

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ .....	7
ГЛАВА 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	9
ГЛАВА 3. ЖЕСТКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА .....	11
3.1. Общие положения .....	11
3.2. Вывод формулы расчета гидравлического удара в подводящем водоводе .....	11
3.3. Вывод формулы расчета гидравлического удара в отводящем водоводе .....	12
3.4. Анализ формулы расчета гидравлического удара по жесткой модели .....	12
3.5. Постоянная инерции напорного водовода .....	13
3.6. Область применения жесткой модели гидроудара .....	14
ГЛАВА 4. УПРУГАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА .....	15
4.1. Общие положения .....	15
4.2. Расчет скорости распространения волны гидравлического удара .....	15
4.3. Вывод формулы расчета гидравлического удара при мгновенном изменении скорости в водоводе ..	17
4.4. Вывод уравнений для расчета гидравлического удара при немгновенном изменении скорости в водоводе .....	17
4.4.1. Вывод динамического уравнения из общего уравнения равновесия сплошной среды .....	17
4.4.2. Вывод динамического уравнения из теоремы изменения количества движения .....	19
4.4.3. Вывод уравнения неразрывности .....	20
4.5. Решение уравнений для расчета гидравлического удара методом характеристик .....	21
4.6. Цепные уравнения гидравлического удара .....	22
4.7. Решение уравнений для расчета гидравлического удара с использованием волновых функций .....	23
4.7.1. Расчет гидравлического удара при быстром закрытии водовода .....	24
4.7.2. Расчет гидравлического удара при медленном закрытии водовода .....	27
4.7.3. Переход от волновых функций к цепным уравнениям гидравлического удара .....	28
ГЛАВА 5. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАСЧЕТАХ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА .....	30
5.1. Простейшее граничное условие для расчета расхода турбины .....	30
5.2. Граничное условие, учитывающее характеристику турбины .....	30
ГЛАВА 6. РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА С УЧЕТОМ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ .....	33
6.1. Аналитический расчет гидравлического удара по жесткой модели с использованием простейшего граничного условия .....	33
6.2. Графо-аналитический расчет гидравлического удара по жесткой модели с использованием граничного условия, учитывающего характеристику турбины .....	33
6.3. Графо-аналитический расчет гидравлического удара по упругой модели .....	35
6.3.1. Расчет для закрытия турбины .....	36
6.3.2. Расчет для открытия турбины .....	37
6.4. Особенности расчета гидравлического удара в разветвленных водоводах .....	37
6.5. Особенности расчета гидравлического удара в схемах с длинным отводящим водоводом .....	38
6.6. Численные расчеты гидравлического удара .....	40
ГЛАВА 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ХОДА ГИДРОАГРЕГАТА ПРИ СБРОСАХ НАГРУЗКИ .....	42
7.1. Уравнение вращения гидроагрегата .....	42
7.2. Уравнение вращения в относительных параметрах. Постоянная инерции гидроагрегата .....	42
7.3. Простейшее граничное условие для изменения вращающего момента турбины .....	43
7.4. Граничное условие, учитывающее характеристику гидротурбины .....	44
7.5. Аналитический расчет временной неравномерности с использованием простейшего граничного условия .....	46

7.6. Графо-аналитический расчет временной неравномерности с учетом характеристики гидротурбины.....	46
ГЛАВА 8. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ СОВМЕСТНОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА И ВРАЩЕНИЯ ГИДРОАГРЕГАТА.....	48
8.1. Расчет переходного процесса с учетом граничных условий в узле гидроагрегата.....	48
8.2. Расчет переходного процесса на участках напорного водовода.....	49
ГЛАВА 9. УСЛОВИЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЭС.....	51
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	53
ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	54
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	55
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	56

## ВВЕДЕНИЕ

Переходные процессы на гидроэлектростанциях (ГЭС) возникают при регулировании гидроагрегатов и характеризуются изменением во времени параметров режима их работы: расхода, напора, мощности. Эти процессы сопровождаются неустановившимся режимом течения, при этом в напорных водоводах возникает гидроудар, а в безнапорных — волны. Повышенные нагрузки на сооружение и оборудование при переходных процессах следует учитывать при проектировании и эксплуатации.

Термином **«гидравлический удар»** («гидроудар») обозначается гидродинамическое изменение давления в напорном водоводе при переходных процессах. Положительный гидроудар соответствует увеличению давления, отрицательный — уменьшению.

Значения повышенных нагрузок, связанных с положительным гидроударом, необходимо знать для расчетов водоводов на прочность, с отрицательным гидроударом — для ограничения создаваемого вакуума допустимым значением, чтобы предотвратить разрыв сплошности потока и последующий обратный гидроудар большой величины.

Основной объем расчетов переходных процессов выполняется на стадии проектирования ГЭС. Расчеты выполняются независимо проектной организацией (или по ее заказу) и турбинным заводом. На основании полученных результатов проектная организация выполняет:

- выбор трассы и длины напорных подводящих и отводящих водоводов;
- реализацию мероприятий по уменьшению гидроудара (установка уравнительных резервуаров и холостых выпусков);
- расчеты водоводов на прочность.

