

Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

Д.т.н., профессор Н.В. Арефьев,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ключевые слова: математические модели; водопроводящий тракт; оптимизационные расчеты

Повышение требований к безопасности вновь проектируемых и реконструируемых объектов энергетики обуславливает необходимость более тщательного обоснования проектных решений с использованием современных методов физического и математического моделирования плановых и аварийных технологических режимов их эксплуатации. Интенсивное развитие средств автоматизированного проектирования привело к значительному увеличению вариантности проектных решений (порядка нескольких десятков) по сравнению с двумя–тремя вариантами при «ручном проектировании» в 70–80-е годы XX века. Поэтому в настоящее время все больше преимуществ приобретает компьютерное математическое моделирование, позволяющее за короткое время проводить численные расчеты для большого количества вариантов проектных решений.

Физическое моделирование вследствие значительных финансово-материальных затрат, а также продолжительного времени проведения эксперимента применяется при необходимости на заключительной стадии для окончательно выбранного варианта объекта.

Обзор литературы

За последние 40 лет вопросам численного моделирования переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов посвящено множество исследований, в которых разработаны и успешно апробированы численные модели переходных гидромеханических процессов [1–5].

При этом в соответствии с тенденциями развития энергетики значительное внимание было уделено моделированию технологических режимов в водопроводящих трактах гидроэнергетических установок (ГЭС и ГАЭС) и гидравлическим системам охлаждения АЭС и ТЭС. В связи с этим к настоящему времени сформировались две типовые группы численных моделей в системах «водопроводящие сооружения ГЭС, ГАЭС – гидроагрегат» и «насосный агрегат – водопроводящие сооружения систем охлаждения АЭС, ТЭС». Эти численные модели основаны на известных дифференциальных уравнениях, описывающих движение воды в напорных и безнапорных водоводах с типовыми фиксированными граничными условиями, отображающими гидравлические условия сопряжения отдельных участков водопроводящего тракта, гидравлические зависимости для водосливов, затворов, резервуаров и т. п. [6–8].

Постановка задачи

Развитие программного обеспечения позволяет в настоящее время создавать самоадаптирующиеся комплексы численных моделей, позволяющие проводить расчеты сложных водопроводящих систем с изменяющимся режимом течения на отдельных участках (опорожнение, движение по сухому дну, занaporивание безнапорного туннеля и т. п.) [9, 10]. В этих адаптирующихся моделях, наряду с комплексом граничных условий, важную роль играет непрерывно функционирующая система слежения и анализа гидравлических параметров потока как внутри расчетной области, так и в граничных створах. Задачей этой системы является своевременное переключение в процессе расчетов с одной модели на другую в зависимости от изменения режима течения на данном участке (напорное-безнапорное, опорожнение-наполнение и т. п.). Эта же система отслеживает передвижение границ области моделирования (при наполнении и опорожнении участков водоводов), а также выбор соответствующего граничного условия при изменении режима течения на границе области моделирования потока (неподтопленный водослив – подтопленный водослив).

Арефьев Н.В. Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

В практических расчетах нами неоднократно апробированы самоадаптирующиеся модели (Миатлинская ГЭС; Ирганайская ГЭС; каскад Зарамагских ГЭС; системы охлаждения ЛАЭС-2, Калининской АЭС, Нововоронежской АЭС, Белорусской АЭС, Тяньваньской АЭС и др.), применение которых позволило проанализировать переходные гидромеханические процессы в сложных водопроводящих трактах для различных плановых и аварийных режимов эксплуатации. [11–15].

Рассмотрим, в частности, моделирование переходных гидромеханических процессов в сложном водопроводящем тракте сомкнутого каскада Зарамагских ГЭС при обосновании эксплуатационных режимов его работы.

Каскад Зарамагских ГЭС на р. Ардон (рис. 1) состоит из головной ГЭС с установленной мощностью 10 Мвт и нижерасположенной деривационной ГЭС-1 с установленной мощностью 342 МВт. Емкость водохранилищ каскада составляет: полная – 10.1 млн м³, полезная – 0.5 млн м³. Проектная среднегодовая выработка электроэнергии – 812,0 млн кВт·ч. На головной ГЭС, введенной в эксплуатацию, установлен 1 агрегат с номинальным расходом 65 м³/с, на ГЭС-1 – два агрегата с ковшовыми турбинами и номинальным расходом 32,5 м³/с. Головная ГЭС и ГЭС-1 связаны безнапорным деривационным туннелем длиной около 14.4 км, в конце которого расположен бассейн суточного регулирования с полезной емкостью 289 тыс. м³.

Наличие длинного безнапорного туннеля и сравнительно небольшого полезного объема воды в бассейне суточного регулирования обуславливает значительные сложности в планировании и управлении режимами работы каскада. Это, прежде всего, связано с большим и непостоянным по величине временем добегания расходов от головной ГЭС, зависящим от глубины наполнения туннеля.



