ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ВОДОПРОВОДЯЩЕМ ТРАКТЕ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС ПРИ ЗАКРЫТИИ РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

Г.Л. Козинец

ОАО «Ленгидропроект»
197227 Санкт-Петербург, пр. Испытателей, д. 22
Тел.: (812) 395-29-01, факс: (812) 394-44-26, e-mail: galina4410@yandex.ru

Заключение совета рецензентов: 10.07.15 Заключение совета экспертов: 13.07.15 Принято к публикации: 16.07.15

В статье представлена методика определения ударного давления в турбинном водоводе при закрытии регулирующих устройств. Приведена система разрешающих уравнений, описывающая неустановившееся движение жидкости в водопроводящем тракте ГЭС. Определены гидродинамические нагрузки на примере водопроводящего тракта Саяно-Шушенской ГЭС. Рекомендовано время закрытия аварийно-ремонтного затвора при одновременном закрытии направляющего аппарата турбины для минимального превышения давления.

Ключевые слова: водопроводящий тракт, направляющий аппарат, ударная волна, турбинный водовод, пульсации, гидродинамические нагрузки, напорные турбинные водоводы, изменение скорости течения.

HYDRODYNAMIC LOADS IN WATER CHANNEL OF SAYANO-SHUSHENSKAYA HYDROPOWER PLANT AT CLOSING REGULATOR DEVICE AND HYDRAULIC IMPACT

G.L. Kozinets

“Lenhydroproject” LLC
22 Ispytateley Ave., St.-Petersburg, 197227, Russia
Tel.: (812) 395-29-01, fax: (812) 394-44-26, e-mail: galina4410@yandex.ru

Referred: 10.07.15 Expertise: 13.07.15 Accepted: 16.07.15

This paper presents a shock pressure determination method in a penstock at regulator devices closing. A system of resolving equations that describe a nonsteady motion of liquid in water channel of hydropower plant is described in the paper. Hydrodynamic loads are determined based on the example of Sayano-Shushenskaya hydropower plant water channel. For minimum pressure excess, the authors recommend the time of emergency-repair gate closure at simultaneous closing of a guide vane.

Keywords: water channel, guide vane, shock wave, penstock, pulsations, hydrodynamic loads, pressure penstock, flow rate change.

Галина Леонидовна
Козинец
Galina L. Kozinets

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство» СПбСТУ, начальник отдела расчетных обоснований ОАО «Ленгидропроект».

Образование: Ленинградский политехнический институт (1986)/

Область научных интересов: разработка методов и математических моделей гидроагрегатных блоков ГЭС для рационального проектирования.

Публикации: 25, 3 патента РФ.

Information about the author: Ph.D., Assistant Professor at the chair “Hydroeconomics and Hydraulic Construction” at SPbSTU, Head of Calculation Substantiations Department at “Lenhydroproject” LLC.

Education: Leningrad Polytechnical Institute (1986).

Research area: development of methods and mathematical models of hydraulic units for rational design.

Publications: 25, including 2 patents of RF.

Введение

Течение воды в водопроводящем тракте ГЭС характеризуется изменением давления во времени, что аналогично волновым процессам в упругой среде. При этом модель среды является моделью с распределенными параметрами. Одной из практических задач является решение основного уравнения неустановившегося движения жидкости, связанного с явлением гидравлического удара в турбинном водоводе.

Физика процесса заключается в том, что при закрытии лопаток направляющего аппарата (НА) скорость воды, натолкнувшейся на лопатки НА, будет погашена, а их кинетическая энергия перейдет в работу деформации стенок трубопровода и воды. При этом стенки трубы растягиваются, а жидкость сжимается в соответствии с увеличением давления на величину $\Delta P_{уд}$. Ударная волна распространяется в сторону водоприемника со скоростью c . Вода и стенки трубы предполагаются упругими, поэтому они возвращаются к прежнему состоянию, соответствующему давлению P_0 . Работа деформации полностью переходит в кинетическую энергию, и жидкость в трубе приобретает первоначальную скорость v_0 , но направленную теперь в противоположную сторону. Весь цикл гидравлического удара повторится. При напорном неустановившемся движении расход в данный момент времени во всех сечениях потока одинаков. В этом случае работа сил давления ΔA равна изменению энергии ΔE , то есть $\Delta A = \Delta E$.