Турбинный завод производит определение гарантий регулирования гидротурбин, которые при сбросе максимальной нагрузки определяются с учетом характеристик поставляемых на ГЭС турбин, гидрогенераторов и для принятой проектной организацией схемы напорных водоводов.

Гарантии регулирования гидротурбин включают в себя следующие характеристики:

- скорость (время) закрытия турбин;
- максимальное значение гидроудара;
- максимальное значение вакуума по трассе;
- максимальное повышение частоты вращения агрегата.

На результатах расчетов переходных процессов базируются важные проектные решения, касающиеся сооружений и оборудования ГЭС. Проверка полученных в результате расчетов экстремумов переходных процессов выполняется при пусковых натурных испытаниях гидроагрегатов ГЭС, в ходе которых воспроизводятся наиболее тяжелые условия протекания переходных процессов, принимавшиеся при выполнении расчетов.

Расчеты переходных процессов требуют детального учета неустановившегося движения в напорных водоводах, характеристик гидротурбин (зависимости расхода и гидравлического вращающего момента от открытия, частоты вращения и напора), инерционных характеристик вращающихся частей агрегата. Наиболее точные результаты получаются при численном моделировании с использованием специальных компьютерных программ.

В предлагаемом учебном пособии представлен материал по формированию исходных данных и самостоятельной работе с такими программами, позволяющими определить гарантии регулирования гидротурбин и максимальные нагрузки на облицовку водоводов для использования результатов в курсовом и дипломном проектировании. В учебном пособии рассмотрены теоретические и практические вопросы расчетов параметров переходных процессов в гидроагрегатах и напорных водоводах ГЭС.

# ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Переходные процессы подразделяют на плановые и аварийные. К **плановым переходным процессам** относятся пуск агрегата, регулирование нагрузки, остановка; к **аварийным** — сброс нагрузки и выход агрегата в разгон.

Рассмотрим наиболее типичные переходные процессы (табл. 1.1 и рис. 1.1) [1].

Таблица 1.1

Переходные процессы ГЭС

Процесс	Краткая характеристика
Пуск	<b>Перевод агрегата из состояния покоя в режим холостого хода.</b> Направляющий аппарат открывается до пускового открытия $a_{\text{пуск}}$ , которое больше открытия холостого хода $a_{\text{х.х}}$ (рис. 1.1, а). Момент на валу турбины возрастает, и, когда он превышает момент трения подпятника, агрегат начинает вращаться с быстро увеличивающейся частотой вращения. При подходе к номинальной частоте вращения $n_{\text{ном}}$ система автоматического регулирования (САР) турбины прикрывает направляющий аппарат до $a_{\text{х.х}}$ , частота выравнивается с частотой сети. Генератор включается в сеть методом точной синхронизации, при которой в момент включения должны строго совпадать напряжения, частоты и фазы тока генератора и сети, или методом самосинхронизации, когда невозбужденный генератор включается в сеть при частоте вращения, близкой к частоте сети, и по мере подъема возбуждения втягивается в синхронизм
Остановка агрегата	<b>Перевод агрегата из режима работы в состояние покоя.</b> После подачи импульса на остановку направляющий аппарат турбины закрывается (рис. 1.1, б). Пока мощность агрегата не уменьшится до нуля, частота вращения сохраняется постоянной, равной $n_{\text{ном}}$ . В режиме нулевой мощности (холостого хода) генератор отключается от сети. В процессе дальнейшего закрытия агрегат тормозится водой (гидравлический момент турбины отрицательный), а после того как частота вращения снизится до 35–40 %, включаются механические тормоза генератора и агрегат быстро останавливается
Регулирование нагрузки	<b>Увеличение или уменьшение мощности при работе в сети</b> (рис. 1.1, в). Регулирование мощности производится в соответствии с изменением нагрузки потребителей обычно в пределах нормального регулировочного диапазона. У радиально-осевых (РО) турбин этот диапазон находится в области мощностей 50–100 %, у поворотно-лопастных турбин — 25–100 %. Процесс происходит при постоянной частоте вращения. Изменение мощности достигается изменением открытия направляющего аппарата турбины и соответствующего изменения расхода. Возникающий при изменении расхода гидроудар оказывает влияние на изменение расхода и мощности. Вследствие этого влияния на начальном этапе процесса наблюдается обратный регулировочный эффект. При закрытии мощность сначала возрастает, при открытии — сначала падает
Сброс нагрузки	<b>Внезапное отключение нагруженного гидроагрегата от сети</b> , которое обычно вызывается коротким замыканием, — аварийный процесс. После отключения частота вращения агрегата быстро увеличивается (рис. 1.1, г). Это воспринимает автоматический регулятор и закрывает турбину. Уменьшение расхода приводит к положительному гидравлическому удару $\Delta H$ , который увеличивает напор турбины. С уменьшением открытия момент падает до нуля, а при $a < a_{\text{х.х}}$ становится отрицательным (агрегат тормозится). Частота вращения проходит максимум $n_{\text{макс}}$ и постепенно снижается, но пока она выше номинальной $n_{\text{ном}}$ , турбина продолжает закрываться, ее открытие достигает значения $a = 0$ , которое держится до тех пор, пока $n$ не приблизится к $n_{\text{ном}}$ . Тогда автоматический регулятор открывает турбину до $a_{\text{х.х}}$ и выводит агрегат в режим холостого хода. Наиболее важными показателями процесса при сбросах нагрузки являются максимальный гидроудар в подводящем водоводе $\Delta H_{\text{макс}}$ , максимальная частота вращения $n_{\text{макс}}$ , максимальный вакуум в отсасывающей трубе турбины
Выход агрегата в разгон и вывод его из разгона	<b>Сброс нагрузки при отказе САР.</b> Если направляющий аппарат при сбросе нагрузки не закрывается, то гидроагрегат увеличивает частоту вращения до разгонной. Для закрытия направляющего аппарата в этом случае используется специальный золотник аварийного закрытия. Вывод агрегата из разгона может осуществляться также закрытием предтурбинного затвора в здании ГЭС или аварийно-ремонтного затвора на водоприемнике, обеспечивающего прекращение поступления воды в турбину и остановку гидроагрегата