Рисунок 1. Схема расположения сооружений Зарамагских ГЭС

Основой модели расчетов нестационарных процессов в безнапорном туннеле и бассейне суточного регулирования является система уравнений Сен-Венана, состоящая из уравнения неразрывности и одного (в одномерных задачах) или двух (в двумерных задачах) уравнений движения. [17–20]

$$1/g \cdot dv/dt + v/g \cdot dv/dx + dh/ds - i_0 + v^2 \text{sign}(v)/C^2 R = 0; \quad (1)$$

$$d\omega/dt + dQ/ds = 0, \quad (2)$$

Арефьев Н.В. Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

где v , h – осредненная по сечению скорость движения воды и глубина потока соответственно;

i_0 – уклон дна;

C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус сечения водовода;

ω – площадь живого сечения потока воды;

Q – расход воды (проходящей через рассматриваемое сечение);

s , t – координаты по оси движения и во времени соответственно.

Система уравнений замыкается заданием начальных и граничных условий:

$$\begin{aligned} h(s,0) &= h_0(s); Q(s,0) = Q_0(s); \\ h(0,t) &= h^*(t); Q(0,t) = Q^*(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Расчетная модель, реализованная в виде программного модуля, построена на основе явной схемы конечных разностей для численного решения системы (1)–(2).

Тогда система уравнений (1)–(3) примет вид:

$$Q_{j\tau+1} = Q_{j\tau} + \frac{\Delta t_\tau}{c_1 - c_2} (c_1 F_1 - c_2 F_2); \quad (4)$$

$$h_{j\tau+1} = h_{j\tau} + \frac{\Delta t_\tau}{B(c_1 - c_2)} (F_1 - F_2). \quad (5)$$

Таким образом, зная параметры потока $h_{j-1\tau}$, $h_{j\tau}$, $h_{j+1\tau}$, $Q_{j-1\tau}$, $Q_{j\tau}$, $Q_{j+1\tau}$ в момент времени t_τ , получаем новые значения параметров $h_{j+1\tau}$ и $Q_{j+1\tau}$ через промежуток времени Δt_τ . Изменяя j от 1 до $n-1$, получаем характеристики потока вдоль всего водовода при неустановившемся движении в следующий момент времени, т. е. $t_{\tau+1}$.

Для определения параметров потока воды в момент времени $t_{\tau+1}$ на границах водовода необходимо совместное решение уравнения (4) с уравнением левого граничного условия, а (5) – с уравнением правого граничного условия.

В большинстве случаев в качестве *начальных условий* принимается установившийся неравномерный режим движения потока. При этом определение отметок поверхности воды или глубины в каждом водоводе осуществляется путем преобразований уравнения неравномерного движения воды, записанного в общепринятых обозначениях:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{\alpha C^2 R}{g \omega} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3}} = f(h) \quad (5.1)$$

$$\text{к виду } x_i - \int_{h_i}^{h_{i+1}} 1/f(h) dh = 0, \quad (5.2)$$

где x_i – расстояние между створами с глубиной h_i и h_{i+1} , $i = 0, 1 \dots N$;

i – уклон дна водопроводящего тракта;

Q – расход воды;

B – ширина по урезу воды;

C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус;

ω – площадь живого сечения;

α – коэффициент неравномерности потока.

Арефьев Н.В. Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

Для известного h_i и выбранного $h_{i+1} = h_i + \Delta h$ определяется x_i . Знак при Δh выбирается из условия $x_i > 0$. Сведение уравнения (5.1) к интегральному виду (5.2) исключает появление неустойчивости алгоритма при больших значениях уклона свободной поверхности воды.

Значение h_0 (глубина воды в створе входного портала) определяется из левого граничного условия.

В качестве *граничных условий* для замыкания приведенных выше конечно-разностных уравнений задаются в аналитической или графической форме модели сопряжения отдельных участков водопроводящего тракта при переходных процессах:

- сопряжение «безнапорный туннель – бассейн суточного регулирования (БСР)»;
- сопряжение отдельных (различных по параметрам поперечного сечения) участков БСР;
- сопряжение БСР и гидроагрегатного блока в створе водоприемника с учетом модели технологических режимов работы гидроагрегата, при регулировании графика нагрузки энергосистемы определяющих зависимости $Q(t)$ у водоприемника [21–26].

Моделирование процессов совместной работы системы «безнапорный туннель – бассейн суточного регулирования – гидроагрегатный блок» основано на специальном виде граничных условий, позволяющих отобразить взаимодействие не только стационарных, но и переходных гидравлических режимов этой системы.

Математическая модель узла сопряжения «безнапорный туннель – бассейн суточного регулирования»

В основу модели взаимодействия потоков в данном узле приняты зависимости для водослива с широким порогом. При этом был использован общий вид водосливной формулы, приведенной академиком Н.Н. Павловским [5]:

$$Q = \varphi b_c a_e \sqrt{2gz_0}, \quad (6)$$

где φ – коэффициент скорости;

b_c – «эффективная» ширина водослива;

a_e – возвышение низового горизонта потока над порогом;

z_0 – перепад.

