ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XI, № 6, 1958 Серия технических наук

ГИДРАВЛИКА

Б. Л. БУНИАТЯН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ БЕЗВОЛНОВОГО ДВИЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТОННЕЛЬ-УРАВНИТЕЛЬНАЯ БАШНЯ

Явления неустановившегося безволнового движения в системе тоннель-уравнительная башня описываются уравнением движения:

$$\frac{1}{g}\frac{dv}{dt} = \frac{dz}{dx} - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(h_w + h_c) \tag{1}$$

и уравнением неразрывности:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{S}\frac{dQ_T}{dt} + \frac{F}{S}\frac{du}{dt}, \tag{2}$$

где V — скорость движения воды в тоннеле, S — поперечное сечение тоннеля, t — время, x — элементарная длина тоннеля, z — отметка оси тоннеля над горизонтальной плоскостью сравнения, H — напор в тоннеле, Q_T — расход воды через турбины, u — скорость движения свободной поверхности воды в башне, F — поперечное сечение башни; $h_w = \frac{V^2}{2g}\xi_w$ — потери напора в тоннеле, $h_c = \frac{V^2}{2g}\xi_c$ — потери напора в соединительной патрубке-сопротивления.

В сложных системах, когда несколько башен разбивают тоннель по его длине на отдельные участки, рассматриваемые уравнения записываются в той же форме, но для каждого участка в отдельности.

При расчете уравнительной башни, ввиду неизвестности величин h_w и h_c для случая неустановившегося движения, их принимают равными таковым же при установившемся движении. При таком допущении нет уверенности в правильности получаемых результатов. Кроме того, в случае башни с сопротивлением ξ_c, вызванным гидравлическим ударом, повышение давления в трубопроводе полностью не проникает в башню и частично проскакивает в тоннель. По этой причине повышение давления у турбины получается значительно больше чем при $\xi_c = 0$. Величины повышения давления у турбины, а также подъема уровня воды в башне, зависят от значения коэффициента ξ_c, который может быть определен только опытным путем.

В ряде случаев экспериментальные исследования являются единственным средством для выбора параметров устойчивости и регулирования гидро-энергосистемы, имеющей уравнительные башни с сопротивлением. В этой связи возникает вопрос о разработке соответствующей методики моделирования явления неустановившегося движения в системе тоннель—уравнительная башня—трубопровод, чему и посвящена данная работа.

Сущность вопроса моделирования того или иного явления сводится к определению критерия подобия и безразмерных масштабных множителей для всех величин, входящих в те уравнения, которые описывают данное явление [1, 2].

Общеизвестные безразмерные соотношения:

$$\varepsilon = \frac{lSV^2}{gFh_w^2}, \quad \eta = \frac{h_c}{h_w} \text{ и } \beta_{макс} = \frac{y_{макс}}{h_w},$$

которые выведены из уравнений (1) и (2), позволяют определить максимальное повышение уровня воды в башне $y_{макс}$ в случае полного сброса нагрузки при известных значениях ε_c.

Эти соотношения не являются общими критериями подобия, поскольку они не дают возможности, во-первых, определить изменения во времени положения уровня воды в башне, во-вторых, не удовлетворяют условию геометрического подобия сооружения, ибо значение ε_c, а следовательно и h_c, зависят от геометрии системы тоннель—башня и от самого сопротивления.

Для моделирования явления необходимо получить также общие критерии подобия, на основании которых можно было бы определить значение масштабных множителей для всех геометрических и гидравлических параметров сооружения и тем самым обеспечить подобие как в отношении начального режима движения, так и кривой $y = f(t)$ с учетом влияния h_w и h_c при неустановившемся режиме.

Обозначая для краткости параметры натуры индексом (н), модели индексом (м), а отношение через α, индекс которого относится к искомой величине, из (1) и (2) получим следующие безразмерные масштабные комплексы:

$$\frac{\alpha_l \alpha_x}{\alpha_g \alpha_t \alpha_z} = 1, \tag{3}$$

$$\frac{\alpha_H \alpha_x}{\alpha_x \alpha_z} = 1, \tag{4}$$

$$\frac{\alpha_{hw} \alpha_x}{\alpha_x \alpha_z} = 1, \tag{5}$$

$$\frac{\alpha_{hc} \alpha_x}{\alpha_x \alpha_z} = 1, \tag{6}$$

$$\frac{\alpha_v \alpha_S \alpha_t}{\alpha_l \alpha_y} = 1, \tag{7}$$

$$\frac{\alpha_F \alpha_y \alpha_S \alpha_t}{\alpha_l \alpha_t \alpha_y} = 1, \tag{8}$$