Режим работы турбины в поле универсальной характеристики определяется двумя координатами: открытием  $a$  и приведенной частотой вращения  $n'_i = nD / \sqrt{H}$ . При переходных процессах в общем случае изменяются три показателя:  $a$ ,  $H = H_0 + \Delta H$  и  $n$ , следовательно, изменяются во времени и координаты, фиксирующие мгновенный режим. Зависимости  $a(t)$  и  $n'_i(t)$  определяют траекторию мгновенных режимов для каждого переходного процесса. На рис. 1.2 в поле универсальной характеристики турбины показаны траектории режимов при пуске, остановке, увеличении и сбросе нагрузки, выходе агрегата в разгон и выведении из разгона. Обращает на себя внимание тот факт, что все эти процессы сопровождаются существенным отклонением приведенной частоты от нормального значения  $n'_{i0}$ . Траектории процессов при остановке и при сбросах нагрузки заходят в область тормозных режимов, в которой гидравлический момент рабочего колеса турбины направлен против направления вращения, за счет чего происходит снижение частоты вращения.

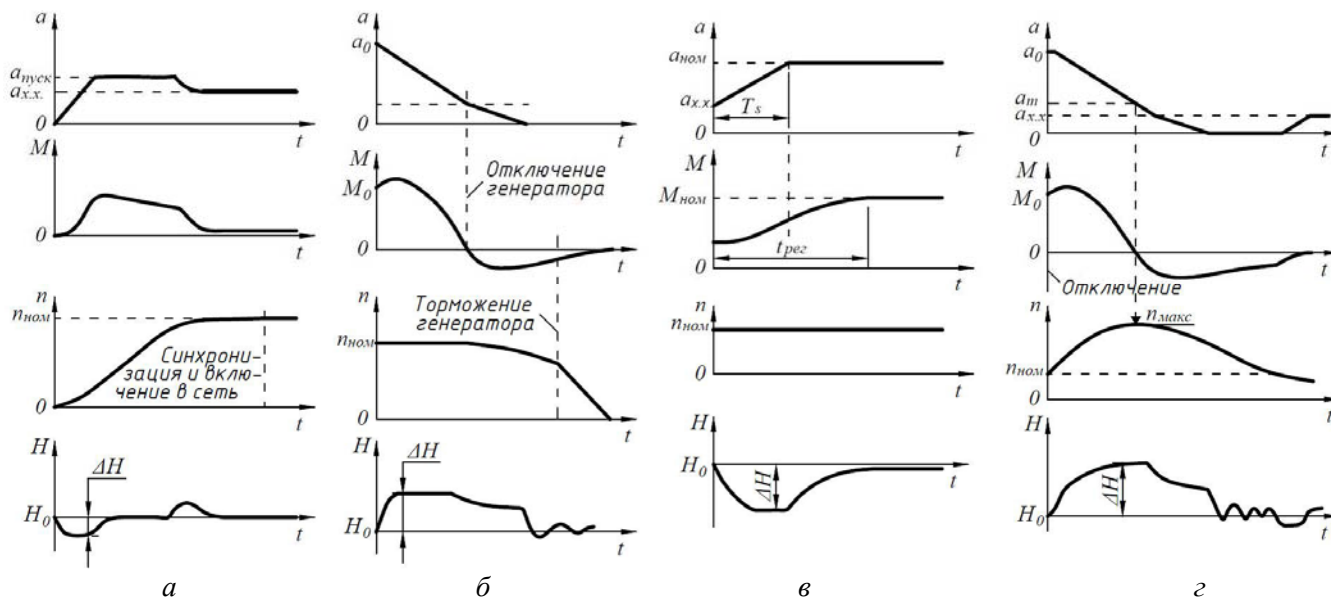


Рис. 1.1. Переходные процессы агрегатов ГЭС:

$a$  — пуск агрегата;  $б$  — остановка агрегата;  $в$  — увеличение нагрузки;  $г$  — сброс нагрузки

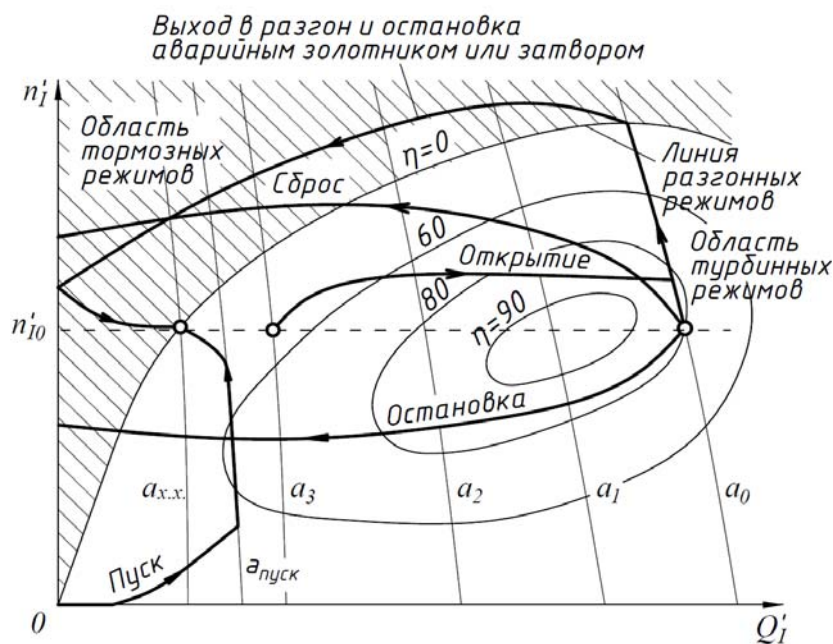


Рис. 1.2. Траектории переходных процессов в поле универсальной характеристики турбины

## ГЛАВА 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Гидравлический удар оказывает существенное влияние на протекание переходных процессов агрегатов ГЭС. Кроме того, он должен учитываться при проектировании напорных водоводов и элементов проточного тракта турбин при их расчете на прочность.

Положительный гидравлический удар увеличивает внутреннее давление в водоводе, поэтому требуется соответствующее увеличение толщины облицовки водовода.

Отрицательный гидравлический удар снижает давление и может привести к образованию вакуума. На рис. 2.1 пунктирной линией показан пьезометрический уровень при отрицательном гидравлическом ударе. Вакуум возникает на участке между точками *a* и *b*, он опасен только в том случае, если при этом возможен разрыв сплошности потока, т. е. когда абсолютное давление приближается к давлению водяных паров. По действующим нормам [2] максимально допустимый вакуум ограничен значением 5 м (0,05 МПа).

