

защитные сооружения, адаптированные к морфологическим условиям рек. – Нальчик: КБГСХА, 2004. – 151 с.

3. **Осипов А. Д.** Крепление откосов земляных сооружений габионами // Гидротехническое строительство. – 1996. – № 5. – С. 20–21.

Материал поступил в редакцию 12.05.10.
Ламердонов Замир Галимович, доктор технических наук, профессор

E-mail: Lamerdonov-zamir@rambler.ru

Тел: 8-928-719-78-26

Дужак Константин Николаевич, аспирант

E-mail: Kant_n@rambler.ru

УДК 502/504:626.83

И. Ю. САХАРОВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ КЛАПАНОВ ВПУСКА И ЗАЦЕМЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Представлена разработка дополнений к существующей методике расчета переходных процессов в напорных системах водоподачи при установке на напорных трубопроводах клапанов для впуска и заземления воздуха.

Напорная система водоподачи, насосная станция, насос, напорный трубопровод, клапан для впуска и заземления воздуха, обратный клапан, переходные процессы.

The article presents a development work of additions to the existing method of estimation of transitional processes in pressurized water systems when mounting air inlet and restrain valves on pressure pipe lines.

Pressurized water system, pump station, pump, pressure pipe line, air inlet and restrain valve, back-pressure valve, transitional processes.

При проектировании и эксплуатации систем водоподачи кроме расчетов стационарных режимов необходимо выполнять расчеты переходных процессов с разработкой системы мероприятий, уменьшающих негативные последствия гидравлического удара. Проведение этих расчетов с достаточной для практических целей точностью связано с очень большими объемами вычислений, поэтому выполнять их без применения современной вычислительной техники невозможно [1–3].

Для расчета переходных процессов в напорных системах водоподачи принята математическая модель. Уравнения неустановившегося движения воды в трубопроводах используются в следующем виде [4–6]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \lambda \frac{|v|v}{2d} = 0. \quad (2)$$

Решение этих уравнений осуществляется по одной из модификаций метода характеристик. Для расчета используется схема с прямоугольной сеткой. Трубопроводы схемы напорной системы разбиваются на участки, длины Δx которых принимаются такими, чтобы время распространения волн по любому участку было бы одним и тем же:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{a}. \quad (3)$$

Таким образом, длины расчетных участков Δx должны быть пропорциональны значениям скоростей a трубопроводов. Скорости a распространения

волн в трубопроводах системы приняты неизменяющимися при переходных процессах. Фактически значения a уменьшаются при наличии в воде нерастворенного воздуха, что может быть учтено проведением вариантов расчетов со сниженными значениями a .

Условие $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$ в методе характеристик приводит к необходимости при постоянном шаге по времени Δt округлять длины трубопроводов до $0,5\Delta x$, но зато использование этого метода имеет много преимуществ. Прежде всего, это возможность проводить расчеты при резких изменениях параметров переходных процессов, что, например, характерно для случаев, сопровождающихся образованием кавитационных разрывов сплошности потока. Компьютерные программы получаются при использовании условия $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$, как правило, проще, и расчет требует меньше затрат машинного времени.

Однако для некоторых напорных систем (рассматриваются отдельные случаи переходных процессов) необходим расчет с различными шагами Δx и Δt , поэтому К. П. Вишневым было разработано дополнение к методу характеристик, позволяющее выполнять такие расчеты [7, 8]. Это дополнение будет рассмотрено несколько позднее.

Расчет по методике осуществляется для моментов времени, отличающихся на Δt ($t = 0$ принимается за начало переходного процесса). Неизвестные значения напоров H и скоростей движения воды v в сечениях, примыкающих к расчетной точке i , для каждого расчетного момента времени j определяются по следующим формулам, в которых используются значения волн φ , распространяющиеся по направлению оси координат, и значения волн ψ – соответственно против этого направления.