которые при $x = vt$, $h = \frac{v^2}{2g}$, $i_{тр} = \frac{h_w}{x}$, $i_0 = \frac{z}{x}$, $\alpha_1 = 1$ приводятся к трем критериям подобия:

$$\frac{v^2}{g} = Fr \text{ — критерий Фруда,}$$

$$\frac{vt}{x} = H_0 \text{ — критерий одновременности,}$$

$$\frac{i_{тр}}{i_0} = E_i \text{ — критерий трения}$$

и равенству масштабных множителей

$$\alpha_x = \alpha_{h_w} = \alpha_{h_l} = \alpha_l = \alpha_z, \tag{9}$$

т. е. модель геометрически не искажается, и при $\alpha_g = 1$ из (3) получим: $\alpha_v = \alpha_t$.

Заменяя в (3) $\alpha_x = \alpha_v \alpha_t$, будем иметь $\alpha_v = \sqrt{\alpha_x}$, следовательно $\alpha_t = \sqrt{\alpha_x}$.

Согласно условию (9) из соотношения (7) при $\alpha_x = \alpha_t^2$ находим: $\alpha_Q = \alpha_x^{5/2}$, а из (8) при $\alpha_Q = \alpha_v \alpha_\omega$, $\alpha_\omega = \alpha_x^2$ получим: $\alpha_v = \alpha_u$ и

$$\frac{\alpha_u \alpha_t}{\alpha_v \alpha_t}. \tag{10}$$

Обозначим высоту подъема уровня воды в башне над статическим горизонтом в водохранилище через $y = ut$ или $\alpha_y = \alpha_u \alpha_t$, и учитывая, что в начальный момент неустановившегося режима горизонт воды в башне находится ниже статического на величину h_w, и для подъема уровня до статического нужно некоторое время $t_{wh} = \frac{h_w}{u}$ или

$$\alpha_{hw} = \alpha_u \alpha_t, \tag{11}$$

то из (10) получим: $\alpha_h = \alpha_y = \alpha_x$.

Как видно, для моделирования данного явления необходимо соблюсти критерии Fr, E_i и H_0 для тоннеля.

Нетрудно видеть, что эти критерии получены из уравнения (1), которое описывает неустановившийся режим движения в тоннеле и элемент башни не находит в них отражения. Уравнение же (2) связывает расход воды в тоннеле с расходом в башне и из него никакие критерии не следуют. Следовательно, полученные критерии подобия и масштабные соотношения справедливы для всех возможных уравнительных башен.

Полученные масштабные комплексы дают возможность определить масштаб для пересчета коэффициента шероховатости n с натуры на модель.

Пользуясь общеизвестной формулой гидравлики, для уклона трения напишем:

$$\alpha_{i\,тр} = \frac{\alpha_v^2}{\alpha_c^2 \alpha_R} = \frac{\alpha_z}{\alpha_l}. \tag{12}$$

Производя замену $\alpha_R = \alpha_z$, получим:

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{\alpha_l}{\alpha_z}}, \tag{13}$$

откуда при соблюдении условия (9) будем иметь:

$$\alpha_c = 1, \; \alpha_{i\,тр} = 1, \; \alpha_n = \alpha_z^{1/6}. \tag{14}$$

Таким образом получаем масштабные множители для всех величин, входящих в уравнения (1) и (2), а также и масштаб для коэффициента шероховатости тоннеля, что обеспечивает условия моделирования явления без искажения модели.

При таком моделировании, когда $\alpha_{i\,тр} = 1$ и $\alpha_c = 1$, т. е. в случае геометрически искаженной модели, практически не удается удовлетворить критерию трения (2), ибо физически невозможно создать требуемую, согласно выражению (14), гладкость поверхности модели, имеющую коэффициент шероховатости

$$n_м = \frac{n_н}{\alpha_z^{1/6}}.$$

Поэтому приходится принять $\alpha_n \neq \alpha_z^{1/6}$, т. е. $n_м < \frac{n_н}{\alpha_z^{1/6}}$, где индекс (н) относится к натуре, а индекс (м) – к модели. В этом случае, исходя из набора орных условий, задаем $n_м$ и α_z и, зная $n_н$ и $C_н$, определяем $\alpha_c = C_н/C_м$.

Подставляя найденное α_c в (13), находим $\alpha_l = \alpha_z \alpha_c^2$, т. е.

$$\alpha_l \neq \alpha_z. \tag{15}$$

Как видно, для удовлетворения критерию трения необходимо модель исказить по длине. При таком искажении из комплекса (3) находим

$$\alpha_t = \frac{\alpha_v \alpha_x}{\alpha_z}, \tag{16}$$

или, заменяя $\alpha_x = \alpha_v \alpha_t$, получим:

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_z}. \tag{17}$$

Подставляя (17) в (16), будем иметь:

$$\alpha_t = \frac{\alpha_x}{\sqrt{\alpha_z}}. \tag{18}$$

Из (4), (5) и (6) определяем:

$$\alpha_н = \alpha_э = \alpha_{kw} = \alpha_{kr}, \; \alpha_v = \sqrt{\alpha_z},$$

и из (7) и (8) находим $\alpha_q = \alpha_z^{2}$, $\alpha_u = \sqrt{\alpha_z}$.

