных уравнительных резервуарах не ставят добавочного сопротивления или оно берется небольшим.

В правильно спроектированном дифференциальном уравнительном резервуаре при расчетном увеличении расхода станции уровень в стояке z не снижается ниже отверстий, а при уменьшении расхода станции уровень z поднимается выше кромки стояка, так что больший объем воды поступает в камеру через водослив. Объем камеры выбирается таким, чтобы максимальное ее наполнение не превышало отметку наибольшего уровня воды в стояке с учетом толщины переливающегося слоя h_v (см. рис. 8.1, б).

Из приведенного описания видно, что гидравлическая схема дифференциального резервуара значительно сложнее, чем цилиндрического, и соответственно усложняется программа расчетов колебаний. Это усложнение связано с двумя факторами: увеличением числа исходных данных и появлением различных состояний и направлений движения системы. Кроме того, добавляется необходимость учета расхода отверстий $Q_{\text{отв}}$ и водослива Q_v по формулам (8.7) и (8.8) с достаточно большим числом определяющих параметров. Расходы $Q_{\text{отв}}$ и Q_v считаются положительными при течении в камеру.

Примем следующие принципы построения алгоритма расчетов колебаний уровней воды и программы расчета для дифференциального уравнительного резервуара.

1. Программа расчета разделяется на две ветви: без перелива через кромку водослива и при наличии перелива по критерию $z > z_v$.

2. Расход отверстий на основании (8.8) определяется на шаге счета по формуле

$$Q_{\text{отв}i} = \text{sign}(z - z_{\text{кам}})_{i-1} \mu F_{\text{отв}} \sqrt{2g} \sqrt{|z - z_{\text{кам}}|}_{i-1}, \quad (8.15)$$

где $z_{\text{кам}}$ — отметка воды в камере (все отметки отсчитываются от уровня ВБ). Если в микрокалькуляторе нет оператора знака числа, то знак находится из отношения

$$\text{sign}(z - z_{\text{кам}}) = \frac{(z - z_{\text{кам}})}{|z - z_{\text{кам}}|}. \quad (8.16)$$

В качестве параметра, характеризующего отверстия, вводится

$$K_{\text{отв}} = \mu F_{\text{отв}} \sqrt{2g}, \quad (8.17)$$

учитающий коэффициент расхода μ , который обычно равен 0,7–0,85, и суммарную площадь отверстий.

3. В период, когда происходит перелив воды, через водослив проходит расход $Q_v = Q_d - Q_{\text{отв}} - Q_{\text{ст}}$; тогда отметка уровня z определяется отметкой гребня водослива z_v и толщиной переливающегося слоя (см. рис. 8.1, б и г). В соответствии с (8.7) значение h_v вычисляется по формуле

$$h_v = (Q_v/K_v)^{2/3}, \quad (8.18)$$

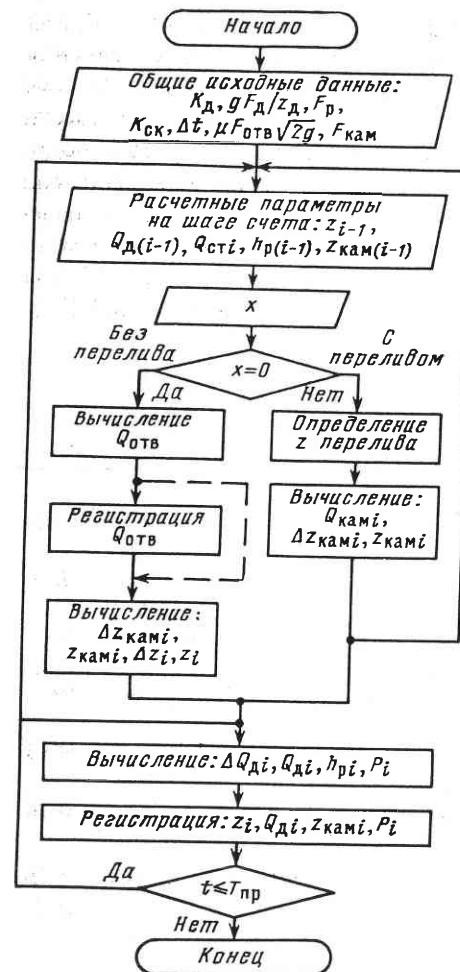


Рис. 8.6. Структурная схема программ УР-2 расчета дифференциального уравнительного резервуара

