

УДК 532.542

ГИДРАВЛИКА И
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Э.П. АЩИЯНЦ, В.О. ТОКМАДЖЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОПОРОЖНЕНИИ
НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ВОДОВОДА

Получена аналитическая зависимость, определяющая изменение скорости течения жидкости при опорожнении водовода с учетом всех основных факторов, влияющих на ее величину. Рекомендуется методика определения продолжительности опорожнения водовода.

Ключевые слова: нагнетательный водовод, участки различного уклона, гидравлические сопротивления, скорость.

При эксплуатации нагнетательных водоводов систем водоснабжения возникает необходимость определения продолжительности их опорожнения. Анализ существующих исследований, посвященных этому вопросу, показывает, что в них недостаточно выявлена динамика процесса опорожнения водовода в случае учета влияния гидравлических сопротивлений [1,2], а рекомендуемые зависимости не обеспечивают необходимую точность расчета [3].

Целью настоящей работы является получение более точной аналитической зависимости, определяющей изменение скорости течения жидкости в нагнетательном водоводе при его опорожнении, и разработка методики определения продолжительности опорожнения водовода.

Рассматривается схема нагнетательного водовода (рис. 1), имеющего участки различного уклона. Предполагается, что до начала опорожнения водовода все его участки заполнены водой.

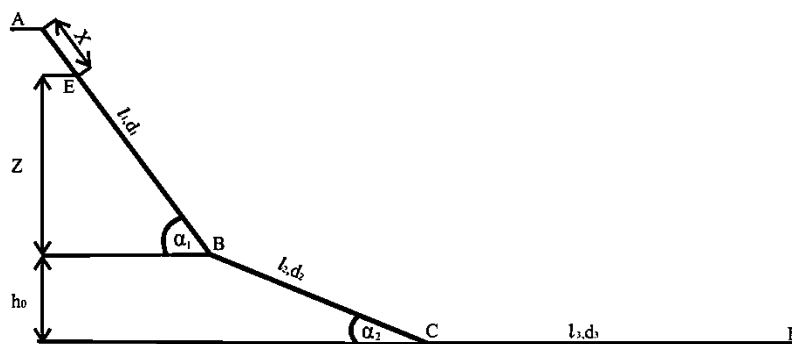


Рис. 1. Расчетная схема нагнетательного водовода

Для решения задачи используются уравнение Бернулли [1] и уравнение неразрывности вида $A_1V_1 = A_2V_2 = A_3V_3$, где A_1, A_2 и A_3 - площади поперечных сечений участков водовода АВ, ВС и CD (рис. 1), имеющих соответственно диаметры d, d_2, d_3 и длины l_1, l_2, l_3 ; V_1, V_2 и V_3 - скорости течения жидкости на участках АВ, ВС и CD.

Выражая V_1 и V_2 через скорость течения V_3 на участке водовода CD, для сечений Е и D (рис. 1) уравнение Бернулли представляется в виде

$$(l_1 - x) \sin \alpha_1 + h_0 = \frac{V_3^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 + \xi_2 \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2 + \xi_3 + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \cdot \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2 + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3} + \lambda_1 \frac{(l_1 - x)}{d_1} \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 \right] + \frac{(L_1 - x)}{g} \frac{dV_3}{dt}, \quad (1)$$

где x - координата перемещения свободной поверхности жидкости в опорожняющемся участке АВ ($0 < x \leq l_1$); α_1 - угол наклона участка АВ к горизонту; ξ_1 и ξ_2 - значения коэффициентов местных гидравлических сопротивлений на участках ВС и CD; λ_1, λ_2 и λ_3 - значения коэффициентов гидравлических сопротивлений по длине водовода на участках АВ, ВС и CD; g - ускорение силы тяжести; t - текущее время; L_1 - расчетная длина водовода, которая согласно рекомендациям [1] равна

$$L_1 = \left[l_3 + l_1 \left(\frac{A_3}{A_1} \right) + l_2 \left(\frac{A_3}{A_2} \right) \right]. \quad (2)$$

Наличие в (1) слагаемого $\frac{\lambda_1}{d_1} \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 (l_1 - x)$ не позволяет аналитически интегрировать указанное уравнение. Поэтому с целью получения аналитической зависимости для скорости течения жидкости, удобной для анализа и расчета, в уравнении (1) выражение в квадратных скобках принимается постоянным и обозначается через параметр K .