Из условия $\alpha_{h\alpha} = \alpha_u \alpha_{th\alpha} = \alpha_z$ получим:

$$\alpha_{th\alpha} = \sqrt{\alpha_z}, \tag{19}$$

а для $\alpha_y = \alpha_u \alpha_t$ из (8) с учетом (18) находим

$$\alpha_y = \alpha_x. \tag{20}$$

Поскольку $\alpha_x \neq \alpha_z$, то $\alpha_{h\alpha} \neq \alpha_y$, т. е. в одном и том же направлении для двух линейных величин мы получили два разных масштаба $\alpha_{h\alpha}$ и α_y с разными масштабами для времени. Следовательно, при повышении уровня воды в башне от первоначального до статического, т. е. в пределах h_{α}, координаты кривой подъема уровня воды в натурной башне и напора в конце тоннеля будут:

$$H_н = H_м \alpha_z, \quad t_н = t_м \sqrt{\alpha_z}. \tag{21}$$

а над статическим, т. е. в пределах y,

$$y_н = y_м \alpha_y, \quad t_н = t_м \frac{\alpha_x}{\sqrt{\alpha_z}}. \tag{22}$$

Имея опытные кривые изменения отметки уровня воды в башне и напора в конце тоннеля, в зависимости от времени, по формулам (21) и (22) легко пересчитать и построить подобную же кривую для натуры.

Из формул (21) и (22) следует, что горизонтальная линия статического напора, пересекая кривую подъема уровня, разбивает ее на две части, для которых должно быть соблюдено условие неразрывности в следующем виде:

$$V S = F u = F \frac{y}{t},$$

или

$$\alpha_v \alpha_z^2 = \alpha_z^2 \frac{\alpha_y}{\alpha_t}. \tag{23}$$

При $\alpha_v = \sqrt{\alpha_z}$ в точке пересечения, с одной стороны, имеем $\alpha_y = \alpha_H = \alpha_z$ и $\alpha_t = \sqrt{\alpha_z}$, а с другой стороны, $\alpha_y = \alpha_x \neq \alpha_z$ и $\alpha_t = \alpha_x / \sqrt{\alpha_z}$. Подставив эти значения в (23), увидим, что условия неразрывности соблюдаются, следовательно, имея из экспериментов кривые изменения отметок уровня воды в башне и напоров в конце тоннеля во времени, по формулам (21) и (22) легко пересчитать и построить подобную же кривую для натуры.

В случае башни сложной конфигурации, например в башне с несколькими камерами, при определении геометрических параметров модели следует принять масштаб для поперечного сечения $\alpha_F = \alpha_z^2$, а масштаб для высоты $\alpha_h = \alpha_z$. При этих условиях будет обеспечено геометрическое подобие башни.

В случае башни с сопротивлением возникает вопрос о моделировании гидравлического удара в системе, с целью определения величины проскока давления в тоннеле и изменения давления у турбины. Для решения этой задачи рассмотрим систему, состоящую из трех труб, с разными характеристиками, соединенных друг с другом в одном створе.

По теории моделирования гидравлического удара, разработанной И. В. Егиазаровым [3] из основных дифференциальных уравнений гидравлического удара, для каждой из этих труб получается:

$$\frac{\alpha_v \alpha_x}{\alpha_g \alpha_t \alpha_y} = 1, \tag{24}$$

$$\frac{\alpha_a^2 \alpha_v \alpha_t}{\alpha_g \alpha_x \alpha_y} = 1, \tag{25}$$

где α_y — масштабный множитель для понижения напора.

α_a — масштабный множитель скорости распространения ударной волны.

Из условия моделирования явления колебаний уровня воды в башне, принимая $\alpha_v = \alpha_{hw} = \sqrt{\alpha_z}$, из (24) и (25) получим:

$$\alpha_y = \alpha_x, \quad \alpha_a = \frac{\alpha_x}{\sqrt{\alpha_z}}, \tag{26}$$

где для тоннеля $\alpha_x \neq \alpha_z$.

