

## ГИДРАВЛИКА

Б. Л. БУНИАТЯН

ОБ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ В ТРУБОПРОВОДЕ  
ПОСЛЕ ЕГО РАЗРЫВА

## В в е д е н и е

В практике эксплуатации ГЭС известен ряд случаев разрыва напорных трубопроводов, что наносило большой ущерб станциям, вплоть до их разрушения. Эти разрывы являются следствием того, что трубопровод подвергается воздействию динамических сил. По этой же причине развитие аварии происходит за весьма малый промежуток времени, в результате чего расход воды через место разрыва  $Q_p$  достигает значительной величины.

С целью предотвращения катастрофического развития аварии и быстрого прекращения поступления воды из напорной камеры в трубопровод существует несколько способов. Эти способы основаны на использовании изменения перепада давления или скоростного напора между двумя или тремя сечениями трубопровода в случае его разрыва. Однако определение этих перепадов невозможно.

Несмотря на то, что вопрос разработки рациональных методов предотвращения катастрофических последствий разрывов имеет значительную давность, тем не менее, до сих пор нет общего решения задачи и не ясно как изменяется гидравлическая картина движения потока в трубопроводе при его разрыве. Без этого нет возможности получить характеристики защитных устройств.

Если процесс разрыва трубы протекает быстро, то в трубопроводе возникает неустановившееся движение воды [1], так как на участке трубы выше места разрыва расход во времени увеличивается, а на нижнем участке—уменьшается. В какой то момент наступает новый установившийся режим, при котором на первом участке расход будет  $Q_1 > Q_0$ , а на втором участке  $Q_2 < Q_0$ , где  $Q_0$ —начальный расход в трубопроводе до разрыва. Исследование указанного выше неустановившегося режима является самостоятельной задачей и здесь этот вопрос не рассматривается. В данной работе делается попытка установить только связь между величинами  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_p$  при новом установившемся режиме, а также получить расчетные формулы для построения пьезометрической линии при заданных значениях  $Q_0$  и  $Q_1$ .

*Определение падения давления в трубопроводе  
ниже створа разрыва.*

Рассмотрим трубопровод, для которого изменение коэффициента сопротивления  $\xi$  по его длине известно (рис. 1). При отсутствии раз-

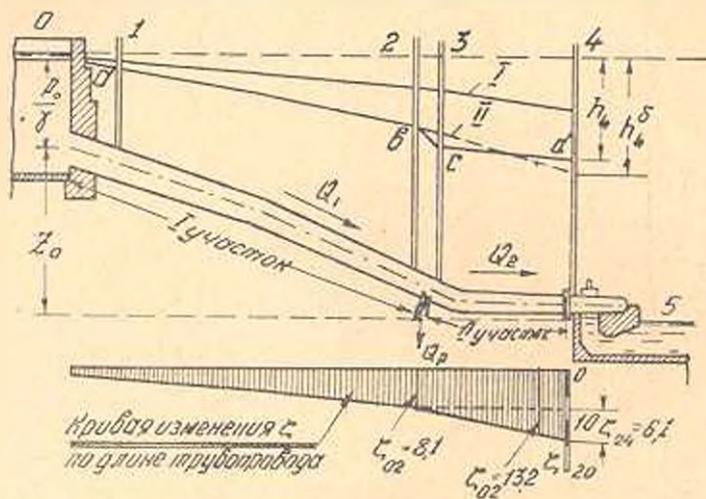


Рис. 1. Схема установки трубопровода с расположением пьезометров.