Заменяя переменную величину постоянной, допускается определенная погрешность. Однако, как будет показано ниже, влияние этой погрешности будет в дальнейшем сведено к минимуму.

После замены в уравнении (1) производной dV_3/dt на $d(V_3^2)/2dx$ [3] уравнение (1) принимает вид

$$\frac{dy}{dx} + y \frac{K}{(L_1 - x)} = \frac{2g[h_0 + (l_1 - x)\sin a_1]}{(L_1 - x)}, \quad (3)$$

где $y = V_3^2$.

Интегрируя (3) при начальных условиях ($x=0, y=0$), получается зависимость для скорости $V_3(x)$:

$$V_3(x) = \left\{ \left\{ 2g \sin a_1 \times \left[-\frac{(L_1 - x)}{(1-K)} + \frac{L_1}{(1-K)} \left(\frac{L_1 - x}{L_1}\right)^K + \frac{(L_1 - l_1)}{K} \left[\left(\frac{L_1 - x}{L_1}\right)^K - 1 \right] \right] \right\} + \frac{2gh_0}{K} \left[1 - \left(\frac{L_1 - x}{L_1}\right)^K \right] \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

где $K \neq 1$, поскольку в этом случае согласно уравнению (1) $V_1 = 0$, что не соответствует физике явления, так как $V_1 = V_3 \frac{A_3}{A_1}$.

При неучете влияния гидравлических сопротивлений ($K=0, d_1=d_2=d_3$) зависимость (4) принимает вид

$$V_3(x) = \sqrt{2gh_0 \ln \frac{L}{L-x} + 2g \sin \alpha_1 \left[x + (l_2 + l_3) \ln \frac{(L-x)}{L} \right]}, \quad (5)$$

где $L = l_1 + l_2 + l_3$.

Из формулы (5) следует, что чем больше длина участка BD, тем меньше скорость опорожнения водовода, а с увеличением значения координаты x скорость опорожнения все время возрастает, достигая максимальной величины при $x = l_1$.

В случае, если опорожняется простой наклонный трубопровод ($h_0 = 0$ и $l_2 = l_3 = 0$ (рис. 1)), из (5) следует

$$V(x) = \sqrt{2g \sin \alpha_1 \cdot x}. \quad (6)$$

Имея в виду, что $V(x) = dx/dt$, из (6) получается зависимость для времени t вида

$$t = \sqrt{\frac{2x}{g \sin \alpha}}. \quad (7)$$

При $x = l_1$ из (7) определяется время опорожнения трубопровода $T = \sqrt{2l_1 / g \sin \alpha_1}$.

В случае, если в простом наклонном трубопроводе АВ учитывать только распределенные по длине трубопровода гидравлические сопротивления, скорость течения жидкости, как следует из уравнения (1), будет иметь вид

$$V(x) = \sqrt{2g \sin \alpha_1 \frac{(1 - e^{-ax})}{a}}, \quad (8)$$

где $a = \lambda_1 / d_1$.

Если в вышеуказанном наклонном трубопроводе распределенные по длине гидравлические сопротивления условно заменить на сосредоточенные в конце трубопровода и представить потери напора в виде $KV^2/2g$, то при опорожнении этого трубопровода зависимость для скорости будет иметь вид

$$V(x) = \sqrt{2g \sin \alpha_1 \frac{x}{(l + K)}}. \quad (9)$$

Приравнявая (8) и (9), можно определить такое значение параметра K , при котором при заданном фиксированном значении координаты x скорость течения жидкости, определенная по формуле (9), будет равна скорости, определяемой по формуле (8):

$$K(x) = \frac{ax}{(1 - e^{-ax})} - 1, \quad (10)$$

где $0 < x \leq l_1$.