Для трубопровода и башни, где $\alpha_x = \alpha_z = \alpha_{hw}$ из (26) получим:

$$\alpha_y = \alpha_{hw}, \quad \alpha_a = \sqrt{\alpha_h}.$$

Таким образом, для моделирования гидравлического удара в системе тоннель—башня—трубопровод в условиях $\alpha_t = \sqrt{\alpha_h}$, необходимо скорость распространения волны давления a в соответствующих трубах при неискаженной модели уменьшить в $\alpha_a = \sqrt{\alpha_l}$ раз, а при искаженной по длине модели уменьшить в $\alpha_a = \alpha_x/\sqrt{\alpha_z}$ раз.

Из выведенных формул видно, что для моделирования гидравлического удара необходимо иметь возможность на модели получить скорость a во много раз меньшую, чем в натуре.

Вопрос искусственного снижения скорости a изложен в работе [4], где приводится доказательство того, что путем ввода в трубопровод упругого элемента в виде резинового шланга, наполненного воздухом, можно скорость a снижать в довольно широких пределах и тем самым обеспечить условия моделирования гидравлического удара.

Отметим, что поскольку поперечные размеры тоннеля и башни, а также местного сопротивления, геометрически не искажены, то значения ξ_r для натуры и для модели будут одинаковыми, т. е. $\xi_{н} = \xi_{м}$, Таким образом, путем искажения модели только по длине тоннеля и снижения скорости a можно удовлетворить всем критериям подобия и получить значения масштабных множителей для всех геометрических и гидравлических параметров системы.

По полученным масштабным множителям можно все проектные параметры сооружения перенести на модель, и в лаборатории получить все параметры неустановившегося движения, в системе сооружений натурной гидроэлектростанции, с учетом влияния h_w и h_c при неустановившемся режиме.

Водно-энергетический институт
Академии наук Армянской ССР

Поступило 2 VII 1957

Բ. Լ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ

ԹՈՒՆԵԼ-ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՌՈՂ ԱՇՏԱՐԱԿ ՍԻՍՏԵՄՈՒՄ ՉՀԱՍՏԱՏՎԱԾ, ՈՉ ԱԼԻՔԱՅԻՆ ՇԱՐԺՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՄՈԴԵԼԱՑՈՒՄԸ

Ամփոփում

Հավասարակշռիչ աշտարակները հաշվելիս ընդունում են, որ չհաստատված շարժման ռեժիմում ճնշման կորուստները թունել-աշտարակ սիստեմում ունենում են նույն անալիտիկ արտահայտությունը, ինչ որ հաստատված շարժման դեպքում։ Այդպես ընդունելիս մենք չգիտենք թե ինչպիսի սխալ ենք կատարում և հաշվային արդյունքները որքանով են համապատասխանում իրականությանը. բացի այդ, երբ հեղուկի հոսանքի՝ թունելից աշտարակ անցնելու ճանապարհին կա մի որևէ տեղական դիմադրություն, ապա այդպիսի կառուցվածքային սիստեմը հաշվելու համար անհրաժեշտ է ունենալ նրա տեղական դիմադրության ξ գործակցի արժեքը, որը կարելի է որոշել միմիայն երևույթի մոդելացման ու լաբորատոր փորձեր կատարելու միջոցով։

Այդ նպատակով, ելնելով երևույթին արտահայտող (1) և (2) հավասարումներից, հոդվածում ստացվել են նրա մոդելացման համար անհրաժեշտ բոլոր չափանիշները, որոնք հնարավորություն են տալիս գտնելու կառուցվածքի և հիդրավլիկական բոլոր մեծությունների մասշտաբային բազմապատկիչները։

Այդ մասշտաբային բազմապատկիչները և կառուցվածքի նախագծային տվյալներն ունենալով կարելի է ընտրել մոդելի չափերը ու նրա հիդրավլիկական մեծությունները, և մոդելային փորձերի միջոցով ստանալ չհաստատված շարժման բոլոր հիդրավլիկական մեծությունների փոփոխությունները ըստ ժամանակի։ Երևույթի մոդելացման այդ ձևը հնարավորություն է տալիս հաշվի առնելու h_w և h_c ճնշման կորուստները չհաստատված շարժման ռեժիմում, որի շնորհիվ մոդելից ստացված արդյունքները լիովին կհամընկնեն իրականին։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кирпичев М. В.* Теория подобия. „Известия АН СССР", 1953.
2. *Егиазаров И. В.* Теория подобия и применение законов подобия к явлениям неустановившегося движения. „Известия АН Армянской ССР", № 3, 1947.
3. *Егиазаров И. В.* Моделирование явлений неустановившегося волнового движения безнапорного и напорного потока. „Известия ОТН АН СССР", № 10, 1953.
4. *Буниатян Б. Л.* и *Зорян З. А.* Искусственное уменьшение скорости распространения волны давления гидравлического удара в целях его моделирования. „Известия ОТН АН Армянской ССР", № 4, 1956.