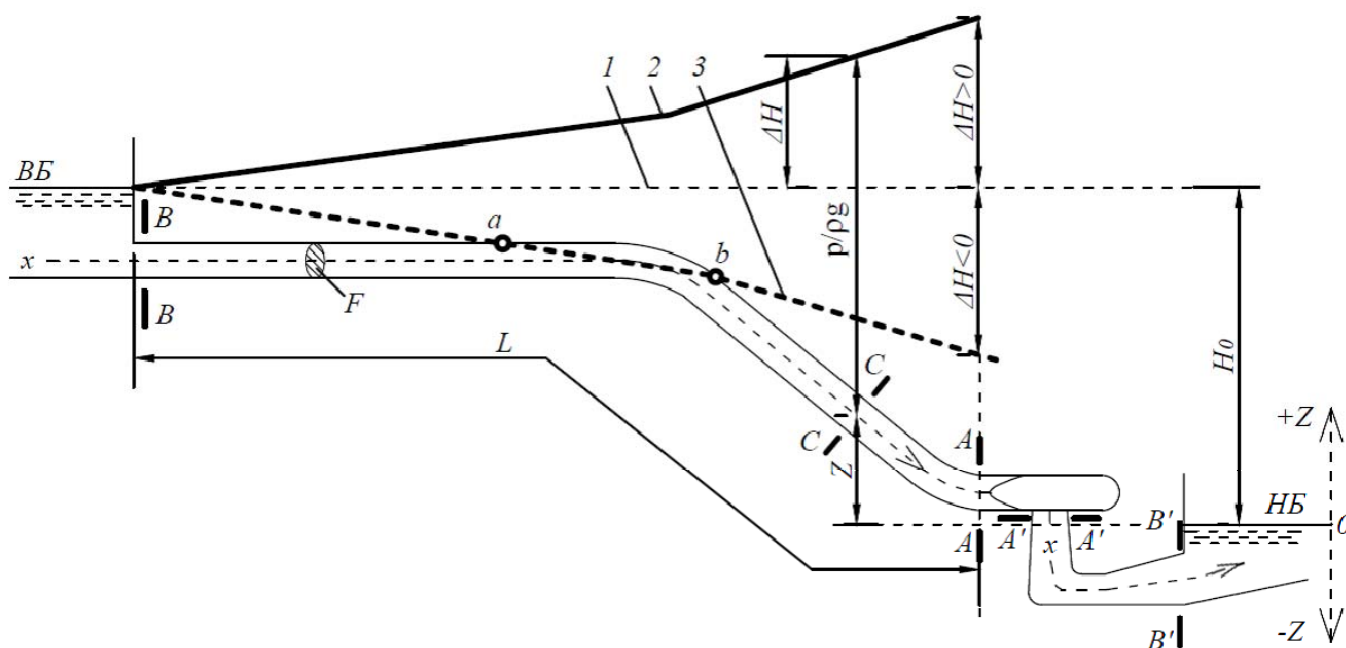


Рис. 2.1. Гидравлический удар в напорном водоводе:

1 — пьезометрическая линия при нулевом расходе; 2 — линия повышенного давления с учетом гидравлического удара; 3 — линия пониженного давления с учетом гидравлического удара;  $H_0$  — статический напор

Схема, иллюстрирующая определение давления с учетом гидравлического удара, приведена на рис. 2.1. Давление определяется с использованием расчетных формул, приведенных ниже:

для подводящего водовода

$$\frac{P}{\rho g} = H_{ст} + \Delta H - Z - \frac{V^2}{2g}; \quad (2.1)$$

для отводящего водовода

$$\frac{P}{\rho g} = \Delta H - Z - \frac{V^2}{2g}, \quad (2.2)$$

где  $\frac{P}{\rho g}$  — пьезометрический напор;

$H_{ст}$  — статический напор;

$\Delta H$  — гидравлический удар;

$Z$  — высотное положение оси водовода относительно нижнего бьефа (НБ);

$V$  — скорость потока;

$g$  — ускорение свободного падения.

Последний член уравнений учитывает влияние скоростного напора.

В расчетах гидравлического удара могут использоваться две модели:

- жесткая модель гидравлического удара (жесткий гидроудар), в которой жидкость и водовод считаются недеформируемыми;
- упругая модель гидравлического удара (упругий гидроудар), в которой учитываются упругие деформации жидкости и водовода, вызываемые изменением внутреннего давления.

Жесткая модель гидравлического удара менее точная, но более простая в математическом описании. Опыт расчетов и натурных испытаний показывает, что обе модели могут давать близкие результаты в случае коротких водоводов и длительного времени закрытия (открытия) турбин. Более подробно критерий применимости жесткой модели гидроудара будет рассмотрен в главе 3.

# ГЛАВА 3. ЖЕСТКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА

## 3.1. Общие положения

При выводе формулы для расчета гидроудара по жесткой модели приняты следующие допущения:

- вода не сжимаема;
- облицовка водовода не деформируема;
- потери напора не учитываются.

Рассмотрим водовод с площадью сечения  $F$  и длиной  $L$  между сечениями  $A$  и  $B$  (см. рис. 2.1). Пусть ось  $x$  совпадает с осью водовода и направлена от бьефа к турбине. Для подводящего водовода это направление от сечения  $B$  к сечению  $A$ , для отводящего водовода — направление от сечения  $A'$  к сечению  $B'$ . В дальнейших выкладках учтено, что для турбинного режима течения от верхнего бьефа (ВБ) к нижнему (НБ) принятое направление оси  $x$  отвечает положительному направлению скорости (расхода).

Формулу для расчета гидравлического удара по жесткой модели получаем из теоремы количества движения:

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

где  $m$  — масса жидкости в водоводе,  $m = \rho FL$ ;

$\rho$  — плотность воды;

$V$  — скорость воды;

$\Sigma X$  — сумма проекций на ось  $x$  внешних сил, действующих на выделенный отсек длиной  $L$ .

Для упрощения выкладок введем понятие «потенциальный напор»  $H$ , определяемый как сумма пьезометрического напора  $\frac{P}{\rho g}$  и высотного положения оси  $Z$  водовода относительно НБ:

$$H = Z + \frac{P}{\rho g} = H_{CT} + \Delta H. \quad (3.2)$$

Потенциальный напор при пренебрежении потерями напора имеет следующие свойства:

- не зависит от продольного профиля водовода;
- в установившемся режиме для всех сечений подводящего водовода равен статическому напору  $H_A = H_B = H_{CT}$ , а для всех сечений отводящего водовода — нулю;
- в переходном процессе определяется как сумма статического напора и гидроудара.