Методика определения ударного давления в турбинном водоводе при закрытии регулирующих устройств

В уравнения, описывающие течение сжимаемой жидкости, входят: уравнение сохранения количества движения (Навье-Стокса), уравнения неразрывности (выражающие физический закон сохранения массы), уравнение, описывающее сохранение энергии, и уравнение состояния. Уравнение сохранения количества движения (Навье-Стокса) записывается в виде

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \operatorname{div}(\vec{v})) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \left(\frac{dv_i}{dx_k} + \frac{dv_k}{dx_i} \right) \right], \quad (1)$$

где v_i – составляющая вектора скорости жидкости на ось x_i ; t – время; ρ – плотность жидкости; μ – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Вместе с тем необходимо отметить, что для турбулентных течений приведенная выше система уравнений замыкается при помощи формул, которые следуют из полуэмпирических теорий. В результате применения этих теорий в уравнениях Навье-Стокса появляются дополнительные константы или же функции, которые могут быть найдены только из эмпирических данных.

В то же время реальную трехмерную задачу рационально свести к одномерной, в которой неравномерно распределенные по сечению водовода гидродинамические характеристики потока считаются изменяющимися во времени только вдоль одной координаты – по длине трубопровода, а по его сечению все параметры считаются постоянными и равными некоторым средним значениям.

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

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

$$\partial v / \partial t = g (\partial p / \partial x), \quad (2)$$

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

2. Уравнения неразрывности потока жидкости, выражающего сохранение массы:

$$\partial v / \partial x = (g / c^2) (\partial p / \partial t), \quad (3)$$

где c – скорость распространения волны возмущения давления.

Уравнение сохранения энергии для напорного неустановившегося движения может быть представлено в виде [1]

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_i, \quad (4)$$

где z_1, z_2 – координаты, определяющие положение центров тяжести живых сечений в сечениях 1 и 2 от плоскости сравнения; γ – удельный вес жидкости; p_1, p_2 – гидродинамические давления в сечениях 1 и 2; α_1, α_2 – коррективы кинетической энергии в сечениях 1 и 2; h_f – потери, обусловленные гидравлическим сопротивлением и деформациями стенок водовода; h_i – инерционный напор.

Решение этой системы дифференциальных уравнений при задании соответствующих граничных и начальных условий позволяет найти все параметры, характеризующие рассматриваемое течение жидкости. Специализированные программы, реализующие решение гидродинамических задач течения жидкости, позволяют найти численное решение дифференциальных уравнений. При использовании метода конечных элементов дифференциальные уравнения переводятся в КЭ-уравнения для каждого элемента. КЭ-уравнения всех элементов образуют глобальную систему обычных дифференциальных уравнений или алгебраических уравнений с наложенными начальными или граничными условиями. Значения зависимых уравнений в узлах находят решением полуконечной системы уравнений.

Для интегрирования по времени используется прямой метод Эйлера.

Поскольку главные уравнения задач на течение жидкости нелинейны, для решения системы нелинейных алгебраических уравнений, полученных при КЭ-дискретизации, используется итерационный метод решения Ньютона – Рафсона.

При нестационарном течении воды как сжимаемой жидкости в каждый момент времени Δt меняется скорость течения и гидродинамическое (ударное) давление внутри водопроводящего тракта, длина которого L измеряется от входного сечения водоприемника до входного сечения спиральной камеры. В каждой фиксированной точке потока скорость и давление являются функциями не только координат, но и времени, т.е.

$$v = v(x, y, z, t), \quad p = p(x, y, z, t). \quad (5)$$

За начальные принимаются условия установившегося движения воды

$$v = v_0, \quad p = p_0, \quad (6)$$

где v и p – скорость и давление в точке потока.