причем коэффициент водослива

$$K_B = m \sigma_B b_B \sqrt{2g}. \quad (8.19)$$

Структурная схема программы УР-2 расчета колебаний уровней воды в дифференциальном уравнительном резервуаре, основанная на описанных выше принципах и зависимостях, показана на рис. 8.6, а текст программы приведен ниже.

Общие исходные данные вводятся в соответствии с табл. 8.7а, а исходные данные на шаге счета и полученные результаты регистрируются в табл. 8.7б.

Таблица 8.7а. Общие исходные данные

Параметр	K_D	z_B , м	$\frac{gF_D}{L_D}$	F_p , m^2	K_{SK}	Δt , с	0 или K_B	K_{OTB}	F_{KAM}
Регистр	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P8	P9

Таблица 8.7б. Результаты вычислений

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	Q_{ST} , m^3/c	z , м	P , м	Q_D , m^3/c	z_{KAM} , м	Q_{OTB} , m^3/c	Примечания
		PC	PA	Индикатор	PB	P7	Индикатор	

К программе УР-2. 1. Как видно из табл. 8.7а и 8.7б, для ввода исходных данных общих и на шаге счета, а также для хранения результатов счета, вводимых на следующем шаге, использованы все 14 регистров памяти. В связи с этим оказалось необходимым ввести значение коэффициента сопротивления сопряжения резервуара с водоводом ξ_p непосредственно в программу (адрес 90), а так как выделена всего одна ячейка, то ξ_p могут принимать только целочисленные значения от 1 до 9, что удовлетворяет требованиям проектирования (в микрокалькуляторах "Электроника МК-61" и "Электроника МК-52" для ввода ξ_p можно использовать РЕ, тогда в адрес 91 нужно вписать ИПЕ).

Программа УР-2

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИПА	ИП7	$z - z_{KAM}$	↑	Fx^2	$F\sqrt{\quad}$:	FBx	$F\sqrt{\quad}$
1	x	Q_{OTB}	C/P					Q_B	
2	x	или	↑	/-	ИПВ	+ Δz	ИПС	- z	ИП6
3	KNOP				ИП5	x	ИП3		ПА
4	$Fx=0$	40	FQ						
5	→	ИП5	x	ИП9	Δz_{KAM}	z_{KAM}	ИП7	+ z	БП 59
6	Q_B/K_B								
7	:	Fx^2	3	$F1/x$	→	Fx^y	ИП1	+ Δz_{KAM}	ПА ИПВ
8	ИПС	–	ИП5	x	ИП9	z_{KAM}	ИП7	+ z	ИПВ
9	↑	Fx^2	$F\sqrt{\quad}$	x	ИП0	h_d	ИПА	+ ΔQ_d	ИП4
		h_{SK}							
		x							
		+			ИПД	+ h_d	ИП2	x	ИП5
		Q_d							/-
		+							
		ПВ			ИПС	– h_d	↑	Fx^2	ИП4
								$F\sqrt{\quad}$	
					ПД	ИПА	+	C/P	

2. Вся программа подразделяется на четыре блока. В первом блоке вычисляются Q_{OTB} и Q_B (адреса 00–17). Если представляют интерес изменение Q_{OTB} , то по адресу 12 ставится оператор С/П. Тогда счет останавливается, а после регистрации Q_{OTB} нажатием клавиши С/П пускается дальше. Если же этого не требуется, то в адрес 12 вводится оператор КНОП, и счет будет продолжен без остановки.

3. Далее программа разветвляется. Если процесс идет без перелива через водослив $z < z_B$, то в регистр P6 введен 0 и счет направляется в блок 2 (адреса 22–36), где вычисляются значения уровня воды в стояке z (адрес 28) и уровня воды в камере z_{KAM} (адрес 36). Затем счет

переводится в блок 4 (адреса 59–95), где вычисляются значения потерь h_d (адрес 65), расхода Q_d (адрес 80) и местных потерь в сопряжении резервуара h_p (адрес 92) и давление P (адрес 95).