Зависимость (6) дополняется первым уравнением («прямой волны») из системы (7)–(8) для узла сопряжения с БСР и вторым уравнением («обратной волны») для узла сопряжения с верхним бассейном ГЭС-1.

$$F_1 = \left[\frac{g\omega}{\alpha} \left(i_0 + \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial s} \right) \Big|_{h=\text{const}} - \frac{Q|Q|}{K^2} - c_1 \frac{\partial Q}{\partial s} + Bc_1c_2 \frac{\partial h}{\partial s} \pm \sqrt{gh} \cdot q \right]_1; \quad (7)$$

$$F_2 = \left[\frac{g\omega}{\alpha} \left(i_0 + \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial s} \right) \Big|_{h=\text{const}} - \frac{Q|Q|}{K^2} - c_2 \frac{\partial Q}{\partial s} + Bc_1c_2 \frac{\partial h}{\partial s} \pm \sqrt{gh} \cdot q \right]_1. \quad (8)$$

Динамические уровни воды в верхнем и нижнем бассейнах, влияющие на напоры и расходы воды на «водосливах», определяются на основе уравнения баланса:

$$\frac{dH_b}{dt} = \frac{1}{F_b(H_b)} (Q_b - Q_e), \quad (9)$$

где Q_b , Q_e – расход воды, поступающей в бассейн и сбрасываемой через водосбросные сооружения, соответственно;

H_b , F_b – уровень воды в бассейне и площадь зеркала воды.

Правая часть (9) формируется по графикам зависимости площади зеркала воды от уровня либо по заданным графикам связи объемов и отметок свободной поверхности в бассейнах.

Арефьев Н.В. Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

Бассейн суточного регулирования оборудован донными промывными отверстиями, позволяющими обеспечить максимальный сбросной расход $10 \text{ м}^3/\text{с}$.

При совместных расчетах волновых процессов в безнапорном туннеле и БСР моделирование условий сопряжения водоводов имеет вид:

$$\sum_i^n Q_i = 0; \quad (10)$$

$$h_i = h_{i+1} + \Delta h_{i+1}; \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (11)$$

где n – количество водоводов, соединяющихся в узле;

Q_i – расход воды i -го водовода;

h_i, h_{i+1} – глубины i -го и $i+1$ -го водоводов.

Математическая модель технологических процессов в гидроагрегатном блоке ГЭС-1 при регулировании графика нагрузки энергосистемы

Моделирование граничных условий, соответствующих работе гидроагрегатов в крупной энергетической системе, с учетом системы регулирования гидротурбины и гидрогенератора основывается на следующих зависимостях.

Уравнение движения вращающихся частей:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_a} (M_m - M_e), \quad (12)$$

$$M_T = M_T(d, n), \quad (13)$$

$$Q_T = Q(d, n), \quad (14)$$

где M_m – гидравлический вращающий момент, развиваемый турбиной;

M_e – электромагнитный момент генератора;

T_a – механическая инерционная постоянная агрегата;

d, n – диаметр струи и частота вращения турбины соответственно.

Наиболее полное уравнение регулятора турбины с воздействием по ускорению и изодромным механизмом [3]:

$$0,01T_{sl} \frac{d\xi}{dt} + (0,01T_{sl} + \delta T_i + \delta_0 T_i) \xi + \delta_0 \alpha = -T_i T_\rho \frac{d\xi}{dt} + (T_i + T_\rho) \xi + S, \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{\mu}{\mu_{\max}}; \quad \xi = \frac{d\alpha}{dt}; \quad \zeta = \frac{dS}{dt}; \quad d = d(\mu),$$

где $S = \frac{n - n_H}{n_H}$ – относительная частота вращения агрегата;

μ – ход штока сервомотора;

T_i – время изодрома;

$T_{\delta 1}$ – постоянная времени сервомотора;

T_δ – постоянная времени элемента ускорения;

δ_0 – статизм регулятора частоты вращения;

δ – временной статизм;

μ – смещение штока сервомотора направляющего аппарата.

Арефьев Н.В. Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

Величина электромагнитного момента генератора, входящая в уравнение движения (12), определяется из системы уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы генератора, который работает параллельно с мощной системой и снабжен автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) [3]:

$$\begin{aligned}
 x_q I_q + r I_d &= -U_d; \\
 x_d I_d + E_q + E_q - r I_q &= U_q; \\
 E_q' &= E_q + (x_d - x_d') I_d; \\
 M_e &= E_q I_q + (x_d - x_q) I_d I_q; \\
 \frac{dE_q'}{dt} &= \frac{1}{T_r} (E_r - E_q'); \\
 \frac{dQ}{dt} &= \omega_c S; \\
 U_q &= U_c \cos \Theta; \quad U_d = U_c \sin \Theta.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Уравнения системы регулирования возбуждения генератора записаны в виде:

$$\begin{aligned}
 \frac{dU_p}{dt} &= \frac{1}{T_p} (k \Delta k \Delta u + k' \frac{d\Theta}{dt} + k'' \frac{d^2 \Theta}{dt^2} - U_p); \quad -1 \leq U_p \leq 1; \\
 \frac{dE_r}{dt} &= \frac{1}{T_B} (E_{r0} + E_{r0} U_p - E_r); \quad -E_r \leq E_r \leq 2E_{r0}.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Сравнительно большие времена протекания рассматриваемых переходных процессов позволяют в первом приближении не учитывать успокоительных контуров гидрогенератора и пользоваться весьма упрощенной моделью автоматического регулирования возбуждения (АРВ).

