

Дуванская Е. В. Развитие теории двухмерных открытых водных потоков: монография. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – 133 с.

6. Емцев Б. Т. Двухмерные бурные потоки. – М.: Энергия, 1967. – 212 с.

7. Коханенко В. Н., Волосухин Я. В., Ширяев В. В., Коханенко Н. В. Моделирование одномерных и двухмерных открытых водных потоков: монография; под общей ред. В. Н. Коханенко. – Ростов н/Д:

Изд-во ЮФУ, 2007. – 168 с.

8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

Материал поступил в редакцию 16.03.12.

Дуванская Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент

E-mail: 2 2 delvik2004@list.ru

Волосухин Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор

Тел. 8 (8635) 25-05-25

УДК 502/504:626.83

Д. С. БЕГЛЯРОВ

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

И. Ю. САХАРОВ

ОАО «Концерн Росэнергоатом», Технологический филиал

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ КЛАПАНОВ ВПУСКА И ЗАЩЕМЛЕНИЯ ВОЗДУХА И ДЛИНЫ ЗОНЫ РАЗРЫВА СПЛОШНОСТИ ПОТОКА

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

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

The development of additions to the existing calculating method of transients in pressure head systems of water supply is given at valves installation on pressure head flow pipes for air inletting and jamming.

Pressure head system of water supply, pumping station, pump, pressure head pipeline, air inletting and jamming valve, back-pressure valve, transients

При проектировании и эксплуатации систем водоподачи необходимо выполнить расчеты стационарных режимов и переходных процессов, одновременно разрабатывая систему мероприятий, уменьшающих негативные последствия гидравлического удара [1, 2]. Проведение этих расчетов с достаточной для практических целей точностью связано с очень большими объемами вычислений, поэтому выполнять их без применения современной вычислительной техники невозможно [3].

В настоящей статье приводится методика расчета граничных условий

клапана впуска и защемления воздуха (КВЗВ) с учетом движения воздуха через КВЗВ. Полагается, что объем воздуха, входящего через КВЗВ в трубопровод за малый промежуток времени Δt , равен изменению объема пространства между расходящимися колоннами воды. Данная методика позволяет непосредственно учесть влияние диаметра клапана впуска и защемления воздуха на развитие переходных процессов в трубопроводе [4, 5].

Для этого на каждом шаге по времени вычисляется длина зоны разрыва сплошности потока:

$$L_j = \frac{W_j}{\omega_i} = \frac{W_j}{\pi d_i^2}, \quad (1)$$

где W_j – объем зоны разрыва сплошности потока в момент времени t_j ; ω_i – поперечное сечение трубопровода; d_i – диаметр трубопровода.

Если $L_j < \Delta x$, то допущение принимается, в противном случае длина зоны разрыва сплошности потока должна учитываться в расчетах гидравлического удара.

Примем следующие допущения:

отход колонн воды относительно i -го узла, в котором установлен КВЗВ, происходит симметрично относительно этого узла;

свободные поверхности колонн воды, примыкающие к зоне разрыва сплошности потока, считаются плоскими;

расход воды через свободные поверхности равен нулю;

во всей зоне разрыва сплошности потока во время впуска воздуха поддерживается атмосферное давление, т. е. во всей зоне разрыва $H - z = 0$ (H – напор, м; z – отметка оси трубопровода), и впуск воздуха происходит за счет разности давлений в зоне разрыва сплошности потока и в ближайших к свободным поверхностям сечениях в колоннах воды;

свободные поверхности колонн привязываются к узлам разностной сетки – $k = i \pm n$;

$$n = \text{Round}\left(\frac{L_j}{\Delta x}\right), \quad (2)$$

где k – свободная поверхность колонны; i – узел установки КВЗВ; n – шаг сетки; $\text{Round}\left(\frac{L_j}{\Delta x}\right)$ – число, округленное до ближайшего целого.

Из приведенной формулы следует, что если величина $L_j / \Delta x < 0,5\Delta x$, то $k = i$ и обе свободные поверхности колонн привязываются к узлу i . Если длина зоны разрыва сплошности находится в интервале $0,5\Delta x \leq L_j / \Delta x < 1,5\Delta x$, то $k = i \pm 1$, и т. д. Принятое допущение позволяет обойтись без корректировки разностной сетки при расчетах функций φ_{ij} и ψ_{ij} в узлах сетки разошедшихся колонн воды.

Схема расчета граничных значений функций φ_{ij} и ψ_{ij} приведена на рис. 1.