Повышение давления, возникающее в напорном трубопроводе при внезапном торможении потока воды, характеризуется чередованием резких повышений и понижений давления $\Delta P_{уд}$, которое связано с упругими деформациями жидкости и стенок трубопровода.

Гидравлический удар возникает при резком открытии или закрытии устройств, управляемых потоком, а именно, затвора водоприемника и лопаток направляющего аппарата турбины. При этом стенки трубы растягиваются, а жидкость сжимается в соответствии с увеличением давления на величину ударного давления $\Delta P_{уд}$. В этом случае величина повышения давления воды при совместном постепенном закрытии лопаток направляющего аппарата и затвора водоприемника:

$$\Delta P_{уд} = \rho \gamma_v c (v_0 - v_t) + \Delta P_3 - h_f; \quad (7)$$

$$\Delta P_{уд} = \rho \gamma_v c (v_0 - v_t) + n_{\Delta s} \gamma_v (v_t^2 / 2g) - h_f, \quad (8)$$

где c – скорость распространения ударной волны, м/с; $\gamma_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; v_0 – скорость течения воды в начальный момент времени, м/с; v_t – скорость течения воды в рассматриваемый момент времени, м/с; которая определяется по формуле

$$v_t = \pm \int_0^t (gh_1/L) dt. \quad (9)$$

Изменение давления, вызванное закрытием затвора водоприемника:

$$\Delta P_3 = n_{\Delta s} \gamma_v (v_t^2 / 2g), \quad (10)$$

где $n_{\Delta s}$ – коэффициент, учитывающий изменение площади и пропускной способности входного сечения, определяется по полуэмпирической формуле И.Е. Идельчика:

$$n_{\Delta s} = 1 - (S_i/S_0), \quad (11)$$

где S_0 и S_i – площадь водоприемного отверстия в начальный момент времени и в рассматриваемый момент времени соответственно, м^2 ; $n = S_i/S_0$ – степень сужения площади сечения при закрытии затвора водоприемника; h_f – потери энергии, обусловленные гидравлическим сопротивлением и деформациями водовода (приняты равными 5%).

Скорость распространения ударной волны для случая водовода с упругими стенками:

$$c = \sqrt{K/\rho_v} \frac{1}{\sqrt{1 + (D/\delta)(K/E)}}, \quad (12)$$

где K – модуль упругости воды; E – модуль упругости оболочки; D – диаметр водовода; δ – толщина оболочки.

Время, за которое ударная волна пройдет весь водовод от затвора водоприемника до входного сечения в спиральную камеру и обратно:

$$\tau_0 = 2L/c. \quad (13)$$

При изменении величины раскрытия лопаток направляющего аппарата изменяется режим пульсации в водопроводящем тракте. Полное закрытие лопаток соответствует увеличению давления при гидравлическом ударе, частичное закрытие наблюдается при нормальной эксплуатации и вызывает пульсацию. Наибольшее влияние на формирование пульсаций при изменении давления $\Delta P_{уд}$ в напорных водоводах ГЭС при гидравлическом ударе оказывают следующие параметры: время закрытия регулирующих устройств (затвора водоприемника, лопаток направляющего аппарата), скорость потока воды в течение закрытия, геометрические параметры (длина, диаметр и толщина оболочки) водовода, модуль упругости оболочки водовода.

Определение гидродинамических нагрузок выполнено на примере водопроводящего тракта Саяно-Шушенской ГЭС.

Сталежелезобетонные турбинные водоводы вынесены на низовую грань и имеют переменный уклон. Жесткая связь с низовой гранью обеспечена штроблением плоскости контакта и выпусками армокаркасов из бетона плотины в железобетонную оболочку водоводов.

Диаметр живого сечения водоводов составляет 7,5 м. Металлическая облицовка водоводов имеет переменную толщину и выполнена из стали 09Г2С.

Толщина железобетонной оболочки – 1,5 м. В железобетонной оболочке использован бетон класса В20.