## 3.2. Вывод формулы расчета гидравлического удара

### в подводящем водоводе

На жидкость внутри отсека  $AB$  (см. рис. 2.1) действуют внешние силы давления со стороны сечений  $A$  и  $B$ , а также сила тяжести заключенного в отсеке столба жидкости. Учтем, что гидроудар в сечении  $B$  равен нулю, а в сечении  $A$  —  $\Delta H^A$ . Запишем выражения для этих сил через потенциальные напоры в сечениях  $A$  и  $B$ :

$$\Sigma X = -\rho g F (H^A + \Delta H^A - H^B) = -\rho g F \Delta H^A. \quad (3.3)$$

Знак минус в (3.3) появляется потому, что при положительном значении  $\Delta H^A$  равнодействующая сил давления направлена против оси  $x$ .

Значения  $m$  и  $\Sigma X$  подставим в (3.3). Учтывая, что  $dV/dt = (dQ/dt)/F$ , где  $Q$  — расход водовода, преобразуем (3.3) к следующему виду:

$$\rho FL \frac{1}{F} \frac{dQ}{dt} = -\rho g F \Delta H^A, \quad (3.4)$$

и, окончательно

$$\Delta H^A = -\frac{L}{gF} \frac{dQ}{dt}. \quad (3.5)$$



### 3.3. Вывод формулы расчета гидравлического удара в отводящем водоводе

Выражение типа (3.4) для отводящего водовода (см. рис. 2.1) будет иметь противоположный знак в левой части, поскольку при положительном гидроударе в сечении  $A'$  равнодействующая сил давления будет направлена по направлению оси  $x$ :

$$\rho FL \frac{1}{F} \frac{dQ}{dt} = \rho g F \Delta H^A. \quad (3.6)$$

Формула расчета гидроудара в отводящем водоводе имеет вид:

$$\Delta H^A = \frac{L}{gF} \frac{dQ}{dt}. \quad (3.7)$$

Она отличается от формулы (3.5) для подводящего водовода только знаком.

### 3.4. Анализ формулы расчета гидравлического удара по жесткой модели

В общем случае формула расчета гидроудара по жесткой модели для водовода постоянной площади сечения имеет вид:

$$\Delta H^A = \mp \frac{L}{gF} \frac{dQ}{dt}. \quad (3.8)$$

Знак минус « $\rightarrow$ » для расчета в подводящем водоводе, знак « $+$ » — в отводящем.

Формула (3.8) показывает, что гидравлический удар пропорционален отношению длины водовода к его сечению и производной, характеризующей изменение расхода.

Влияние производной изменения расхода на гидроудар представлено в табл. 3.1 и на рис. 3.1.

Таблица 3.1

Влияние производной изменения расхода на гидроудар в подводящем и отводящем водоводах

Режим изменения расхода	Гидроудар в подводящем водоводе	Гидроудар в отводящем водоводе
Уменьшение расхода	Положительный	Отрицательный
Увеличение расхода	Отрицательный	Положительный

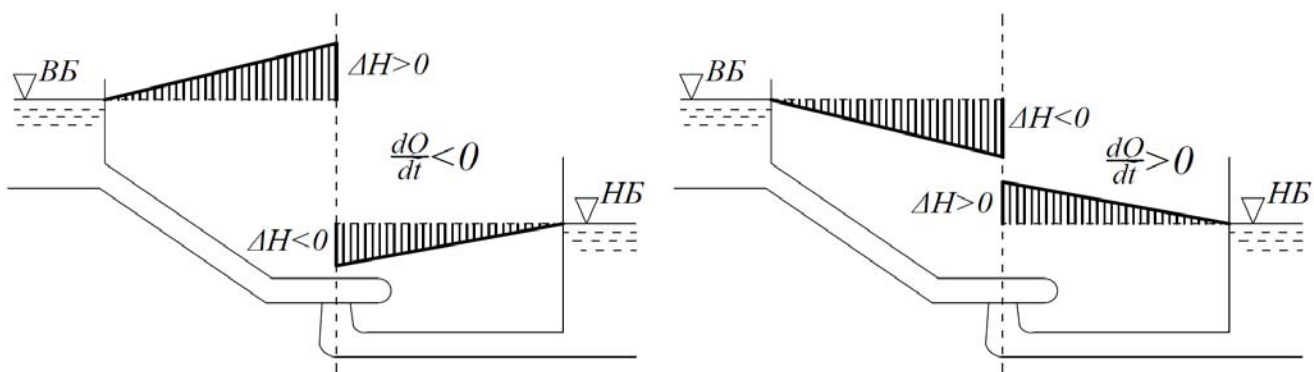


Рис. 3.1. Эпюры гидроудара в подводящем и отводящем водоводах в зависимости от производной изменения расхода:

$a$  —  $dQ/dt < 0$ ;  $b$  —  $dQ/dt > 0$

При резком уменьшении расхода (высоких значениях модуля производной  $dQ/dt$ ) расчет по (3.8) дает беспредельный рост гидроудара в подводящем водоводе. В действительности этого не происходит. Опыты показывают, что величина гидроудара  $\Delta H$  вначале возрастает, но затем, до-

стигнув некоторого предела, выше не поднимается. В этом проявляется влияние упругих деформаций жидкости (воды) и стенок водовода.