Здесь x_d, x_q, x_d' – синхронные в продольной и поперечной осях и переходные индуктивные сопротивления электропередачи (включая генератор, трансформаторы, высоковольтную линию (ВЛ)); E_q и E_q' – синхронная и переходная э.д.с. генератора;

U_q, U_d, I_q, I_d – продольная и поперечная проекции векторов напряжения системы и тока генератора на осях q, d генератора;

U_p, E_r – напряжение на выходе АРВ и возбудителя генератора;

(все переменные выражены в относительных единицах).

T_r, T_p, T_B – постоянные времени обмотки возбуждения генератора, стимулирующего усилителя АРВ и возбудителя.

Расчет переходных гидравлических процессов в элементах сложных водопроводящих трактов ГЭС и ГАЭС совместно с моделированием переходных процессов в гидротурбине, гидрогенераторе и энергосистеме по предложенной методике позволяет проанализировать устойчивость работы всей гидроэнергетической установки и более надежно обосновать параметры водопроводящих трактов, систем регулирования гидротурбины и гидрогенератора.

Основные зависимости для сопряжения потоков в туннеле и в бассейне суточного регулирования при динамическом положении отметки свободной поверхности воды ниже значения 1643.0 (максимальной отметки свода выходного портала туннеля), то есть до момента занаворивания, приняты аналогично приведенным в предыдущем случае.

Арефьев Н.В. Самоорганизующиеся численные модели переходных процессов в водопроводящих гидротехнических сооружениях энергетических объектов

Для расчета случая аварийного останова агрегатов ГЭС-1 и подъема уровня воды в бассейне суточного регулирования выше отметки 1643.0 м основная модель была дополнена следующими программно реализованными блоками.

Программный блок, моделирующий закрытие аварийного затвора на выходном портале туннеля

Для моделирования варианта компоновки сооружений БСР при наличии аварийного затвора на выходном портале туннеля был разработан программный блок, который при достижении свободной поверхностью воды максимальной отметки свода туннеля автоматически заменяет текущее граничное условие истечения воды из туннеля в бассейн на граничное условие:

$$Q_{ТУН} = Q_{ТУН0} - \kappa(t - t_0), \quad (18)$$

где $Q_{ТУН}$ – текущее значение расхода воды в створе затвора при его закрытии;

$Q_{ТУН0}$ – значение расхода в створе затвора в начальный момент его закрытия t_0 ;

t – текущее время;

κ – коэффициент, определяющий время закрытия затвора.

После закрытия щита $Q_{ТУН}$ принимается равным нулю.

Расчеты заканчиваются определением длины опорожненного участка туннеля, определением длины безнапорного участка туннеля, определением длины напорного участка, а также величины максимального давления на облицовку в створе затвора.

Эти характеристики и функциональные возможности были заложены в основу численных моделей верхнего и нижнего бассейнов туннеля.

Программный блок, моделирующий занaporивание туннеля при подъеме уровня воды в бассейне суточного регулирования выше максимальной отметки свода выходного портала

Этот блок разрабатывался для оценки варианта увеличения объема БСР для минимизации холостых сбросов в процессе опорожнения туннеля при аварийном останове агрегатов ГЭС-1.

Данный программный блок работает следующим образом. При выполнении в створе выходного портала условия:

$$Z_{ТУН} < Z_{БСР}, \quad (19)$$

где $Z_{ТУН}$, $Z_{БСР}$ – максимальная отметка свода туннеля в граничном створе выходного портала и текущая отметка свободной поверхности воды в БСР, программный блок заменяет граничное условие «безнапорное истечение воды из туннеля» граничным условием «напорное истечение воды из туннеля».

При этом другой блок, отвечающий за структуру графа G, исключает из общей модели занaporиваемые створы и дуги.

В момент времени, когда выполняется условие

$$Z_{Т.БН} = Z_{БСР}, \quad (20)$$

где $Z_{Т.БН}$ – отметка свободной поверхности воды в граничном створе безнапорного участка туннеля с занaporенным участком, процесс истечения воды считается законченным, и программный блок определяет длину опорожненного участка туннеля, длину безнапорного заполненного участка, длину напорного заполненного участка, а также максимальное давление воды на облицовку туннеля в створе выходного портала.

Следует отметить, что приведенная модель граничных условий разрабатывалась с учетом возможного реверсивного движения воды в граничных участках туннеля. Так, при отметке свободной поверхности воды в бассейне, превышающей отметку поверхности воды в граничном сечении туннеля, поток направлен в туннель, в противоположном случае поток движется из туннеля.

Программный блок самоорганизации структуры компьютерной модели гидравлических режимов в водоподводящем тракте ГЭС-1 с учетом процессов опорожнения и наполнения туннеля

На данном этапе выполнения работ была осуществлена доработка математической и численной моделей неустановившегося потока воды для расчетов процессов опорожнения и наполнения туннеля, когда возникают участки «осушения дна», то есть исчезновения потока для некоторых расчетных створов модели, или, напротив, появления потока на «осушенных участках».