Напорные турбинные водоводы Саяно-Шушенской ГЭС имеют переменные по длине жесткостные характеристики. Это связано с условиями статической работы конструкции и особенностями производства работ на этапе возведения.

В связи с переменной жесткостью гашение энергии гидравлического удара и скорость распространения ударной волны на разных участках водовода будет различной. Примем допущение, что жесткость водовода неизменна по длине. При этом в качестве эталонного примем участок напорного водовода секции № 16 (первый гидроагрегат (ГА)) с толщиной металлической оболочки 36 мм. Выбор наиболее жесткого участка наклонной части водовода и задание его характеристик на расчетную модель осуществлены в запас.

Приведенный модуль упругости рассматриваемого участка водовода $E = 3,6 \cdot 10^{10}$ Па.

В расчете приняты следующие допущения:

- вода рассматривается как сжимаемая жидкость;
- силы трения по длине и потери энергии на локальные гидравлические сопротивления (повороты оси водовода) не учитываются;

– вопросы устойчивости колебаний масс не учитываются;

– в качестве расчетной схемы принят водовод диаметром 7,5 м и толщиной оболочки, равной 1,5 м;

– оболочка водовода принята упругой;

– время закрытия НА составляет 12,5 с (см. режим 2);

– рассматривается сечение водовода перед конфузором спиральной камеры;

– изменение давления по длине водовода пропорционально удалению от верхнего бьефа сечения. Избыточное давление во входном сечении водоприемника принято равным нулю.

Расчеты гидродинамического давления в турбинном водоводе выполнены при различных сценариях закрытия лопаток направляющего аппарата и аварийно-ремонтного затвора водоприемника.

Согласно исследованиям ОАО «ЛМЗ», выделено три наиболее неблагоприятных режима закрытия лопаток направляющего аппарата.

На рис. 1 представлены графики хода штока сервомотора во времени для режимов закрытия НА № 1-3.

Режим 2 характеризуется максимальной величиной повышенного давления. При реализации режима 1 повышение давления в турбинном водоводе несколько меньше, но обладает большей продолжительностью.

1. При полном сбросе нагрузки 735 МВт при напоре $H = 219$ м (ВБ = 540 м), $Q = 320$ м³/с, время закрытия $t_3 = 13,5$ с (режим 1).

2. При полном сбросе нагрузки 650 МВт при напоре $H = 219$ м (ВБ = 540 м), $Q = 280$ м³/с, время закрытия $t_3 = 12,5$ с (режим 2).

3. При полном сбросе нагрузки 650 МВт при напоре $H = 194$ м (ВБ = 522,83 м), $Q = 340$ м³/с, время закрытия $t_3 = 14$ с (режим 3).

Максимальное превышение давления в турбинном водоводе выполнено для режима 2. Времени закрытия направляющего аппарата $t_3 = 12,5$ с.

Рис. 1. Графики хода штока сервомотора во времени для режимов закрытия НА №1-3
Fig. 1. Diagrams of servomotor rod motion in time for guide vane closing regimes

В расчет включены: участок водовода, проложенный в теле плотины ($L_1 = 17,91$ м); участок водовода, проложенный по нижней грани ($L_2 = 60,68$ м); анкерная опора ($L_3 = 56,2$ м).

График изменения скорости течения воды в водоводе при закрытии направляющего аппарата для режима 2 представлен на рис. 2.

Рис. 2. График изменения скорости течения воды при закрытии лопаток НА в режиме 2
Fig. 2. Diagram of water flow rate change at guide vane blades closing at the 2nd regime

Длина расчетного участка турбинного водовода, соединяющего верхний бьеф со зданием ГЭС, принята равной: $L_{\text{общ}} = 235$ м.

Внутренний диаметр напорного водовода 7,5 м.