4. Когда происходит перелив через водослив ($z > z_b$), то в регистр Р6 вводится значение K_b по (8.19), причем $\sigma_n = 1$ (учет подтопления может потребоваться тогда, когда $z_{\text{кам}} > z_b$), и оператором $Fx = 0$ (адрес 20) счет направляется на адрес 40, т.е. в блок 3 (адреса 39–57). Здесь определяют значения переливающегося слоя на водосливе h_b (адрес 45), уровня воды z (адрес 47) и уровня воды в камере $z_{\text{кам}}$ (адрес 57). Далее счет направляется в блок 4 (см. п. 3).

Практическое использование программы УР-2 рассмотрено на числовых примерах.

Пример 8.7. Напорный деривационный водовод (см. пример 8.1). Уравнительный резервуар дифференциальный (см. рис. 8.1, б), имеет параметры: $F_p = 20 \text{ м}^2$, $F_{\text{кам}} = 180 \text{ м}^2$, $F_{\text{отв}} = 5 \text{ м}^2$, $\xi_p = 2$. Рассчитать процесс понижения уровня при увеличении станционного расхода $Q_{\text{ст}}$ линейно по времени от 50 до $110 \text{ м}^3/\text{с}$ за 8 с.

Решение. По (8.22) определяем $K_{\text{отв}} = 0,75\sqrt{2g} = 15,5$. Общие исходные данные вводятся в соответствии с табл. 8.8а.

Начальные условия: $z_0 = -(0,00105 + 0,000123) \cdot 50^2 = -2,9 \text{ м}$. Результаты вычислений приведены в табл. 8.8б, а для выявления условий работы отверстий зарегистрировались и значения $Q_{\text{отв}}$.

Полученный расчетом переходный процесс представлен на рис. 8.7. Минимальное положение уровня в стояке $z_{\text{мин}} = -18,1 \text{ м}$, а в камере $z_{\text{мин,кам}} = -18,2 \text{ м}$. В данном случае сечения камеры и отверстий полностью сбалансированы. Время процесса разгона воды в деривации определяется условием $Q_d = Q_{\text{ст}}$. Максимальный расход отверстий соответствует начальному периоду быстрого снижения z , $Q_{\text{отв, макс}} = 49 \text{ м}^3/\text{с}$.

Здесь весь расчет проведен при $\Delta t = 4 \text{ с}$. Однако для сокращения времени можно после первых четырех–шести шагов, когда уже $Q_{\text{ст}} = \text{const}$, перейти на больший шаг, например $\Delta t = 10 \text{ с}$, что не приведет к серьезной погрешности.

Пример 8.8. Для условий примера 8.7 рассчитать подъем уровня при сбросе нагрузки и уменьшении станционного расхода $Q_{\text{ст}}$ с 110 до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ за 12 с. Отметка кромки стояка $z_b = 10 \text{ м}$.

Таблица 8.8а. Общие исходные данные

Параметр	K_d	z_b	$\frac{gF_d}{L_d}$	$F_p, \text{м}^2$	$K_{\text{ск}}$	$\Delta t, \text{с}$	K_b	$K_{\text{отв}}$	$F_{\text{кам}}$
Регистр	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P8	P9
Значение	0,00105	10	0,0613	20	0,000127	4	—	15,5	180

Таблица 8.8б. Результаты вычислений ($x = 0, P_6$)