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:

$$H_{i(i-1),j} = H_{i(i-1),0} + \varphi_{i(i-1),j} + \psi_{i,j}; \quad (3)$$

$$V_{i(i-1),j} = V_{i(i-1),0} + g \frac{\varphi_{i(i-1),j} - \psi_{i,j}}{a_i}, \quad (4)$$

где $H_{i(i-1),0}$ – начальное значения напора в указанном сечении; $V_{i(i-1),0}$ – начальное значение скорости

в указанном сечении; $\varphi_{i(i-1),j}$ – волна изменения напора, подошедшая к точке i в расчетный момент времени j от соседней точки $i - 1$; $\psi_{i,j}$ – волна изменения напора, возникающая в точке i в момент времени j в результате подхода волн $\psi_{i(i+1),j}$; g – ускорение свободного падения; a_i – скорость распространения волн изменения давления.

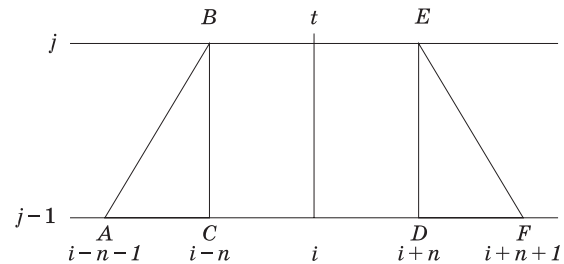


Рис. 1. Схема расчета граничных значений функций φ_{ij} и ψ_{ij} : BC и DE – сечения свободных поверхностей, отошедших на n узлов колонн воды от i -го узла, в котором установлен клапан впуска и заземления воздуха; AB – прямая характеристика, вышедшая из $(i - n - 1)$ -го узла; FE – обратная характеристика, вышедшая из $(i + n + 1)$ -го узла. (В сечении BC расход через BC и избыточное давление равны нулю).

Тогда из (3) и (4) имеем:

$$H_{i-n,j-1} - z_{i-n} + \varphi_{i-n-1,j} + \psi_{i-n,j} = 0;$$

$$\varphi_{i-n-1,j} - \psi_{i-n,j} = 0. \quad (5)$$

Решая систему уравнений (5) относительно $\varphi_{i-n-1,j}$ и $\psi_{i-n,j}$, получим граничные значения для этих волновых функций:

$$\psi_{i-n,j} = \varphi_{i-n-1,j} = \frac{1}{2}(z_{i-n} - H_{i-n,j-1}). \quad (6)$$

В сечении DE расход через DE и избыточное давление равны нулю.

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:

$$H_{i(i+1),j} = H_{i(i+1),0} + \varphi_{i,j} + \psi_{i(i+1),j}; \quad (7)$$

$$V_{i(i+1),j} = V_{i(i+1),0} + g \frac{\varphi_{i,j} - \psi_{i(i+1),j}}{a_i}, \quad (8)$$

где $H_{i(i+1),0}$ – начальное значения напора в указанном сечении; $V_{i(i+1),0}$ – начальное значение скорости в указанном сечении; $\varphi_{i,j}$ – волна изменения напора, возникающая в точке i в момент времени j ; $\psi_{i(i+1),j}$ – волна изменения напора, подошедшая к точке i в расчетный момент времени j от соседней точки $i + 1$; g – ускорение свободного падения; a_i – скорость распространения волн изменения давления.

Тогда из (7) и (8) имеем:

$$H_{i+n,j-1} - z_{i+n} + \varphi_{i-n,j} + \psi_{i+n+1,j} = 0;$$

$$\varphi_{i-n,j} - \psi_{i+n+1,j} = 0. \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9) относительно $\varphi_{i+n,j}$ и $\psi_{i+n+1,j}$, получим граничные значения для этих волновых функций:

$$\varphi_{i+n,j} = \psi_{i+n+1,j} = \frac{1}{2}(z_{i+n} - H_{i+n,j-1}). \quad (10)$$

Вычислив по граничным значениям $\psi_{i-n,j}$ и $\varphi_{i-n-1,j}$ по (6) значения ψ и φ в узлах $i \dots (i - n - 1)$ и по значениям $\psi_{i+n,j}$ и $\varphi_{i+n+1,j}$ по (10) значения ψ и φ в узлах $i \dots (i + n + 1)$, определим в этих же узлах по (3), (4), (7), (8) значения напоров и скоростей.