Значение напора $H_{i(i-1),j}$ и скорости $v_{i(i-1),j}$ в сечении, примыкающем к расчетной точке i со стороны соседней точки $i - 1$, равны:

$$H_{i(i-1),j} = H_{i(i-1),0} + \varphi_{i(i-1),j} + \psi_{i,j}; \quad (4)$$

$$v_{i(i-1),j} = v_{i(i-1),0} + g \frac{\varphi_{i(i-1),j} - \psi_{i,j}}{a_i}, \quad (5)$$

а значения напора $H_{i(i+1),j}$ и скорости $v_{i(i+1),j}$ в сечении, примыкающем к расчетной точке i со стороны соседней точки $i + 1$, равны:

$$H_{i(i+1),j} = H_{i(i+1),0} + \varphi_{i,j} + \psi_{i(i+1),j}; \quad (6)$$

$$v_{i(i+1),j} = v_{i(i+1),0} + g \frac{\varphi_{i(i+1),j} - \psi_{i,j}}{a_i}, \quad (7)$$

где $H_{i(i-1),0}$; $v_{i(i-1),0}$ и $H_{i(i+1),0}$; $v_{i(i+1),0}$ – начальные значения напоров и скоростей в указанных сечениях; $\varphi_{i(i-1),j}$ и $\psi_{i(i+1),j}$ – волны изменения напора, подошедшие к точке i в расчетный момент времени j от соседних точек $i - 1$ и $i + 1$; $\varphi_{i,j}$ и $\psi_{i,j}$ – волны изменения напора, возникающие в точке i в момент времени j в результате подхода волн $j_{i(i-1),j}$ и $\psi_{i(i+1),j}$.

При распространении волн по расчетным участкам учитывается изменение их величины вследствие гидравлического сопротивления этого участка трубопровода на трение.

Возможным средством защиты напорных трубопроводов от недопустимых колебаний давления являются устанавливаемые на трубопроводе клапаны впуска и заземления воздуха (КВЗВ) [9, 10]. Принцип работы КВЗВ состоит в следующем. При уменьшении давления ниже атмосферного открывается КВЗВ и впускает воздух в трубопровод. Образуется разрыв сплошности потока, сопровождающийся расхождением колонн воды. Воздух устремляется в образовавшийся разрыв, повышает давление до атмосферного. Как только давление в месте установки КВЗВ станет равным атмосферному, КВЗВ закрывается, «защемив» впущенный в трубопровод воздух. Если в процессе «сжатия – расширения» впущенного воздуха давление станет меньше атмосферного, то КВЗВ снова откроется и впустит дополнительную порцию воздуха. Таким образом, давление в месте установки КВЗВ не понижается ниже атмосферного и амплитуда колебаний давления уменьшается.

Расчет переходных гидравлических процессов в трубопроводе осуществляется при следующих допущениях:

открытие клапана впуска и заземления воздуха происходит мгновенно;

потери давления при впуске не учитываются;

впуск воздуха в образовавшийся разрыв сплошности потока и расширение воздуха происходит при постоянном давлении, равном атмосферному;

протяженность зоны разрыва сплошности потока значительно меньше длины расчетного участка Δx . Данное допущение позволяет при разработке методики расчета пренебречь величиной расхождения колонн воды и все расчеты проводить для расчетной точки трубопровода, в которой установлен КВЗВ.

Условие открытия клапана впуска и заземления воздуха имеет следующий вид:

$$p_{ij} = \rho g (H_{ij} - z_i) < 0, \quad (8)$$

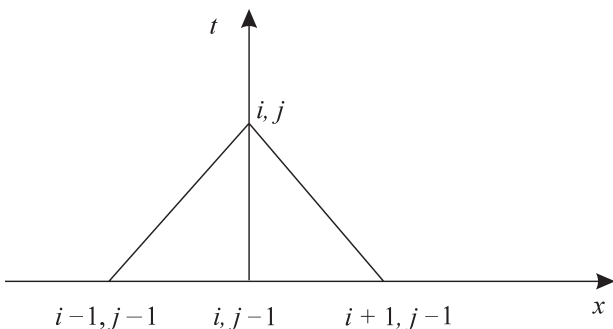
или

$$H_{ij} - z_i < 0. \quad (9)$$

Как только воздух начнет входить в трубопровод, давление повышается до атмосферного, и тогда

$$H_{ij} - z_i = 0. \quad (10)$$

Расчетная схема для граничного условия, соответствующего месту установки КВЗВ на трубопроводе, представлена на рисунке.