Скорость воды в напорном водоводе перед входом в спиральную камеру определим для крайнего сечения трубопровода:

$$v_0 = Q_i / \omega_i \quad (14)$$

где $Q_i = 280$ м³/с – максимальный расход турбинного водовода при реализации режима 2; $\omega_i = 44,18$ м² – площадь живого сечения водовода.

$$v_0 = 280 / 44,18 = 6,34 \text{ м/с} . \quad (15)$$

Величина повышения давления при постепенном закрытии только лопаток направляющего аппарата определяется по формуле

$$P_{\text{изб},i} = \rho_v c (v_0 - v_i) - h_f , \quad (16)$$

где h_f – потери энергии, обусловленные гидравлическим сопротивлением и деформациями водовода (приняты равными 5%).

Для принятых параметров водовода скорость распространения ударной волны составит

$$c = \sqrt{2,07 \cdot 10^9 / 10^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (7,5/1,5)(2,07 \cdot 10^9 / 3,6 \cdot 10^{10})}} = 1255,51 \text{ м/с} . \quad (17)$$

Время, за которое ударная волна, образующаяся в результате прикрытия лопаток направляющего аппа-

рата, дойдет до верхнего бьефа, отразится от него и вернется к НА, называется фазой гидроудара. Длительность фазы определяется по формуле

$$\tau_0 = 2L_{\text{общ}} / c , \quad (18)$$

где $L_{\text{общ}} = 235$ м – длина расчетного участка водовода.

Из (18) получим:

$$\tau_0 = 2 \cdot 235 / 1255,51 \approx 0,37 \text{ с} . \quad (19)$$

Так как время закрытия НА $t_3 = 12,5$ с > $\tau_0 = 0,37$ с, гидравлический удар является неполным: отраженная ударная волна приходит к открытым лопаткам.

Следовательно, закрытие НА нельзя считать мгновенным. Поэтому в трубопроводе с промежуток, равным длительности фазы, будут возникать волны повышенного и пониженного давления, которые будут накладываться друг на друга и приводить к переменным пульсациям давления по всей длине. В случае совместного закрытия НА и АРЗ на волны гидравлического удара будет накладываться отраженная волна, вызванная изменением площади входного сечения за счет опускания АРЗ. В зависимости от степени синхронности закрытия НА и АРЗ влияние отраженной волны может быть более или менее сильным. В расчетах примем наихудший вариант: отраженная волна от АРЗ полностью суммируется с волнами гидравлического удара (возможная сдвигка фаз не рассматривается).

Решение задачи выполнено графическим методом.

Суть метода заключается в построении графиков изменения давления за время $0 \leq t_i \leq t_3$, отвечающих функции $P_{\text{изб},i}$. Откладывая данную функцию с интервалом, равным длительности фазы (τ_0), получаем чередующиеся области повышенного и пониженного давления. Для определения величины избыточного давления в любой момент времени достаточно просуммировать длины положительных и отрицательных отрезков по графику для данного момента времени.

Сценарий 1. Закрытие только лопаток НА за 12,5 с. Опускание АРЗ в спокойную воду.

На основе принятого закона распределения скоростей вычисляем величины избыточного давления воды для ряда временных отрезков в промежутке $0 \leq t_i \leq t_3$ с интервалом 0,37 с. Величина принятого интервала соответствует длительности фазы, поэтому на каждом интервале решение задачи по нахождению избыточного давления можно проводить для случая полного гидравлического удара.

Для определения величины изменения давления в момент времени t_i находим алгебраическую сумму отрезков, отсекаемых положительными и отрицательными полосами на вертикали, проведенной через соответствующую точку t_i на оси абсцисс. Графики функции $P_{\text{изб},i}(t)$ графического метода изображены на рис. 3.

Рис. 3. График зависимости давления $P_{изб.1}$ от времени t
Fig. 3. Time dependence of pressure $P_{изб.1}(t)$

Фиолетовым цветом выделены области повышенного давления. Синим – области пониженного давления. Красной линией изображен график колебаний избыточного давления у НА.

Максимальное значение избыточного давления у НА составит 0,29 МПа.