Шаг <i>i</i>	Время <i>t, с</i>	$Q_{\text{ст}}, \text{м}^3/\text{с}$		$z, \text{м}$	$P, \text{м}$	$Q_d, \text{м}^3/\text{с}$		$z_{\text{кам}}, \text{м}$	$Q_{\text{отв}}, \text{м}^3/\text{с}$	
		PC	PA			Индикатор	PB		P7	Индикатор
0	0	50		-2,9	-2,9	50		-2,8999	0	
1	4	80		-8,9	-9,1	51,5		-2,9	-0,1	
2	8	110		-13	-13,8	53,9		-3,7	-38	
3	12	110		-14,8	-15,5	56,9		-4,8	-47,2	
4	16	110		-15,6	-16,2	60		-5,9	-49	
5	20	110		-15,9	-16,5	63		-6,9	-48,3	
6	24	110		-16	-16,5	65,9		-8	-46,5	
7	28	110		-16,1	-16,5	68,7		-9	-44	
8	32	110		-16,1	-16,4	71,4		-9,9	-41,3	
9	36	110		-16,1	-16,4	74		-10,7	-38,5	
10	40	110		-16,1	-16,4	76,4		-11,5	-35,8	
11	44	110		-16,2	-16,4	78,8		-12,3	-33,2	
12	48	110		-16,3	-16,5	81		-13	-30,7	
13	52	110		-16,4	-16,6	83,2		-13,6	-28,3	
14	56	110		-16,5	-16,7	85,3		-14,2	-26,1	
15	60	110		-16,7	-16,8	87,4		-14,7	-24	
16	64	110		-16,8	-16,9	89,3		-15,2	-21,9	
17	68	110		-17	-17,1	91,2		-15,6	-19,9	
18	72	110		-17,1	-17,2	93		-16	-18,1	
19	76	110		-17,3	-17,3	94,8		-16,4	-16,3	
20	80	110		-17,4	-17,4	96,5		-16,7	-14,5	
21	84	110		-17,5	-17,6	98,1		-17	-12,9	
22	88	110		-17,6	-17,7	99,7		-17,2	-11,3	
23	92	110		-17,8	-17,8	101,1		-17,5	-9,8	
24	96	110		-17,9	-17,9	102,6		-17,7	-8,4	
25	100	110		-17,9	-18	103,9		-17,8	-7	
26	104	110		-18	-18	105,3		-18	-5,7	
27	108	110		-18,1	-18,1	106,5		-18	-4,4	
28	112	110		-18,1	-18,1	107,7		-18	-3,3	
29	116	110		-18,1	-18,1	108,8		-18,2	-2,2	

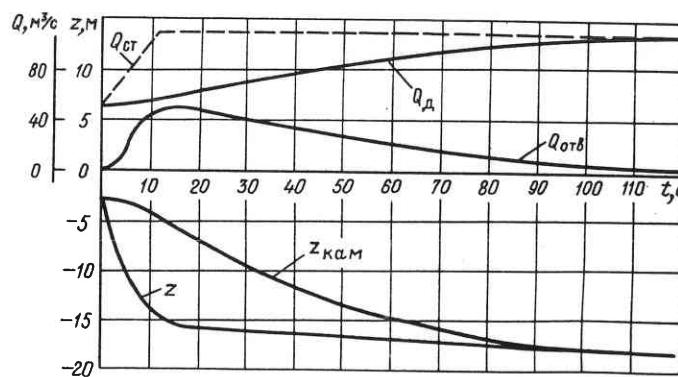


Рис. 8.7. Переходный процесс в дифференциальном уравнительном резервуаре при увеличении расхода

Таблица 8.9. Результаты вычислений ($x = 0$, Р6)