Поэтому в программе был разработан блок самоорганизации пространственной структуры компьютерной модели, оперативно исключающий из расчета «осушенные» створы или целые участки, а также включающий в структуру эти участки в случае появления потока.

При компьютерной реализации модели переходных гидравлических процессов в водоподводящей системе Зарамагской ГЭС-1 ее структура формировалась как упорядоченный граф $G(x, \omega)$, где $x=\{0,1,\dots,n\}$ – совокупность вершин и узлов графа. Под вершинами здесь понимаются граничные сечения водоводов, примыкающие к водоприемнику, к граничным сечениям других участков водоводов, а также к другим сооружениям на водопроводящем тракте. Несколько вершин, соединяющихся между собой, образуют узел (места развилки водоводов). ω – множество дуг, образованное отдельными участками водоподводящей системы (участками безнапорного туннеля). Дуги разбиваются на расчетные створы, расстояние между которыми определяет шаг конечно-разностной сетки численной модели для данной дуги (4)–(5). Дуги графа могут иметь как одинаковое, так и разное расстояние между расчетными створами, а также разное количество створов. Однако значительная разница величин расстояний между створами для дуг графа приводит к значительному снижению точности расчетов. В общем случае соотношение расстояний между створами отдельных дуг контролируется условием:

$$\text{Max} |L_i - L_j| \leq 0.3, \quad (21)$$

где L_i, L_j – расстояние между створами i -й и j -й дуг соответственно.

Блок самоорганизации проводит текущее упорядочивание графа G , т.е. проводит по заданным правилам нумерацию вершин узлов и дуг, а также сохраняет в «матрице памяти» установленное для G в данный момент времени определенное взаимно-однозначное соответствие между вершинами, узлами и дугами.

В процессе расчетов при «осушении» одного из створов дуги этот створ исключается из состава дуги и из структуры модели. В случае «осушения» всех створов одной дуги из текущей структуры модели исключается целиком вся дуга. Напротив, при «появлении потока» в створе дуги с «сухим дном» эта дуга включается в структуру модели и общий цикл расчетов переходных процессов.

Процесс математического моделирования гидравлических процессов по графу G включает расчет:

- начальных условий (состояния потока в нулевой момент времени);
- граничных условий (изменения характеристик потока в граничных створах);
- изменений характеристик потока во внутренних створах каждой дуги в процессе распространения возмущений.

В программном комплексе эти блоки могут работать как в автономном режиме, так и совместно.

Основные результаты расчетов

Вариантные исследования проводились для следующих основных расчетных случаев:

- 1) наполнение туннеля при пуске агрегатов головной ГЭС;
- 2) опорожнение туннеля при аварийном останове агрегатов ГЭС-1 (при установке аварийного затвора на выходном портале туннеля, промывные отверстия БСР открыты);
- 3) опорожнение туннеля при аварийном останове агрегатов ГЭС-1 (при установке аварийного затвора на выходном портале туннеля, промывные отверстия БСР закрыты);
- 4) опорожнение туннеля при аварийном останове агрегатов ГЭС-1 (аварийный затвор отсутствует, промывные отверстия БСР закрыты);
- 5) опорожнение туннеля при аварийном останове агрегатов ГЭС-1 (аварийный затвор отсутствует, промывные отверстия БСР открыты полностью с $Q_{\max} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$);
- 6) опорожнение туннеля при полном останове агрегатов головной ГЭС (агрегаты ГЭС-1 работают с максимальным расходом).