рыва, пьезометрическая линия, отвечающая известной формуле

$$h = \frac{v_0^2}{2g} (\xi + 1) = \frac{v_0^2}{2g} k, \quad (1)$$

представляется линией I на рис. 1, для которой  $k = \text{const}$  и не зависит от  $v_0$ . При увеличении скорости  $v_0$  до  $v_1$ , вызванное увеличением нагрузки на станции пьезометрической линией будет уже линия—II, при которой в пьезометре 4 получим  $h_4^6$ . Если это увеличение скорости является следствием разрыва трубы в створе между пьезометрами 2 и 3, то на первом участке трубы пьезометрической линией будет линия  $ab$ , для которой  $k = \text{const}$ . На участке между пьезометрами 2 и 3 пьезометрической линией будет линия  $bc$ , а на втором участке—линия  $cd$ , для которых  $k \neq \text{const}$ , а зависит от  $v_1$ ,  $v_2$  и  $Q_p$ , в результате чего вместе  $h_4^6$  получим  $h_4$ . По мере увеличения  $Q_p$  значения коэффициента  $k$  для пьезометра 3— $k_{03}$ , а для пьезометра 4— $k_{04}$  увеличивается. Следовательно, по формуле (1) нельзя построить пьезометрическую линию для нижнего участка трубопровода, поскольку она не учитывает ту часть энергии, которую несет расход  $Q_p$ , ибо по закону сохранения энергии на первом и на втором участках трубы имеем:

$$E_1 = E_0 + E_p, \quad (2)$$

где  $E_p = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}$  — удельная энергия, соответствующая расходу  $Q_p$ .

При разрыве трубопровода, на участке 2—3 потери напора будет:

$$h_{23} = E_p + \frac{v_2^2}{2g} \xi_{2 \text{ из}} + \frac{v_2^2}{2g} \xi_{23} + \frac{1}{2} \left( \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \right) \xi_{23}, \quad (3)$$

где  $\xi_{23}$  — коэффициент сопротивления на разорванном участке трубопровода до возникновения разрыва, принимаемый неизменным при разрыве;

$\xi_{2 \text{ из}}$  — коэффициент сопротивления, учитывающий изгиб и деление расхода  $Q_2$  на  $Q_1$  и  $Q_p$  и являющийся переменной величиной, определяемой экспериментально.

Зависимости между коэффициентом  $\xi_{2 \text{ из}} = 2gh_{23}/v_2^2$  и отношением  $Q_p/Q_2$ , а также между коэффициентом  $\xi_{1 \text{ из}} = 2gh_{13}/v_1^2$  отношением  $Q_p/Q_1$ , полученные в результате наших экспериментов, приведены на рис. 2.

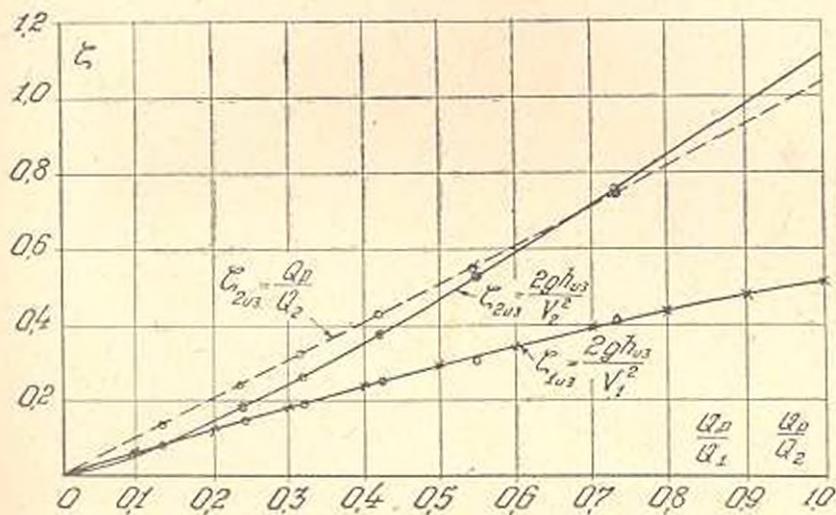


Рис. 2. Кривые зависимости между  $\xi_{2 \text{ из}}$ ,  $\xi_{1 \text{ из}}$  и расходов  $Q_p$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ .