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	$Q_{ст}, \text{м}^3/\text{с}$		$z, \text{м}$	$P, \text{м}$		$Q_{д}, \text{м}^3/\text{с}$		$z_{кам}, \text{м}$	$Q_{отв}, \text{м}^3/\text{с}$		Приме- чания
		РС	РА		Индика- тор	РВ	Р7	Индика- тор		Р7	Индика- тор	
0	0	110	-14,24	-14,24	110	-14,2399	0					
1	4	76,7	-7,5	-7,3	108,4	-14,24	-0,15					
2	8	43,3	-2,6	-1,6	105,5	-13,4	40,1					
3	12	10	6,4	8,4	100,5	-12,2	50,9					
4	16	10	11,1	12,9	94,4	-10,7	66,8	$\Delta t = 1,5 \text{ с}$				
4	15,5	10	10,5	12,4	95,3	-10,9	66,8	$\Delta t = 3,5 \text{ с}$				
5	19	10	10,6	12,2	90,3	-9,2	71,8	$x = 31,28$				
								P6				
6	22,5	10	10,5	12	85,6	-7,7	69					
7	26	10	10,5	11,7	81,2	-6,2	66,1					
8	29,5	10	10,4	11,5	77,1	-4,8	63,3					
9	32	10	10,4	11,4	73,1	-3,5	60,5					
10	40	10	10,3	11,1	64,5	-0,7	57,7	$\Delta t = 8 \text{ с}$				
11	48	10	10,2	10,8	56,7	1,7	51,5					
12	56	10	10,1	10,5	49,6	3,8	45,2					
13	64	10	10,1	10,3	43	5,5	39,1					
14	72	10	10	10,2	36,9	7	33					
15	80	10	10	10,1	31,1	8,2	26,9					
16	88	10	10	10,1	25,6	9,1	20,8					
17	96	10	10,1	10,1	20,2	9,8	14,7					
18	104	10	10,2	10,2	15	10,3	7,9					
19	112	10	10,5	10,5	9,7	10,5	-5,1					

Решение. Общие исходные данные приведены в табл. 8.8а. Начальные условия: $z_0 = -(0,00105 + 0,00127) \cdot 110^2 = -14,24 \text{ м}$. Параметры водослива: $b_v = \pi D = 15,7 \text{ м}$, $m = 0,45$ – течение снизу, $\sigma_p = 1$ (подтопления нет). По (8.19) $K_v = 0,45 \cdot 15,7 \sqrt{2g} = 31,28$.

Результаты расчетов по программе УР-1 приведены в табл. 8.9.

Полученный расчетом процесс подъема уровня показан на рис. 8.8.

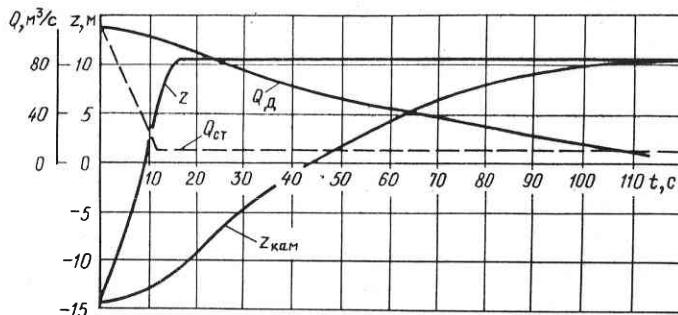


Рис. 8.8. Переходный процесс в дифференциальном уравнительном резервуаре при уменьшении расхода

Максимальный уровень в стояке $z = 10,6 \text{ м}$ и наибольший слой на водосливе $h_v = z - z_v = 0,6 \text{ м}$ соответствуют началу перелива $t = 19 \text{ с}$. Наивысший уровень в камере $z_{кам} = 10,5 \text{ м}$ достигается к моменту, когда $Q_d = Q_{ст}$. В данном случае объем камеры сбалансирован и наибольший подъем уровня в камере и стояке практически одинаковы.

К процедуре счета примеров 8.7 и 8.8. 1. На первом шаге $z - z_{кам} = 0$, а поскольку дальше следует извлечение корня из этой разности, то в силу точности округления она может оказаться отрицательной, что приведет к остановке счета (на индикаторе ЕГГОГ). Чтобы этого избежать, начальные значения z и $z_{кам}$ вводятся с небольшим расхождением (в данном примере на $0,0001 \text{ м}$), не влияющим на результаты.

2. Пока процесс идет без перелива, в Р6 введен 0 (весь счет примера 8.7 и до $t = 15,5 \text{ с}$ см. в примере 8.8). Когда идет перелив $z > z_v$, в регистр Р6 вводится $K_v = 31,28$.

3. При закрытии турбин (табл. 8.9) счет шел с интервалом $\Delta t = 4 \text{ с}$, но на четвертом шаге при $t = 16 \text{ с} z = 11,1 > z_v = 10$. Чтобы приблизиться к этому, значению (точное равенство не требуется), возвращаемся на третий шаг и повторяем счет $\Delta t = 3,5 \text{ с}$. При возврате не забывать, что кроме значений параметров, включенных в таблицу, нужно вводить и значение $h_p = P - z$ (может также заноситься в таблицу по РД).