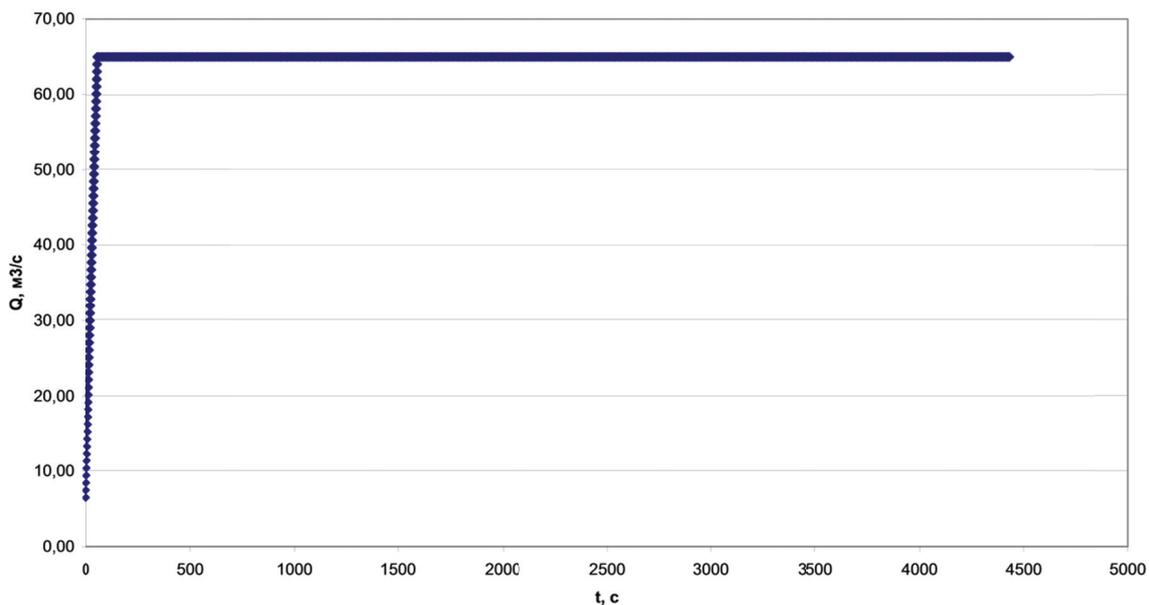


Рисунок 2. График изменения расхода в створе 0 км от входа портала при пуске агрегатов головной ГЭС

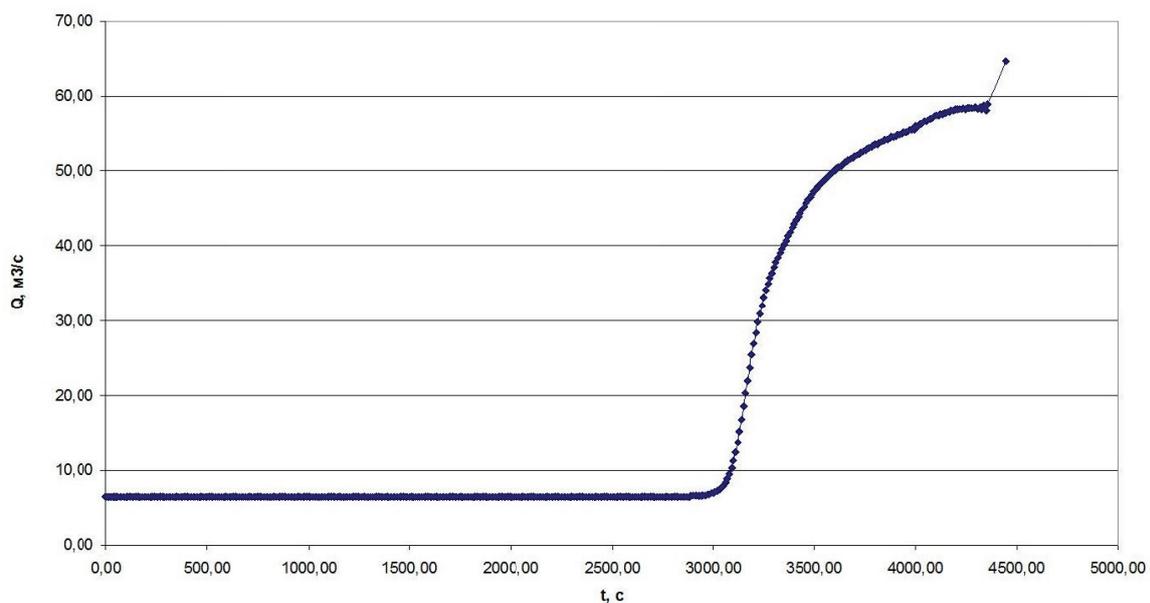


Рисунок 3. График изменения расхода в створе 14282 м от входного портала при пуске агрегатов головной ГЭС