Для установления зависимости между  $Q_1$ ,  $Q_2$  и падением давления в любом створе второго участка трубы при заданных значениях  $Q_p$ , напишем уравнения Бернулли для створов 0—4 (рис. 1) с учетом (3).

Решая совместно эти уравнения, получим:

$$\begin{aligned} z_0 + \frac{P_0}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \xi_{01} + \frac{v_1^2}{2g} \xi_{23} + \frac{1}{2} \left( \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \right) \xi_{23} + \\ + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g} + \xi_{23} \frac{v_2^2}{2g} = \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\xi_{01}$  и  $\xi_{31}$  — коэффициенты сопротивления трубопровода на участках 0—2 и 3—4 и для данного трубопровода величины постоянные.

Из уравнения (4) получим падение давления в пьезометре 4:

$$h_4 = \frac{v_1^2}{2g} \left( \xi_{34} + \frac{\xi_{23}}{2} + 1 \right) + \frac{v_2^2}{2g} \xi_{34} + \frac{v_1^2}{2g} \xi_{2 \text{ из}} + \frac{v_1^2}{2g} \frac{\xi_{23}}{2} = \frac{v_1^2}{2g} k_{04}, \quad (5)$$

где

$$k_{04} = \frac{v_1^2}{v_2^2} \left( \xi_{34} + \frac{\xi_{23}}{2} + 1 \right) + \xi_{34} + \xi_{2 \text{ из}} + \frac{\xi_{23}}{2} = (\xi_{04} + 1), \quad (6)$$

и в пьезометре 3:

$$h_3 = \frac{v_2^2}{2g} \left( \xi_{03} + \frac{\xi_{23}}{2} - 1 \right) + \frac{v_1^2}{2g} \xi_{2 \text{ из}} + \frac{v_1^2}{2g} \frac{\xi_{23}}{2} = \frac{v_1^2}{2g} k_{03}, \quad (7)$$

где

$$k_{03} = \frac{v_1^2}{v_2^2} \left( \xi_{03} + \frac{\xi_{23}}{2} + 1 \right) + \xi_{2 \text{ из}} + \frac{\xi_{23}}{2} = (\xi_{03} + 1). \quad (8)$$

Пользуясь рис. 2, при заданном  $Q_p$  по формулам (6) и (8) легко определяем  $k_{04}$  и  $k_{03}$ , а затем по формулам (5) и (7)  $h_4$  и  $h_3$ , если известны  $v_1$  и  $v_2$  или  $Q_1$  и  $Q_2$ .

#### Определение расходов $Q_1$ и $Q_2$ .

При отсутствии разрыва статический напор установки равен:

$$H_0 = H_T + (\xi_{T0} + \xi_{04}) \frac{v_0^2}{2g}, \quad (9)$$

где  $H$  — напор у турбины;

$\xi_T$  — к. п. д. турбины;

$\xi_{T0}$  — коэффициент сопротивления турбины.

Если обозначить потери напора в трубопроводе через  $h_{T0}$ , а потери напора в турбине через  $h_{T0}$ , то на основании (9) суммарные потери будут:

$$H_0 - H_T = H_{T0} = h_{T0} + h_{T0} = (\xi_{T0} + \xi_{04}) \frac{v_0^2}{2g}.$$

Отсюда

$$\varphi_0 = \frac{V \sqrt{2gH_{T0}}}{V \sqrt{\xi_{T0} + \xi_{04}}} = \varphi \sqrt{2gH_{T0}}, \quad (10)$$

где коэффициент сопротивления турбины — задвижки  $\xi_{T0}$  определяется при подстановке в формулу (10) значений  $v_0$ ,  $H_{T0}$  и  $\xi_{04}$ , которые имеют место до возникновения разрыва. Обычно станция работает в энергосистеме, поэтому предполагаем, что при разрыве трубопровода открытие турбины не изменяется. Следовательно,  $\xi_{T0} = \text{const}$ , а  $\xi_{04}$  увеличивается согласно уравнению (6). Увеличение  $\xi_{04}$  приводит к уменьшению  $\varphi$  входящее в формулу (10), что вызовет уменьшение  $v_0$ .