Расчетная схема для граничного условия

Из (3), (7) и (10) следует, что при $H_{ij} - z_i = 0$

$$\Psi_{ij} = z_i - H_{i,0} - \Phi_{i(i-1),j};$$

$$\Phi_{ij} = z_i - H_{i,0} - \Psi_{i(i+1),j}. \quad (11)$$

Разность расходов расходящихся колонн воды равна расходу воздуха, вошедшего в трубопровод через КВЗВ:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{i,j} &= Q_{i(i-1),j} + Q_{i(i+1),j} = \omega (v_{i(i-1),j} + v_{i(i+1),j}) = \\ &= \omega \left(g \frac{\Phi_{i(i-1),j} - \Psi_{i,j}}{a_i} + g \frac{\Phi_{i,j} - \Psi_{i(i+1),j}}{a_i} \right) = \\ &= \frac{g\omega}{a} (\Phi_{i(i-1),j} - \Psi_{i,j} + \Phi_{i,j} - \Psi_{i(i+1),j}). \end{aligned} \quad (12)$$

При получении выражения (12) было принято, что расход воды через свободные поверхности расходящихся колонн воды равен нулю.

Подставив в полученное выражение значения $\Psi_{i,j}$, $\Phi_{i,j}$ из (11), получим:

$$\Delta Q_{i,j} = \frac{2g\omega}{a} (\Phi_{i(i-1),j} - \Psi_{i(i+1),j}). \quad (13)$$

Изменение объема разрыва сплошности потока за расчетный интервал времени определяем по формуле

$$\Delta W_{i,j} = \Delta Q_{i,j} \Delta t. \quad (14)$$

Клапан впуска и заземления воздуха закроется и впуск воздуха в трубопровод прекратится, как только в сечениях колонн воды, примыкающих к зоне разрыва сплошности потока, давление станет выше атмосферного:

$$H_{ij} - z_i > 0. \quad (15)$$

Суммарный объем разрыва сплошности потока, равный максимальному объему воздуха, вошедшего в трубопровод через КВЗВ, вычисляется по следующей формуле:

$$W_p = W_{\max} = \sum_j \Delta W_{i,j}. \quad (16)$$

Давление в зоне разрыва сплошности потока равно атмосферному.

Процесс сжатия воздуха принят изотермическим.

Уравнение состояния изотермического процесса сжатия воздуха для двух последовательных моментов времени, отличающихся на величину расчетного интервала времени Δt , имеет вид:

$$\begin{aligned} [p_a + \rho g (H_{i,j+1} - z_i)] W_{j+1} = \\ = [p_a + \rho g (H_{i,j} - z_i)] W_j. \end{aligned} \quad (17)$$

В данном случае индекс i означает, что все расчеты ведутся относительно узла расчетной сетки, в котором установлен КВЗВ.

Положим,

$$W_{i,j+1} = W_{i,j} - \Delta Q_{i,j} \Delta t. \quad (18)$$

Величина $\Delta Q_{i,j}$ определяется по (13).

Подставив (18) в (17), получим:

$$\rho g W_{i,j} H_{i,j+1} - \rho g \Delta Q_{i,j+1} \Delta t H_{i,j+1} + \rho g \Delta Q_{i,j+1} \Delta t = \rho g W_{i,j} H_{i,j}. \quad (19)$$

Отсюда получим формулу для определения граничного значения напора в узле установки КВЗВ в момент времени t_{j+1} :

$$H_{i,j+1} = \frac{H_{i,j} W_{i,j} - z_i \Delta Q_{i,j} \Delta t}{W_{i,j} - \Delta Q_{i,j} \Delta t}. \quad (20)$$

Подставив (20) в (4), получим формулу для определения граничного значения волны $\psi_{i,j+1}$ в момент времени t_{j+1} :

$$\psi_{i,j+1} = H_{i,j+1} - H_{i,0} - \varphi_{i(i-1),j+1}.$$

Из условия равенства напоров в сечениях, примыкающих к сечению с КВЗВ, на основе (4) и (6) получим значение волны $\varphi_{i,j+1}$ в тот же самый момент времени:

$$\varphi_{i,j+1} = \varphi_{i(i-1),j+1} + \psi_{i,j+1} - \psi_{i(i+1),j}.$$

В момент времени t_j , когда закончился процесс расширения и начался процесс сжатия зоны разрыва сплошности потока, максимальный объем зоны разрыва сплошности потока, равный объему впущенного в трубопровод воздуха, определяется по (16):

$$W_{i,j} = W_{\max}.$$

Это значение $W_{i,j}$ вместе со значением $\Delta Q_{i,j}$ послужит началом процесса сжатия зоны разрыва сплошности потока, описанного выше.