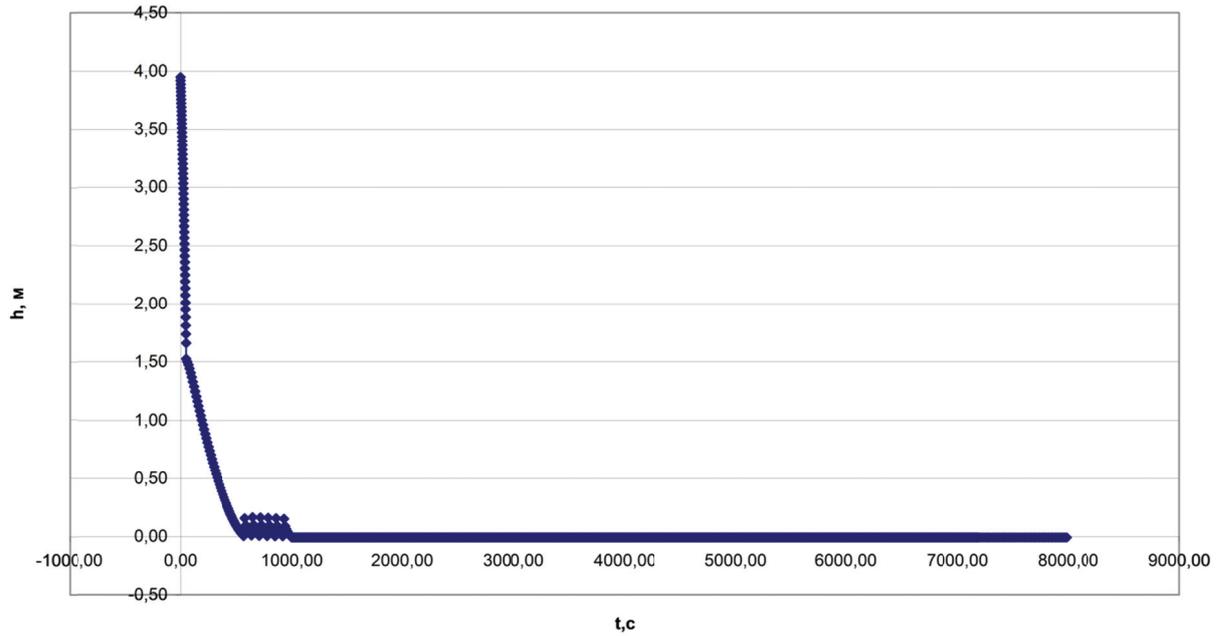


Рисунок 4. График изменения глубины в створе 0 м от входного портала в процессе опорожнения туннеля при остановке агрегатов головной ГЭС

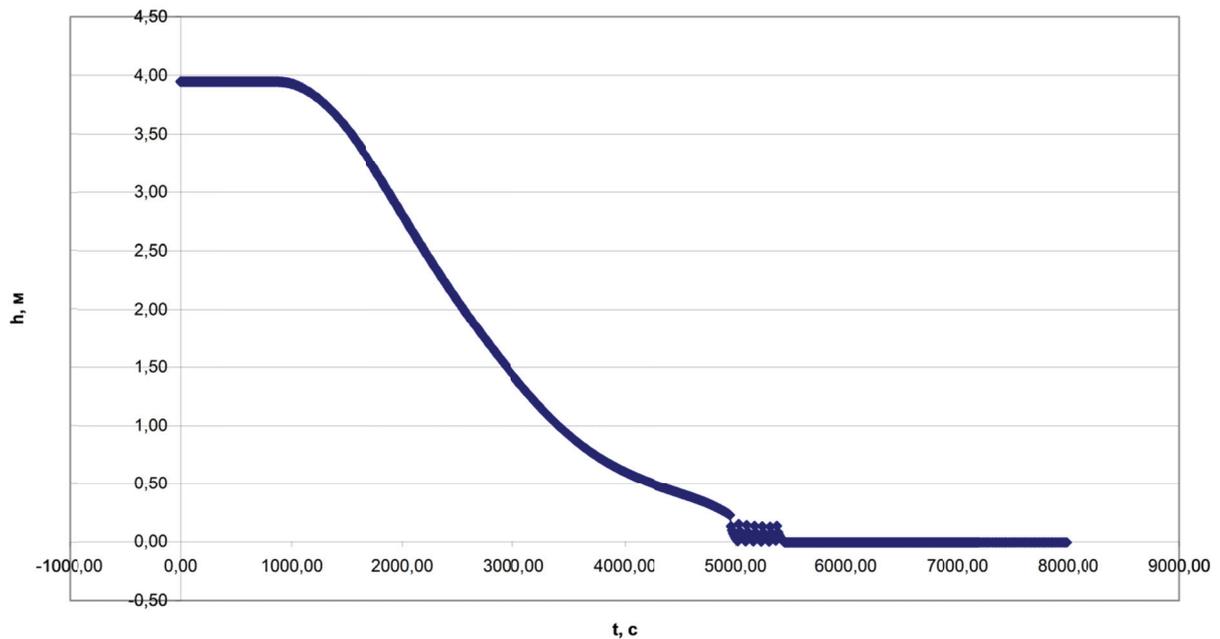


Рисунок 5. График изменения глубины в створе 8569 м от входного портала в процессе опорожнения туннеля при остановке агрегатов головной ГЭС

Заключение

Представлены результаты по разработке самоадаптирующихся комплексов численных моделей, позволяющих проводить расчеты сложных водопроводящих систем с изменяющимся режимом течения на отдельных участках (опорожнение, движение по сухому дну, занaporивание безнапорного туннеля и т. п.). Представленная система отслеживает передвижение границ области моделирования (при наполнении и опорожнении участков водоводов) и выбирает соответствующее граничное условие при изменении режима течения на границе области моделирования потока (неподтопленный водослив – подтопленный водослив).

Численное моделирование реальных систем позволяет сделать вывод о работоспособности предложенного подхода. Дальнейшее развитие комплекса численных моделей предполагается на основе интеграции комплекса и географических информационных систем [27–31]. Такая интеграция позволит сделать доступными результаты моделирования для всех участников энергетического комплекса, а также автоматически осуществлять ввод исходных данных по геометрическим характеристикам.