График пульсаций давления у НА представлен на рис. 4.

Рис. 4. График пульсаций давления у НА
($t_s=12,5$ с; $Q=280$ м³/с)
Fig. 4. Diagram of pressure pulsations of guide vane
($t_s=12,5$ с; $Q=280$ м³/с)

Максимальная величина избыточного давления при реализации сценария 1 (закрытие лопаток НА в текущей воде, опускание АРЗ в спокойную воду) составляет 0,2964 МПа.

Сценарий 2. Одновременное закрытие лопаток НА и АРЗ. Время закрытия АРЗ – 30 с.

Результатирующее избыточное давление в данном случае представляет собой сумму избыточных давлений, вызванных закрытием лопаток НА и опусканием АРЗ. Максимальное значение избыточного давления у НА для сценария 2 составит 0,759 МПа. Учет влияния аэрационных труб позволяет добиться

снижения величин избыточного давления примерно на 3,5%. График пульсаций давления у НА для сценариев 1 и 2 представлен на рис. 5. Максимальная величина избыточного давления – при реализации сценария 2 (одновременное закрытие лопаток НА и АРЗ; время закрытия АРЗ – 30 с).

Рис. 5. График пульсаций давления у НА
($t_s=12,5$ с; $Q=280$ м³/с; $t_{AP3}=30$ с)
Fig. 5. Diagram of pressure pulsations of guide vane
($t_s=12,5$ с; $Q=280$ м³/с; $t_{AP3}=30$ с)

Сценарий 3. Одновременное закрытие лопаток НА и АРЗ; время закрытия АРЗ – 120 секунд.

Рис. 6. График пульсаций давления у НА
($t_s=12,5$ с; $Q=280$ м³/с; $t_{AP3}=120$ с)
Fig. 6. Diagram of pressure pulsations of guide vane
($t_s=12,5$ с; $Q=280$ м³/с; $t_{AP3}=120$ с)

Расчет результирующего избыточного давления для случая закрытия только лопаток НА будет осуществляться путем суммирования решений по интервалам. Результирующее избыточное давление в данном случае представляет собой сумму избыточных давлений, вызванных закрытием лопаток НА и опусканием АРЗ. Максимальное значение избыточного давления у НА для сценария 3 составит 0,3197 МПа. Учет влияния аэрационных труб позволяет добиться снижения величин избыточного давления примерно на 3,5%. График пульсаций давления у НА для сценариев 1 и 3 представлен на рис. 6.

Максимальная величина избыточного давления при реализации сценария 3 (одновременное закрытие лопаток НА и АРЗ; время закрытия АРЗ – 120 секунд, учет влияния аэрационных труб) составляет 0,3085 МПа.

Выводы

Гидравлические расчеты водопроводящего тракта Саяно-Шушенской ГЭС показали следующие величины превышения давления ΔP в турбинном водоводе в зависимости от времени закрытия АРЗ (аварий-

но-ремонтного затвора водоприемника) при закрытии НА (направляющего аппарата) 12,5 с:

1. $\Delta P = 0,76$ МПа, закрытие АРЗ – 30 с, 42% закрытия отверстия затвора.
2. $\Delta P = 0,51$ МПа, закрытие АРЗ – 60 с, 20,8% закрытия отверстия затвора.
3. $\Delta P = 0,38$ МПа, закрытие АРЗ – 90 с, 13,8% закрытия отверстия затвора.
4. $\Delta P = 0,32$ МПа, закрытие АРЗ – 120 с, 10,4% закрытия отверстия затвора.
5. Максимальная величина гидродинамического давления внутри трубопровода при гидравлическом ударе $\Delta P = 0,76$ МПа, УВБ отн. 539 м.
6. Рекомендовано время закрытия АРЗ 120 с, при закрытии НА – 12,5 с, ввиду минимального $\Delta P = 0,32$ МПа.

Список литературы (References)

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982. (Čugaev R.R. Gidravlika. L.: Ènergoizdat, 1982).

Транслитерация по ISO 9:1995