Аналогично тому, как это было сделано при выводе формулы (5) напишем уравнение Бернулли для створов 0—5 и включим в последнее из них потери в турбине. Решая эти уравнения совместно, получим:

$$H_T = \frac{v_1^2}{2g} \left( \xi_{02} + \frac{\xi_{23}}{2g} \right) + \frac{v_2^2}{2g} \left( \xi_{31} + \xi_{2 \text{ из}} + \xi_{70} + \frac{\xi_{23}}{2} \right) + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} (\xi_{04} + \xi_{70}),$$

где

$$\xi_{04} + \xi_{70} = \frac{v_1^2}{v_2^2} \left( \xi_{02} + \frac{\xi_{23}}{2} + 1 \right) + \xi_{31} + \xi_{70} + \xi_{2 \text{ из}} + \frac{\xi_{23}}{2} - 1. \quad (11)$$

Решая совместно уравнения (10) и (11) и учитывая  $v_1 = \frac{Q_1}{F}$ .

$v_2 = \frac{Q_2}{F}$ , получим:

$$Q_2 = \frac{F \sqrt{2gH_{70}}}{\sqrt{\xi_{70} + \left( \frac{Q_2 + Q_p}{Q_2} \right)^2 \left( \xi_{02} + \frac{\xi_{23}}{2} + 1 \right) + \xi_{31} + \xi_{2 \text{ из}} + \frac{\xi_{23}}{2} - 1}}. \quad (12)$$

Обычно  $\xi_{2 \text{ из}}$  весьма мала по сравнению с остальными членами знаменателя формулы (12), и в практических расчетах ею можно пренебречь или согласно рис. 2 без заметной ошибки принять

$$\xi_{2 \text{ из}} = \frac{Q_p}{Q_2}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), после несложных преобразований, получим:

$$Q_2 = \frac{Q_p (2\xi_{02} + \xi_{23} + 3)}{2(\xi_{70} + \xi_{04})} \pm \sqrt{\left[ \frac{Q_p (2\xi_{02} + \xi_{23} + 3)}{2(\xi_{70} + \xi_{04})} \right]^2 + \frac{2gH_{70}F^2 - Q_p^2 \left( \xi_{02} + \frac{\xi_{23}}{2} + 1 \right)}{(\xi_{70} + \xi_{04})}}. \quad (14)$$

Если известно место разрыва и начальные режимы движения в трубопроводе, то по формуле (14) можно определить  $Q_2$  при разных значениях  $Q_p$ .

Выведенные формулы подверглись экспериментальной проверке на трубопроводе диаметром 0,13 м, вдоль которого коэффициент сопротивления меняется согласно данным рис. 1. При начальном режиме, т. е. при отсутствии разрыва, когда имеем  $v_0 = 0,735$  м/сек,  $H = 2,75$  м, по формулам (9) и (10) при  $\xi_{04} = 14,2$ , получаем  $\xi_{70} = 85,8$ .

При этих данных в случае разрыва, в месте, где  $\xi_{04} = 13,2$ ,  $\xi_{02} = 0,14$ ,  $\xi_{31} = 0,81$  формула (14) примет вид:

$$Q_2 = -0,147 Q_p \pm \sqrt{(0,147 Q_p)^2 + \frac{0,0095 - 14,3 Q_p^2}{100}}.$$

В случае разрыва трубопровода в месте, где  $\xi_{02} = 8,1$ ,  $\xi_{23} = 0,1$ ,  $\xi_{31} = 6,0$  имеем:

$$Q_2 = -0,096 Q_p \pm \sqrt{(0,096 Q_p)^2 + \frac{0,0095 - 9,1 Q_p^2}{100}}.$$

Задавая значения  $Q_p$ , определяем  $Q_2$ , а затем по уравнению неразрывности  $Q_1 = Q_2 + Q_p$  находим  $Q_1$ , после чего по формулам (6) и (8) находим  $k_{04}$  и  $k_{03}$ .