Равенство (10) используется при расчетах по полученной зависимости (4), где значение параметра K определяется по формуле

$$K = K_0 + K(x), \quad (11)$$

а

$$K_0 = [1 - (\frac{A_3}{A_1})^2 + \zeta_2 (\frac{A_3}{A_2})^2 + \zeta_3 + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \cdot (\frac{A_3}{A_2})^2 + \lambda_3 \frac{l_3}{d_3}].$$

Задавая различные значения x , по формуле (10) определяется соответствующее значение $K(x)$, а по формуле (11) - расчетное значение параметра K , которое подставляется в зависимость (4). По заданным значениям x строится график зависимости $V_3 = f(x)$, который используется для определения продолжительности опорожнения первого участка АВ водовода длиной l_1 . Для этого этот участок делится на несколько элементарных участков l^i , в пределах которых изменение скорости можно принять происходящим по линейной зависимости. После определения средней скорости в пределах каждого выделенного участка, исходя из равенства $t_i = l^i / V_i^{cp}$, вычисляется время опорожнения этого участка, а полное время опорожнения участка длиной l_1 будет равно $T_{on} = \frac{\sum l^i / V_i^{cp}}{A_3 / A_1}$.

Для установления степени корректности разработанной методики расчета проведено сопоставление расчетных значений T_{on}^p с соответствующими экспериментальными данными.

С этой целью в гидравлической лаборатории Национального университета архитектуры и строительства Армении смонтирована экспериментальная установка, состоящая из наклонного и горизонтального участков трубопровода. Наклонный участок представляет собой стальной трубопровод квадратного поперечного сечения со стороной $b = 0,019$ м и длиной $l_1 = 6,14$ м. Горизонтальный участок трубопровода изготовлен из полиэтилена диаметром $d_2 = 0,019$ м и длиной $l_2 = 8,92$ м.

На месте соединения этих трубопроводов установлен кран, а на расстоянии 0,5 м от него на стальном трубопроводе - стеклянный пьезометр.

Синус угла наклона первого участка трубопровода к горизонту равен 0,117. Коэффициент местных гидравлических сопротивлений ξ_2 и значения λ_1 и λ_2 по длине участков l_1 и l_2 определялись экспериментальным путем при стационарном режиме движения жидкости на этих участках $\xi_2 = 4$, $\lambda_1 = 0,04$, $\xi_2 = 4$, $\lambda_1 = 0,04$, $\lambda_2 = 0,025$, $A_1 = 2,89$ см², $A_2 = 2,83$ см².

Подсоединяя конец горизонтального полиэтиленового трубопровода к напорному резервуару, участки l_2 и l_1 водовода полностью заполнялись водой. Затем закрывался кран, установленный в месте изменения уклона водовода, и отсоединялся конец полиэтиленового трубопровода от напорного резервуара. При последующем открытии крана происходило опорожнение наклонного участка водовода. Время опорожнения этого участка фиксировалось с помощью стеклянного пьезометра.

В соответствии со схемой экспериментальной установки в полученной зависимости (4) принимается $h_0 = 0$ и $l_2 = 0$, и расчетная зависимость для скорости опорожнения жидкости принимает вид

$$V_2(x) = \sqrt{2g \sin \alpha_1 \left\{ -\frac{(L_1 - x)}{(1 - K)} + \frac{L_1}{(1 - K)} \left(\frac{L_1 - x}{L} \right)^K + \frac{(L_1 - l_1)}{K} \left[\frac{(L_1 - x)^K}{L_1} - 1 \right] \right\}}, \quad (12)$$

где $L_1 = l_2 + l_1 \frac{A_2}{A_1}$.

Используя расчетные параметры экспериментальной установки ($l_1 = 6,14$ м), $l_2 = 8,92$ м, $\sin \alpha_1 = 0,117$, $L_1 = 14,933$ м, $a = 0,226$ 1/см, с помощью зависимости (12) построены графики $V_2 = f(x)$, представленные на рис. 2. Из графиков видно, что при $K = 0$ (кривая 1) скорость опорожнения жидкости с возрастанием координаты x все время увеличивается.

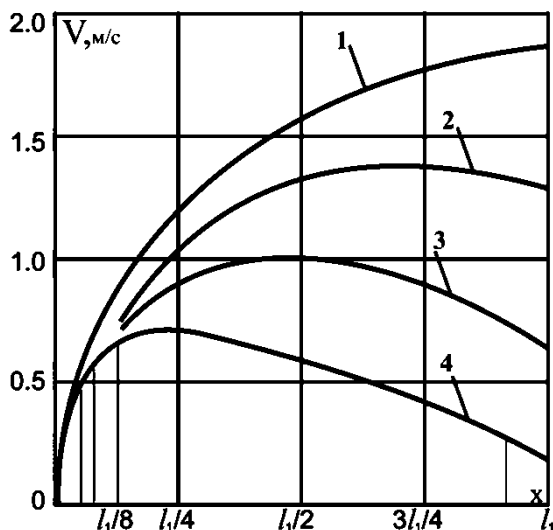


Рис. 2. Графики зависимости $V_2=f(x)$ при различных значениях параметра K : кривая 1 (параметр $K=0$), кривая 2 ($K_0=2$); кривая 3 (параметр $K_0=7$), кривая 4 ($K=K_0+K(x)$, $K_0=15,78$)