4. Важным фактором является устойчивость решения, характеризующаяся плавностью изменения получаемых расчетом параметров. Таковы данные таблиц 8.8б и 8.9. Однако если расчет понижения уровня (табл. 8.8б) продолжить, то получим результаты, приведенные в табл. 8.10. Они явно показывают, что решение неустойчиво (расходящиеся колебания по шагам значений z , $Q_{отв}$ и др.). Это недостаток примененного численного метода решения, проявляющийся при стабилизации процесса. Поскольку использовать более совершенные методы, например метод Рунге–Кутта, для микрокалькулятора затруднительно и это не оправдывается обеспечением требуемой точности определения экстремальных значений, то практические рекомендации сводятся к следующему. При определении понижения уровня расчет заканчивать до достижения точки экстремума, когда $Q_d = (0,95 \div 0,97)Q_{ст}$, как это сделано в табл. 8.8б, что практически обеспечивает нахождение искомых значений z и $z_{кам}$.

Таблица 8.10. Результаты вычислений

Шаг <i>i</i>	Время <i>t</i> , с	$Q_{ст}, \text{м}^3/\text{с}$		$z, \text{м}$	$P, \text{м}$		$Q_{д}, \text{м}^3/\text{с}$		$z_{кам}, \text{м}$	$Q_{отв}, \text{м}^3/\text{с}$		Индикатор
		РС	РА		Индикатор	РВ	Р7	Индикатор		Р7	Индикатор	
30	120	110	-18,4	-18,4	110	-18,4	110	-18,2	-18,2	1,3		
31	124	110	-16,9	16,9	110,5	-16,9	110,5	-18,3	-18,3	-7,6		
32	128	110	-20,5	-20,5	112	-20,5	112	-17,9	-17,9	18,5		
34	132	110	-15,5	-15,5	112,1	-15,5	112,1	-18,5	-18,5	-24,9		

Если же требуется продолжить расчет процесса далее, то нужно ввести дополнительные упрощения для снижения порядка системы. Это можно сделать, исключив из учета емкость стояка, которая, как правило, невелика по сравнению с емкостью камеры. При этом площадь камеры принимается равной сумме $F_p + F_{\text{кам}}$ (Р8), расход камеры оказывается равным $Q_d - Q_{\text{ст}}$, а уровень в стояке z определяется

$$z = z_{\text{кам}} \pm \left(\frac{Q_d - Q_{\text{ст}}}{K_{\text{отв}}} \right). \quad (8.20)$$

Здесь знак плюс берется для периода подъема уровня, а минус – для периода опускания. При этом в программу УР-2 вводится следующий блок стабилизации, занимающий адреса 09–18.

Блок стабилизации к программе УР-2

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1							–	КНОП		
2	ИПВ	ИПС	–	ИП8	Fx^2	ИП7	↔	или	ПЛ	–

Использование программы УР-2 для камерного резервуара с водосливом. В камерном уравнительном резервуаре с водосливом верхняя часть работает как дифференциальный резервуар (см. рис. 8.1, б), и для ее расчета может быть использована программа УР-2. В начальный период подъема уровня резервуар работает как цилиндрический площадью F_p . При этом параметр отверстий $K_{\text{отв}}$ по (8.22) принимают $K_{\text{отв}} = 0$ (Р8). Когда уровень z достигает отметки дна и отверстий $z_{\text{отв}}$, включается дифференциальная часть, соответственно устанавливаются фактические значения $K_{\text{отв}}$ и $z_{\text{кам}} = z_{\text{отв}}$ и расчет продолжается с учетом расхода отверстий $Q_{\text{отв}}$. Далее, если уровень превысит отметку гребня водослива z_b , т.е. $z = z_b + h_b$, программа переключается на работу с переливом $x = K_b$ (Р6). Расчет ведется до достижения максимума $z_{\text{кам}}$ и $Q_d \approx Q_{\text{ст}}$.