Распределение ударного давления по длине водовода можно определить расчетом по формуле (3.8). При этом длина  $L$  должна приниматься равной расстоянию от рассматриваемого сечения до свободной поверхности верхнего или нижнего бьефа. Из (3.8) следует, что в водоводе постоянного диаметра ударное давление распределяется линейно по длине.

На ГЭС с напорами более 200 м могут применяться так называемые телескопические водоводы, у которых диаметр уменьшается по участкам от верхового конца к низовому (рис. 3.2). Гидравлический удар в таком водоводе можно определить суммированием по отдельным участкам. Для телескопического водовода формула расчета жесткого гидроудара имеет вид:

$$\Delta H^N = \mp \left( \frac{1}{g} \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{F_i} \right) \frac{dQ}{dt}, \quad (3.9)$$

где  $N$  — количество участков;

$l_i$  и  $F_i$  — соответственно длина и площадь сечения участка телескопического водовода.

Эпюра распределения гидроудара по длине телескопического водовода представляется ломаной линией (см. рис. 3.2).

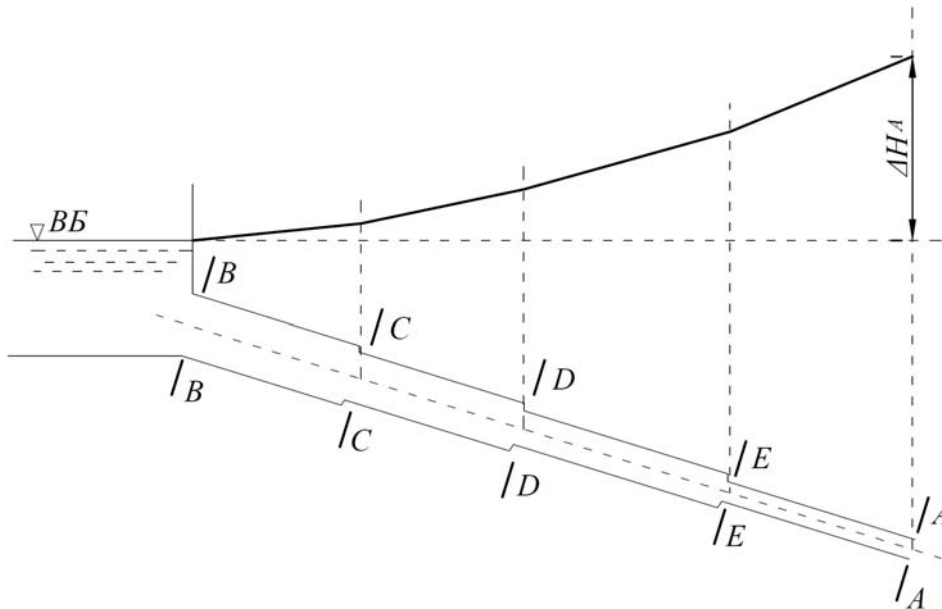


Рис. 3.2. Эпюра гидроудара по длине телескопического водовода (закрытие турбины)

В реальных условиях эпюра гидроудара по длине водовода может отличаться от линейной при существенном влиянии упругости воды и облицовки водовода.

### 3.5. Постоянная инерции напорного водовода

Уравнение гидроудара удобно представить в безразмерных (относительных) параметрах через следующие величины:

- относительный гидроудар —  $\Delta h = \Delta H / H_0$ ;
- относительный расход —  $q = Q / Q_{\text{макс}}$ .

Для перевода в безразмерные показатели обе части (3.9) делят на статический напор, обозначенный как  $H_0$ , а правую часть делят и умножают на  $Q_{\text{макс}}$ :

$$\frac{\Delta H^A}{H_0} = \frac{Q_{\text{макс}}}{H_0} \left( \frac{1}{g} \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{F_i} \right) \frac{d(Q / Q_{\text{макс}})}{dt}. \quad (3.10)$$

В итоге получаем уравнение расчета жесткого гидроудара в виде

$$\Delta h^A = \mp T_w \frac{dq}{dt}, \quad (3.11)$$

где

$$T_w = \frac{Q_{\max}}{gH_0} \left( \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{F_i} \right). \quad (3.12)$$

Коэффициент  $T_w$  называется постоянной инерции напорного водовода и выражается в секундах. Физический смысл  $T_w$  — время разгона воды, при котором расход возрастает от нуля до  $Q_{\max}$  под действием напора  $H_0$ .

### 3.6. Область применения жесткой модели гидроудара

Жесткая модель гидроудара может давать достаточную для инженерных задач точность при расчетах медленных переходных процессов. Критерием является соотношение между временем закрытия (открытия) направляющего аппарата турбины и временем фазы гидроудара. Влияние упругости на форму эпюры и максимальное значение ударного давления тем больше, чем меньше число фаз гидроудара, т. е. чем меньше значение  $m = T_s / \tau$ , где  $T_s$  — время изменения открытия турбины, а  $\tau$  — длительность фазы гидроудара.