При постоянном значении параметра $K = 2$ (кривая 2) максимальная скорость опорожнения возникает при $x = 0,75 l_1$, а затем она уменьшается. При $K = 7$ (кривая 3) максимальная скорость возникает при $x = l_1 / 2$. Кривая 4 построена при переменных значениях параметра $K = K_0 + K(x)$, в котором $K_0 = 15,78$,

а значения $K(x)$ определены по формуле (10). Из графика видно, что в начале процесса опорожнения первого участка водовода длиной $l_1 = 6,14$ м скорость течения воды быстро возрастает до максимальной величины $V_{\max} = 0,73$ м/с, а затем постепенно уменьшается до минимального значения $V_{\min} = 0,18$ м/с при полном опорожнении наклонного участка водовода, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Используя вышеуказанную методику расчета, с помощью построенного графика (кривая 4, рис. 2) определяется продолжительность опорожнения наклонного участка водовода от его начала до места установки пьезометра ($x = 5,64$ м).

С этой целью участок l_1 делится на восемь элементарных участков (рис. 2), на каждом из которых определяется средняя скорость течения воды. Например, на седьмом участке, который заканчивается местом установки пьезометра, $l_1 = 1,035$ м и $V_7^{cp} = 0,34$ м/с, и, следовательно, время опорожнения этого участка будет $t_7 = 3,04$ с.

Суммируя промежутки времени на выделенных участках, определяется полное время опорожнения наклонного трубопровода длиной 5,64 м, которое составило $T_{on}^p = 11,91$ с. Согласно эксперименту, оно составляло $T_{on}^{зн} = 12$ с.

Визуальные наблюдения и измерения показали, что после открытия крана уровень свободной поверхности воды в пьезометре резко понизился. Через промежуток времени $t \approx 2,2$ с скорость понижения уровня свободной поверхности воды в пьезометре уменьшилась, а к концу опорожнения наклонного участка трубопровода она была в несколько раз меньше, чем в начальный период процесса опорожнения.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили корректность разработанной методики расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник задач по машиностроительной гидравлике / Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвиз и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 464 с.
2. Ащиянц Э.П. Гидравлический удар в нагнетательных водоводах. – Ереван: Изд-во Линуш, 2010. – 210 с.
3. Рафаэлян Р.М., Ащиянц Э.П., Мелконян А.С. Расчет параметров неустановившегося движения жидкости при заполнении и опорожнении водовода // Известия АН Армении. Сер. ТН. - 1992. - Т.45, N 2. - С.50-55.

НУАСА. Материал поступил в редакцию 08.09.2014.

Է.Պ. ԱՇՉԻՅԱՆՑ, Վ.Հ.ԹՈՔՄԱՋՅԱՆ

**ՄՂՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԻ ԴԱՏԱԴԿՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ ՈՉ ՍՏԱՑԻՈՆԱԼ
ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԻՂԴԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Ստացված է անալիտիկ կախվածություն, որով որոշվում է խողովակաշարի դատարկման ընթացքում ջրի արագության փոփոխումը, հաշվի առնելով բոլոր հիմնական գործոնները, որոնք ներգործում են հեղուկի արագության մեծության վրա, և առաջարկվում է խողովակաշարի դատարկման ժամանակամիջոցի որոշման մեթոդիկա:

Առանցքային բառեր. մղման խողովակաշար, տարբեր թեքությամբ հատվածներ, հիդրավլիկական դիմադրություններ, արագություն:

E.P. ASHCHYANTS, V.H. TOKMAJYAN

**DETERMINING THE HYDRAULIC PARAMETERS OF THE NONSTATIONARY
PROCESS AT DISCHARGING THE FORCE PIPELINE**

The analytic dependence defining the change in the velocity of the liquid flow at emptying the pipeline considering all the main factors influencing its value is obtained. A method for determining the duration of emptying the pipeline is recommended.

Keywords: force pipeline, sections of different gradient, hydraulic resistances, velocity.