Исходя из условия симметричного расширения впускаемого воздуха, вычислим среднее значение:

$$(H - z)_j^{cp} = \frac{1}{2}((H_{i-n-1,j} - z_{i-n-1}) + (H_{i+n+1,j} - z_{i+n+1})). \quad (11)$$

$$\text{Если } (H - z)_j^{cp} < 0, \quad (12)$$

то, подставив значение $|H - z|_j^{cp}$ в $\Delta l = \left(\frac{d_k}{d_i}\right)^2 \frac{\sqrt{2g|H_{ij} - z_i|}}{a} \Delta x$, вычислим значение приращения длины зоны разрыва сплошности потока:

$$\Delta l_j = \left(\frac{d_k}{d_i}\right)^2 \frac{\sqrt{2g|(H - z)_j^{cp}|}}{a} \Delta x, \quad (13)$$

где d_k и d_i – диаметры клапана впуска и заземления воздуха и трубопровода соответственно.

Затем определяем длину L_j и объем t_j зоны разрыва сплошности потока в момент времени t_j :

$$\begin{aligned} L_j &= L_{j-1} + \Delta l_j; \\ W_j &= W_{j-1} + \omega \Delta l_j. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив полученное значение L_j в (2), определим узлы привязки свободных поверхностей и повторим расчет.

Если $(H - z)_j^{cp} > 0$, то клапан впуска и заземления воздуха закрывается и начинается процесс сжатия зоны разрыва сплошности потока. В предшествующий момент времени фиксируется максимальное значение объема зоны разрыва сплошности потока:

$$W_{\max} = W_{j-1}. \quad (15)$$

Процесс сжатия считаем изотермическим, для которого

$$(p_a + (H - z)_{j-1}^{cp}) W_{\max} = \text{const}. \quad (16)$$

Запишем уравнение состояния воздуха в зоне разрыва сплошности потока для двух последовательных моментов времени:

$$\begin{aligned} [p_a + \rho g (H - z)_{j-1}^{cp}] W_{j-1} &= \\ &= [p_a + \rho g (H - z)_j^{cp}] W_j. \end{aligned} \quad (17)$$

Отсюда находим величину объема воздуха в зоне разрыва сплошности потока в момент времени t_j :

$$W_j = \frac{[p_a + \rho g (H - z)_{j-1}^{cp}] W_{j-1}}{p_a + \rho g (H - z)_j^{cp}}. \quad (18)$$

Вычислив W_j , определим изменение длины зоны разрыва сплошности потока:

$$\Delta l_j = \frac{W_j - W_{j-1}}{\omega}. \quad (19)$$

Затем определим длину зоны разрыва сплошности потока:

$$L_j = L_{j-1} + \Delta l_j. \quad (20)$$

По (2) осуществим привязку свободных поверхностей зоны разрыва сплошности потока к узлам расчетной сетки, пересчитаем по (6) и (10) граничные условия для функций ψ и φ , проведем расчет этих функций и напоров в остальных узлах.

Вычисления выполняем до тех пор, пока в сечениях, примыкающих к свободным поверхностям зоны разрыва сплошности потока, будет выполняться условие $(H - z)_{j-1}^{cp} < (H - z)_j^{cp}$.

$$(21)$$

Как только в сечениях, примыкающих к свободным поверхностям зоны разрыва сплошности потока, установится условие

$$(H - z)_j^{cp} < (H - z)_{j-1}^{cp}, \quad (22)$$

начнется процесс расширения зоны разрыва сплошности потока. Сам ход расчетов будет таким же, как и в случае сжатия, так как формулы (19) и (20) изменения длины зоны разрыва сплошности потока носят универсальный характер.

Действительно, при сжатии жидкости, $\Delta l < 0$, длина L_j зоны разрыва сплошности потока будет уменьшаться, а при ее расширении, $\Delta l > 0$, и длина L_j будет увеличиваться.

С расширением зоны разрыва сплошности потока давление внутри зоны может упасть ниже атмосферного. В этом случае КВЗВ откроется и впусит порцию воздуха. В соответствии с (13) длина зоны разрыва сплошности потока увеличится, давление внутри зоны мгновенно достигнет атмосферного и впуск воздуха будет продолжаться до тех пор, пока будет выполняться условие (12).

Изложенный в настоящем разделе алгоритм учета КВЗВ при расчетах гидравлического удара формализуется в блок-схеме расчета граничных условий

на свободных поверхностях зоны разрыва сплошности потока с учетом длины зоны разрыва сплошности потока, представленной на рис. 2.