При сжатии зоны разрыва сплошности потока давление в зоне

$$p = p_0 + \rho g (H_{i,j+1} - z_i).$$

Сжатие заземленного воздуха закончится в тот момент, когда давление в сечениях колонн воды, примыкающих к i -му узлу расчетной сетки, в котором установлен КВЗВ, станет равным давлению в зоне разрыва сплошности потока.

После сжатия зоны разрыва сплошности потока, как только давление в зоне разрыва сплошности потока превысит давление в сечениях колонн воды,

примыкающих к месту установки КВЗВ, начинается расширение. Методика расчета расширения зоны разрыва сплошности потока в основном совпадает с изложенной выше методикой расчета сжатия. Отличие состоит в том, что при сжатии объем зоны уменьшается по (18), а при расширении увеличивается:

$$W_{i,j+1} = W_{i,j} + \Delta Q_{i,j} \Delta t.$$

Величина $\Delta Q_{i,j}$, определяемая по (13), равна объему воздуха, впущенного в трубопровод через КВЗВ в момент времени t_j . Выбрав максимальное значение $\Delta Q_{i,j,\max}$ за расчетный период и полагая скорость вдува воздуха равной v , определим диаметр КВЗВ:

$$D_{\text{КВЗВ}} = 2 \sqrt{\frac{(\Delta Q_{i,j})_{\max}}{\pi v}}.$$

Выводы

Для расчета переходных процессов в напорных системах приняты дифференциальные уравнения неустановившегося движения воды в трубопроводах, в которых не учитываются конвективные члены. Пренебрежение такими членами позволяет значительно упростить решение этих уравнений, но не приводит к ощутимым погрешностям в определении времени распространения волн по трубопроводам, поскольку в обычных условиях скорость a значительно больше скорости движения воды v .

Условное расположение кавитационных разрывов сплошности потока в виде отдельных каверн в расчетных точках дает возможность учитывать их образование по всей длине трубопроводов при наличии в воде нерастворенного воздуха.

Принятый вид расчетной схемы позволяет относительно просто задавать структуру сложной напорной системы, а в дополнение к методу характеристик – выполнять расчеты для насосных станций с более мелкими шагами Δx и Δt , чем для остальной части схемы системы.

Полученная математическая модель для расчета напорных систем

водоподачи позволяет: а) определить параметры противоударной арматуры – диаметр КВЗВ, давление в разрыве сплошности потока, объем зоны разрыва сплошности потока, расход воздуха, вошедшего в трубопровод, значение напора в узле установки КВЗВ; б) повысить безопасность объектов водохозяйственных систем.

1. **Калиткин Н.Н.** Численные методы. – М.: Наука. – 1978. – 504 с.

2. **Стритер В.** Численные методы расчета нестационарных течений // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1972. – № 2. – С. 218–228.

3. **Тарасевич В. С.** Численные методы решения задачи о неустановившемся движении жидкости в сплошной системе трубопроводов: Динамика сплошной среды: сб. науч. трудов. – Новосибирск, 1976. – Вып. 5. – С. 71–88.

4. **Алышев В. М., Масс Е. И.** Рекомендации по расчету неустановившегося движения многофазной жидкости в напорных системах. – М.: ЦНИИС МТС СССР, 1984. – 104 с.

5. **Виссарионов В. И.** Математическое моделирование переходных процес-

сов в насосных установках: Проблемы и направления развития гидромашиностроения: сб. науч. трудов. – М.: МГУП, 1978. – С. 16–18.

6. **Картвелишвили Л. Н.** Гидравлический удар: основные положения и современное состояние теории // Гидротехническое строительство. – 1994. – № 9. – С. 49–54.

7. **Вишневский К. П.** Использование ЭВМ для расчета переходных процессов // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 9. – С. 69–70.

8. **Вишневский К. П.** Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.

9. **Бегляров Д. С.** Повышение надежности и эффективности работы закрытых оросительных систем. – М.: МГУП, 1996. – 140 с.

10. **Рожков А. Н.** Методика расчета гидравлического удара с учетом срабатывания обратных клапанов: сб. науч. трудов ВНИИ ВОДГЕО, 1976. – Вып. 60. – С. 135–140.

Материал поступил в редакцию 18.06.10.

Сахаров Илья Юрьевич, аспирант

Тел. 8-926-703-47-94

E-mail: zucker.ru@mail.ru