Результаты этих подсчетов представлены на рис. 3, где сплошные линии относятся к случаю разрыва, в месте, где  $\xi_{02} = 13,2$ , а пунктирные линии — к случаю разрыва в месте, где  $\xi_{02} = 8,1$ . На этом же рисунке крупными точками нанесены данные экспериментов.

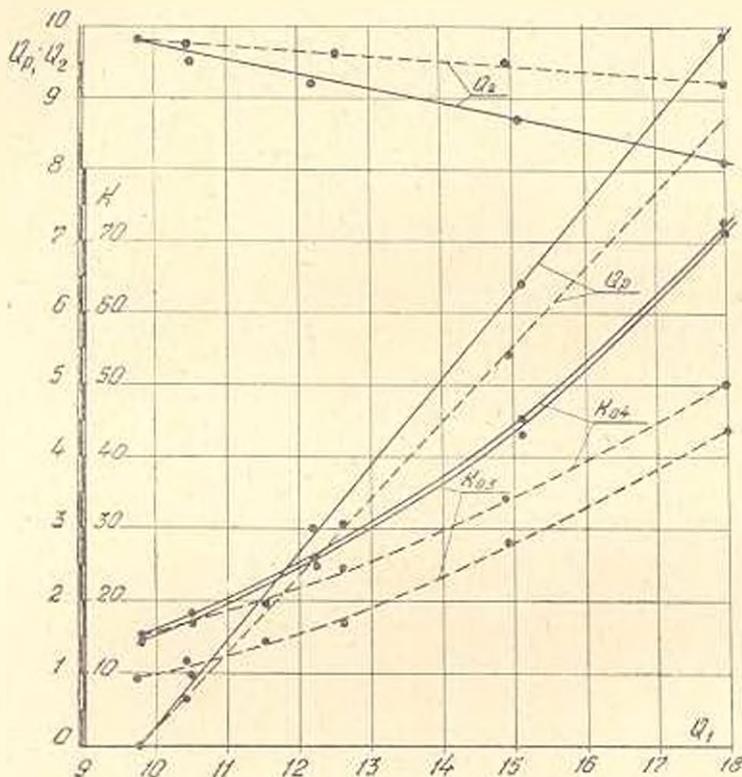


Рис. 3. Сопоставление результата расчетов с экспериментами.

Как видно из рис. 3, результаты экспериментов и расчетов хорошо согласуются. Кроме того, по мере увеличения  $Q_p$ ,  $Q_1$  увеличивается, а  $Q_2$  уменьшается. При изменении места разрыва, но сохранении того же значения  $Q_p$ , соотношение между  $Q_1$  и  $Q_2$  изменяется. Во всех этих случаях расход  $Q_1$  значительно больше изменяется, чем расход  $Q_2$ , то есть при больших значениях  $Q_p$ ,  $Q_2$  уменьшается очень мало.

Таким образом, имея размеры трубопровода и расход через него до возникновения разрыва, по формулам (14), (5), (6), (7) и (8) можно определить расходы в трубопроводе выше и ниже створа разрыва, а также напор у турбины и построить пьезометрическую линию по всей длине трубопровода, то есть определить все гидравлические параметры трубопровода и мощность турбины при новом установившемся режиме.

На рис. 3 видно, что при увеличении расхода  $Q_1$  от  $Q_1 = Q_0$  до  $Q_1 = 1,7 Q_0$ ,  $Q_2$  уменьшается всего на 4%, следовательно в этих пределах без заметной ошибки можно принять  $Q_2 = \text{const}$  и определить изменение во времени  $Q_1$ .