При  $m > 8-10$  расхождения между гидроударом, определенным с учетом и без учета упругости, обычно невелики.

Применение жесткой модели гидроудара дает хорошие результаты при расчетах переходных процессов в коротких водоводах переменного сечения сложной формы, таких, например, как проточная часть русловых зданий ГЭС, включающая часть водоприемника, турбинную камеру и отсасывающую трубу. В расчетах гидроудара по жесткой модели затухание после прекращения закрытия (открытия) турбины принимается по апериодическому закону.

В реальных условиях существенное влияние на характер затухания гидравлического удара после прекращения регулирования оказывают упругие деформации. Колебательный процесс и явление противоудара могут рассчитываться только с использованием модели упругого гидроудара.

# ГЛАВА 4. УПРУГАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА

## 4.1. Общие положения

Явление гидравлического удара с учетом упругих деформаций можно проиллюстрировать схемой, представленной на рис. 4.1. Пусть в сечении  $A—A$  мгновенно закрылся затвор и скорость уменьшилась от начального значения  $V_0$  на  $\Delta V_{\text{мгн}}$ . Это должно вызвать инерционное повышение внутреннего давления — гидравлический удар  $\Delta H$ . Однако с увеличением давления за счет упругих деформаций жидкость сжимается, а сечение водовода увеличивается. Дополнительный объем, возникший в результате деформаций, должен заполниться жидкостью, для чего требуется некоторое время. Поэтому изменение скорости на  $\Delta V_{\text{мгн}}$  и давления на  $\Delta H$  будет распространяться от сечения  $A—A$  по водоводу с некоторой конечной скоростью  $c$ . Отсюда следует, что при учете упругих деформаций неустановившийся режим в напорных водоводах проявляется в форме волновых явлений.

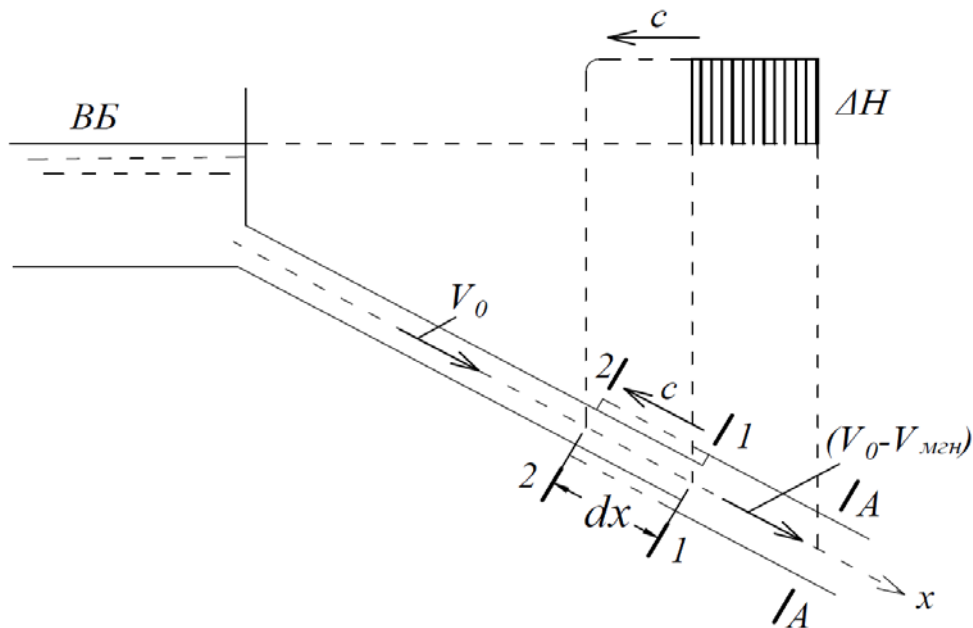


Рис. 4.1. Схема к расчету гидроудара с учетом упругости

## 4.2. Расчет скорости распространения волны гидравлического удара

Скорость распространения упругой волны удара  $c$  выражается формулой [3, 7, 11]

$$c = \frac{c_{\text{ж}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{ж}}}{K_{\text{сеч}}}}}, \quad (4.1)$$

где  $c_{\text{ж}}$  — скорость распространения звука в воде:

$$c_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^9}{1000}} = 1425 \text{ м/с}; \quad (4.2)$$

$E_{\text{ж}}$  — модуль объемной упругости воды,  $E_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^9$  Па;

$\rho_{\text{ж}}$  — плотность воды,  $\rho_{\text{ж}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Значение  $c_{\text{ж}} = 1425$  м/с характерно для воды, не содержащей свободного воздуха в виде пузырьков. Наличие в воде даже небольшого количества свободного воздуха резко снижает этот показатель. Так, если его содержание составляет около 0,5 % по объему, то  $c_{\text{ж}}$  снижается в 2–5 раз в зависимости от давления.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)