8.5. Блок непрерывного счета к программе УР-2

Для выбора конструктивных параметров резервуара, отметки водослива z_b , площади камеры $F_{\text{кам}}$, площади отверстий и др. требуется определение экстремальных значений z и $z_{\text{кам}}$. При этом нет необходимости регистрировать весь переходный процесс, а можно использовать блок непрерывного счета к программе УР-2. Переход на непрерывный счет осуществляется после того, как стационарный расход $Q_{\text{ст}}$ достигнет конечного значения и при подъеме уровня в стояке значение z превы-

сит отметку водослива z_b . Особенность дифференциального уравнительного резервуара состоит в том, что блок непрерывного счета вписывается в программу УР-2 при уменьшении и увеличении $Q_{\text{ст}}$ по-разному.

При уменьшении стационарного расхода блок 1 непрерывного счета, приведенный ниже, занимает только 5 адресов.

Блок 1 непрерывного счета к программе УР-2

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9					$Fx \geq 0$	98	БП	00	С/П

Здесь критерием для окончания счета служит изменение знака h_p (при $Q_d - Q_{\text{ст}} < 0, h_p < 0$ срабатывает переход на адрес 98 С/П).

Пример 8.9. Рассчитать подъем уровня для условий примера 8.8.

Решение. Все исходные данные и начальный этап счета до $z > z_b$, $t = 15,5$ с сохраняются по табл. 8.9. Затем вводится в программу УР-2 блок 1 непрерывного счета, устанавливается $\Delta t = 8$ с в Р5 и клавишей С/П пускается счет. Через 5 мин получаем результат (табл. 8.11).

Таблица 8.11. Результаты вычислений

$Q_{\text{ст}}, \text{м}^3/\text{с}$	$z, \text{м}$	$Q_d, \text{м}^3/\text{с}$	$z_{\text{кам}}, \text{м}$
РС	РА	РВ	Р7
10	10,2	5,17	10,5

Значения искомых параметров совпадают с данными табл. 8.9.

При увеличении стационарного расхода требуется учесть следующие две особенности. 1. Чтобы исключить воздействие неустойчивости решения (см. п. 4), счет должен быть завершен при $Q_d = (0,95 \div 0,97) Q_{\text{ст}}$. 2. В зависимости от соотношения параметров наибольшее понижение уровня в стояке z может возникать и до того, как будет достигнуто примерное равенство Q_d и $Q_{\text{ст}}$. Для осуществления этих условий нужны дополнительные ячейки программной памяти, а в программе УР-2 они почти полностью использованы. Данная задача может быть решена, если из программы УР-2 исключить блок 3 (адреса 38–58) для определения слоя перелива h_b , который для процесса понижения уровня не нужен, а освободившиеся ячейки использовать для введения блока 11 непрерывного счета. Но поскольку общая программа сильно меняется, то ниже она приведена полностью.

Данная программа является универсальной, так как позволяет выполнить пошаговый [в адресах: 12 (С/П); 28, 29, 77 (С/П)] или непрерывный счет [в адресах: 12 (КНОП); 28, 91; 77 (КНОП)]. Непрерывный счет идет следующим порядком. После первой остановки проверяется значе-

ние Q_d (PB). Если $Q_d \approx Q_{ст}$, то предельные значения z и $z_{кам}$ соответствуют моменту стабилизации. Если же $Q_d < Q_{ст}$, то с регистра P7 регистрируется значение уровня z (возможный минимум), возвращаются в режим программирования F ПРГ на адрес 27, вводятся операторы $Fx < 0$ и 29, возвращаются в режим F АВТ, нажимают клавишу С/П и продолжают счет до второй остановки, когда $Q_d \approx Q_{ст}$.

Пример 8.10. Определить экстремальные значения переменных для условий примера 8.7.