Литература

1. Fritz J., Nowak W., Neuweiler I. Application of FFT-based Algorithms for Large-Scale Universal Kriging Problems // *Mathematical Geosciences*. 2009. Vol. 41. Issue 5. Pp. 509–533.
2. Maßmann J., Uehara S., Rejeb A., Millard, A. Investigation of desaturation in an old tunnel and new galleries at an argillaceous site // *Environmental Geology*. 2009. Vol. 57. Issue 6. Pp. 1337–1345.
3. Millard A., Maßmann J., Rejeb A., Uehara S. Study of the initiation and propagation of excavation damaged zones around openings in argillaceous rock // *Environmental Geology*. 2009. Vol. 57. Issue 6. Pp. 1325–1335.
4. Mittendorf K. Joint Description Methods of Wind and Waves for the Design of Offshore Wind Turbines // *Marine Technology Society Journal*. 2009. Vol. 43. Issue 3. Pp. 23–33.
5. Kohlmeier M., Kossel T., Zielke W. Integrale simulationsumgebung für die dynamische analyse verschiedener OWEA-Tragstrukturkonzepte // 7 FZK-Kolloquium «Potenziale für die Maritime Wirtschaft», 2009, Hannover. URL: http://www.fzk.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/3_01_Kohlmeier_et_al.pdf (дата обращения: 03.10.2013).
6. Schneider J., Harb G., Schreiber C., Bäumel E., Lesky U., Rechberger A. EU Projekt SHARE – Entwicklung von nachhaltigen Instrumenten der Wasserkraftnutzung in den Alpen // *Wasserland Steiermark*. 2013. Issue 1. Pp. 39–43.
7. Zechner S., Jöbstl C., Knoblauch H. SUFRI – Nachhaltige Strategien für das Hochwasserschutzmanagement in Städtenzur Beherrschung des Restrisikos mit nicht-baulichen Maßnahmen // *Wasserland Steiermark*. 2012. Issue 1. Pp. 29–31.
8. Escuder-Bueno I., Castillo-Rodríguez J., Zechner S., Jöbstl C., Perales-Momparler S., Petaccia G. A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data // *Natural hazards and earth system sciences*. 2012. Vol. 12. No.9. Pp. 2843–2863.
9. Zenz G., Oberhuber P., Czerny H. The great significance of dam safety in Austria // *Geomechanics and tunnelling*. 2012. Vol. 5. Issue 5. Pp. 631–637.
10. Dobler W., Larcher M., Arch A., Zenz G. Numerische Untersuchung von Rohrströmungen am Beispiel eines Bifurkators // *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. 2010. Vol. 62. Issues 3–4. Pp. 54–57.
11. Арефьев Н.В., Соколов Б.А. Расчет гидравлического удара явным методом конечных разностей // *Труды ЛПИ*. 1978. Вып. 361. С. 30–32.
12. Арефьев Н.В. Эколого-энергетические принципы управления энергетическими системами // В кн.: *Научная школа акад. Ю.С.Васильева в области энергетики и охраны окружающей среды*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 132 с.
13. Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Б.К. Гидравлический удар и уравнивательные резервуары. М.: Наука, 1968. 248 с.
14. Соколов Б.А., Арефьев Н.В. Численное моделирование нестационарных процессов в водопроводящих трактах гидроэнергетических и водохозяйственных комплексов // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 1985. Т. 168. С. 85–93.

15. Карелин В.Я., Новодережкин Р.А. Насосные станции крупных гидротехнических систем с осевыми и диагональными насосами. М.: Энергия, 1979. 288 с.
16. Карелин В.Я., Новодережкин Р.А., Демидов В.В. [и др.] Предохранительный клапан: а.с. 1239438 СССР. Оpubл. 23.06.1986. Бюл. №23. 3 с.
17. Фаталиева И.А. Совершенствование расчета переходных процессов при впуске воды в напорные трубопроводы: Автореф.дисс....к.т.н. Москва, 2006. 154 с.
18. Указания по защите водоводов от гидравлического удара. М.: Гос. изд-во лит. по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. 226 с.
19. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
20. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
21. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М., 1985.
22. Крупные диагональные и центробежные вертикальные насосы: Каталог / ЦИНТИХМНЕФТЕМАШ. М., 1990. 28 с.
23. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия, 1967. 235 с.
24. Ищук Т.Б., Владимирова Г.И., Максимова Т.Н. Гидравлика аванкамер блочных насосных станций // В кн.: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. СПб., 1992. С. 168–173.
25. Ищук Т.Б. Гидравлика сооружений систем технического водоснабжения ТЭС и АЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1997. Т. 230. Часть 2. С. 238–351.
26. Рекомендации по проектированию и гидравлическим расчетам насосных блоков и водных трактов систем технического водоснабжения ТЭС и АЭС большой мощности. П 06-82 / ВНИИГ. Л., 1983.
27. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Латышев Н.К. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №4. С. 205–211.
28. Арефьев Н.В., Баденко В.Л. Геоинформационные системы в природообустройстве: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 108 с.
29. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Иванов Т.С. Методические аспекты геоинформационного обеспечения инвестиционных проектов по развитию гидроэнергетики России // Гидротехническое строительство. 2007. №5. С. 7–10.
30. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Управление энерговодохозяйственными системами на основе моделирования в среде ГИС // Труды СПбГТУ. 1998. №475. С. 42–47.
31. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Бассейново-ландшафтный подход к организации экологического мониторинга гидроэнергокомплексов на основе геоинформационных технологий // Гидротехническое строительство. 1998. №11. С. 25–27.

*Николай Викторович Арефьев, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)5354610; эл. почта: arefiev@cef.spbstu.ru*

© Арефьев Н.В., 2013