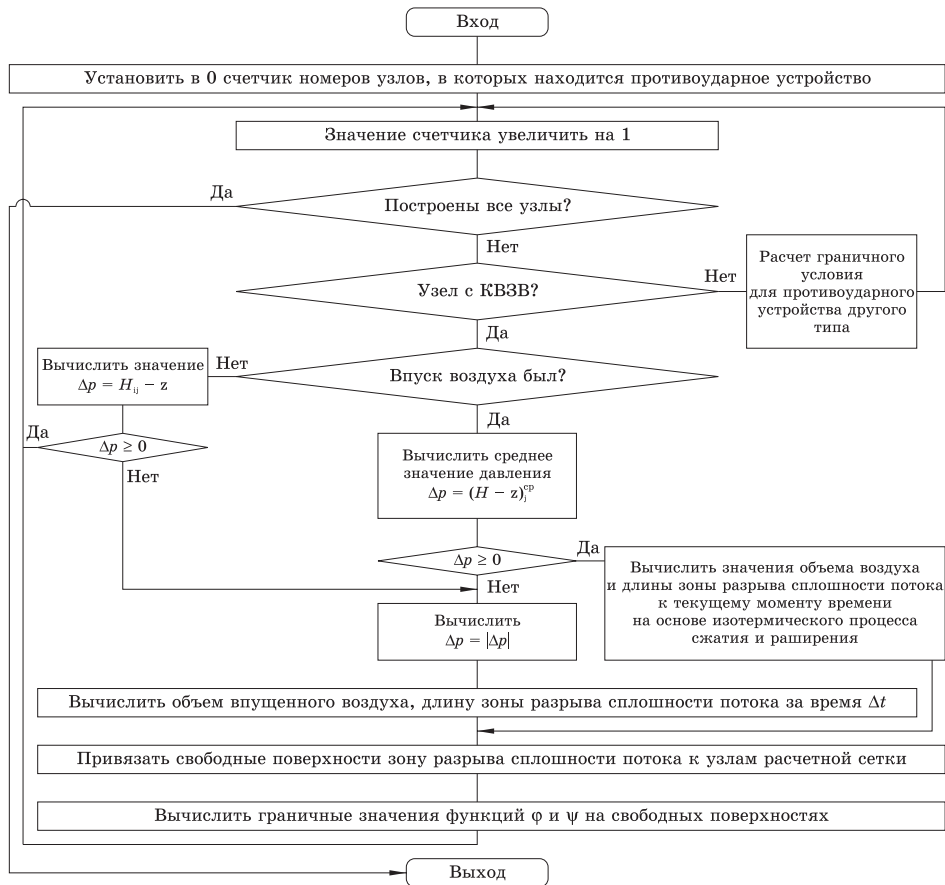


Рис. 2. Блок-схема расчета граничных условий на свободных поверхностях зоны разрыва сплошности потока с учетом длины зоны разрыва сплошности потока

Выводы

Чтобы обосновать действия по выбору средств защиты от гидравлического удара напорных систем водоподачи с насосных станций, необходимо проведение расчетов переходных процессов.

Принятый вид расчетной схемы позволяет относительно просто моделировать структуры сложных напорных систем (см. рис. 1).

В соответствии с результатами проведенных исследований разработаны методики: для расчета переходных процессов при наличии клапана впуска и защемления воздуха с учетом длины зоны разрыва сплошности потока; для расчета мест установки клапанов впуска и защемления воздуха с учетом их фактической работы (при этом определяется объем воздуха, впущенного в трубопровод, и длина разрыва сплошности потока).

ности и эффективности работы закрытых оросительных систем – М.: МГУП, – 1996. – 140 с.

2. Насосные станции для орошения: справочное пособие / Г. В. Ольгаренко [и др.] – Коломна. 2007. – 304 с.

3. Карамбиров С. Н. Новые подходы в моделировании и оптимизации трубопроводных систем. Основы, концепция, методы. – Германия, 2012. – 355 с.

4. Картвелишвили Л. Н. Принципы расчета гидравлического удара и развитие // Природообустройство. – 2012. – № 4. – С. 72–77.

Материал поступил в редакцию 19.09.11.
Бегляров Давид Суренович, доктор технических наук, профессор кафедры «Насосы и насосные станции»

Тел. 8 (495) 976-11-85

Сахаров Илья Юрьевич, кандидат технических наук, главный специалист

Тел. 8 (926) 703-47-94

E-mail: zucker.ru@mail.ru

1. Бегляров Д. С. Повышение надеж-