Программа УР-2 с блоком 11 непрерывного счета

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	ИПА	ИП7	—	↑	Fx^2	$F\sqrt{\quad}$:	FBx	$F\sqrt{\quad}$	ИП8
1	$Q_{отв}$	C/P							Q_B	
x	x	или	↑	/-	ИПВ	+	ИПС	—		ИП6
		КНОП				Δz		29		
2	$Fx=0$	40	F	○	ИП5	x	ИП3	:	$Fx < 0$	или
									91	
3	z					$\Delta z_{кам}$		$z_{кам}$		
4	+	ПА	→	ИП5	x	ИП9	:	ИП7	+	П7
		↑	Fx^2	$F\sqrt{\quad}$	x	ИП0	x	ИПА	+	ИП4
5	ИПВ	Fx^2	x	+	ИПД	+	ИП2	x	ИП5	x
6	ΔQ_d	Q_d								
7	/-	ИПВ	+	ПВ	ИПС	—	↑	Fx^2	$F\sqrt{\quad}$	x
								P	C/P	
8	ИП4	x	ξ_p	x	ПД	ИПА	+	или	0	
9	9	6	ИПС	x	/-	ИПВ	+	$Fx < 0$	91	БП
9	00	C/P								

Решение. Вводим программу УР-2 с блоком 11 непрерывного счета. Первые два шага выполняем пошаговым счетом. Результат тот же, что в табл. 8.9б. Далее переходим на непрерывный счет, сначала по адресу 28 введено 91, а затем 29. Полученный результат — см. табл. 8.12. Первая остановка связана с местной задержкой снижения z (видно и в табл. 8.9б), а минимум z и $z_{кам}$ определяет вторая остановка.

Таблица 8.12. Результаты вычислений

Операция	$Q_{ст}, \text{м}^3/\text{с}$		$Q_d, \text{м}^3/\text{с}$		$z_{кам}, \text{м}$
	PC	PA	PB	P7	
1-я остановка	110	-16,04	68,7	-8,9	
2-я остановка	110	-18,1	106,4	-18	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих гидроэлектростанций. М.: Энергия, 1977.
- Аршеневский Н.Н., Поспелов Б.Б. Переходные процессы крупных насосных станций. М.: Энергия, 1980.
- Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И. Решение гидроэнергетических задач на ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- Волков Е.А. Численные методы. М.: Наука, 1982.
- Гидромеханические переходные процессы в гидроэнергетических установках/ Под ред. Г.И. Кривченко. М.: Энергия, 1975.
- Гидроэлектрические станции/ Под ред. В.Я. Карелина, Г.И. Кривченко. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- Гидроэнергетические установки/ Под. ред. Д.С. Шавелева. М.: Энергоиздат, 1981.
- Гидроэнергетические и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций: Справочное пособие: В 2 т. / Под ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Шавелева. — Т. 1. Основное оборудование гидроэлектростанций. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Дьяконов В.П. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. М.: Наука, 1986.
- Кривченко Г.И. Гидравлические машины. Турбины и насосы. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- Орлов В.А. Уравнительные резервуары гидроэлектростанций. М.: Энергия, 1968.
- Руководство по проектированию гидротехнических туннелей/ Гидропроект. М.: Стройиздат, 1982.
- Справочник по гидротурбинам/ Под ред. Н.Н. Ковалева. Л.: Машиностроение, 1984.
- Справочник по гидравлическим расчетам/ Под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1972.
- Трохименко Я.К., Любич Ф.Д. Инженерные расчеты на программируемых микрокалькуляторах. Киев: Техника, 1985.
- Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. М.: Энергоиздат, 1981.
- Цветков А.Н., Епачников В.А. Прикладные программы для микро-ЭВМ "Электроника Б3-34", "Электроника МК-56" и "Электроника МК-54". М.: Финансы и статистика, 1984.
- Чапка А.М. Расчетно-проектировочные работы на программируемых микрокалькуляторах. М.: Машиностроение, 1988.
- Behkō G. Calculation of Kaplan turbine transients using algebraically described turbine characteristics// Symp. Hydraul. Mach. Energy Relat. Ind., Stirling, Glasgow, 1984. Aug. 27–30.
- Karasek P., Zauner E. Governing turbines by microcomputers// Int. Water Power and Dam Constructions, 1982. Sept.
- Wylie E.B. The microcomputer and pipeline transients// ASCE. Journ. of Hydraulic Engineering. 1983. № 12.