Выведенные расчетные формулы дают возможность, с достаточной точностью, определять гидравлические параметры трубопровода после его разрыва в любом месте, установить качественные и количественные характеристики защитных устройств, основанных на изменении перепада давления между отдельными сечениями трубопровода, а также уточнить условия их практического применения. Эти же формулы позволяют произвести анализ новых дифференциальных схем защитных устройств, предназначенных для быстрого прекращения поступления воды из напорной камеры в трубопровод.

Водно-энергетический институт

АН Армянской ССР

Поступило 13 IV 1957

Ր. Լ. ԲԱՆՆԻՔՅԱՆ

ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ԵԱՐԺՈՒՄԸ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱԿՐՈՒՄ ԵՐԱ ՊԱՏՈՎԵԼՈՒՅ ՀՆՏՈ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Նիդրոփալանի ճնշման խողովակաշարի պատուվելու հետևանքով առաջացած աղետները կանխելու համար անհրաժեշտ է ջրի մուտքը զեպի խողովակաշար արուղի փակել: Այդ իրադարձելու նպատակով նախկինում առաջարկվել են մի շարք մեխոդներ, որոնք հիմնված են խողովակի պատմաման զեպում, նրա մեջ առաջացած ճնշման, կամ հոտոդ ջրի արագության փոփոխությունների օգտագործման վրա:

Չնայած նրան, որ ինչպես հիշյալ մեխոդները, այնպես էլ նոր, ավելի կատարելագործված մեխոդների մշակման հարցը ունի բավականի մեծ վաղեմություն, բայց, այնուամենայնիվ, այն զեպ մնում է չլուծված և նույնիսկ պարզ չէ. թե խողովակաշարի պատուվելուց հետո նրանում ինչպիսի հիդրավիկական փոփոխություններ են առկա ունենում:

Սույն հոդվածում նպատակ է դրվում որոշել խողովակաշարի պատուված հատվածից վերին և ներքին մասերում եղած ջրի ելքերը, կառուցել ճնշման կ որը ամբողջ նրա երկարությունը և գտնել մյուս բոլոր հիդրավիկական մեխոդներին ապրկատի հոդրությունը, խողովակաշարի պատուվելուց հետո նրանում ստեղծված նոր հաստատված շարժման ուղիները:

Դրված խնդրի լուծման համար, հոդվածում կիրառելով ելքերի և նրանց էներգիաների անխզելիություն օրենքը Թերնուլլիի հավասարման միջոցով արժարժվել են (5), (6), (7), (8) և (12) բանաձևերը, որոնցով կարելի է խողովակաշարի ցանկացած հատվածի պատուվելու և նրանից պարս ժաշկբրած որոշակի ելքի զեպում գտնել խողովակաշարի երկու մասերում եղած ելքերը և կառուցել ճնշման կ որը նրա ամբողջ երկարությունը:

Հիշյալ բանաձևերից ստացված հաշվալին արժեքների նշորոտությունը ստուգելու նպատակով կատարված են լաբորատոր փորձեր, որոնցից ստացված արդյունքները համեմատվել են հաշվալիների հետ: Այդ համեմատությունը ցույց է տվել, որ 3-ամ. որոնցից երեւո՞ւմ է, որ փորձից ստացված արդյունքները (կետերը) լիովին համընկնում են հաշվալին արդյունքների (կորերի) հետ, հետևաբար, առաջարկվող բանաձևերը կարելի է կիրառել պրակտիկ հաշվումների համար:

Որոշելով այդ հիշքերն ու նշման կորը, կարելի է գտնել խողովակաշարի ցուրր հիդրավլիկական մեծություններն ու պրեզատի հզորությունը և գնահատել խողովակաշարի արագ փակման այս կամ այն մեթոդը, բացահայտելով նրանց աշխատանքային ընդլիճն ու գործողության սահմանները:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мостков М. А. Некоторые задачи разрыв в трубопроводе. Труды Энергетического института АН Грузинской ССР. Вып. XIX, Тбилиси, 1953.