

УДК 532.542

ГИДРАВЛИКА И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ
СООРУЖЕНИЯ

Э.П. АЩИЯНЦ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ
ЗАПОЛНЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ВОДОВОДА**

Получены более общие аналитические зависимости, определяющие изменение скорости течения жидкости в процессе заполнения водовода с учетом всех основных факторов, влияющих на ее величину. Рекомендуется методика определения продолжительности заполнения водовода.

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

При эксплуатации водоводов насосных станций и напорных автоматизированных оросительных систем [1], включающих гидравлические линии связи в виде труб малых диаметров, возникает необходимость определения гидравлических параметров течения жидкости в указанных трубах в процессе их заполнения.

Анализ исследований [2-4], посвященных данной проблеме, показывает, что в них недостаточно изучена динамика движения колонны жидкости в процессе заполнения водовода, отсутствуют рекомендации по определению продолжительности заполнения водовода, существующие формулы не обеспечивают необходимую точность расчета и нуждаются в усовершенствовании.

Целью настоящей работы является получение более общих аналитических зависимостей, определяющих гидравлические параметры нестационарного течения колонны жидкости в процессе заполнения водовода, а также разработка методики определения продолжительности заполнения водовода.

Рассматривается схема нагнетательного водовода, имеющего участки различного уклона (рис. 1). Водовод 3 подсоединяется к питающему резервуару 1 с помощью крана 2, при открытии которого происходит заполнение жидкостью водовода.

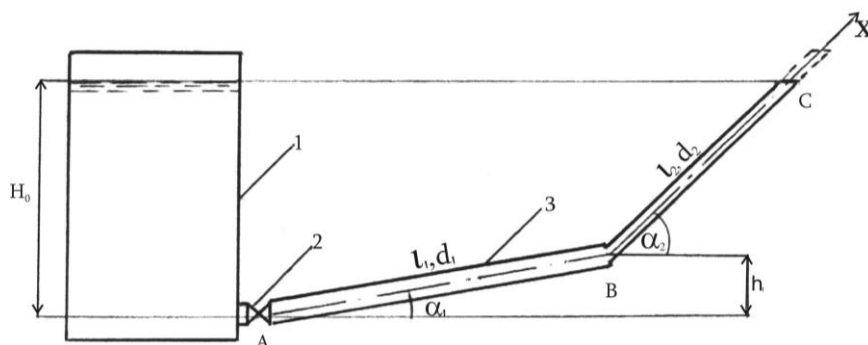


Рис. 1. Расчетная схема нагнетательного водовода

Для решения задачи используется уравнение Д. Бернулли [2] для двух сечений. Первое сечение берется на свободной поверхности жидкости в резервуаре 1, а второе - на свободной поверхности жидкости в заполняющемся водоводе. При заполнении участка АВ (рис. 1) это уравнение будет иметь вид

$$H_0 = x \sin \alpha_1 + \frac{V_1^2}{2g} \left(1 + \sum \xi_1 + \lambda_1 x / d_1 \right) + \frac{x}{g} \frac{dV_1}{dt}. \quad (1)$$

Здесь H_0 - напор над центром отверстия в стенке резервуара; x - координата перемещения переднего фронта жидкости в заполняющемся водоводе ($0 < x < l_1$), где l_1 - длина участка АВ; α_1 - угол наклона участка АВ к горизонту; V_1 - скорость течения колонны жидкости; g - ускорение силы тяжести; $\sum \xi_1$ - сумма местных гидравлических сопротивлений на участке АВ; λ_1 - коэффициент Дарси при течении жидкости в трубе участка АВ; d_1 - диаметр трубопровода участка АВ; t - текущее время.

С целью аналитического интегрирования уравнения (1) независимую переменную времени t заменяем на переменную координату x [3]. Обозначив $V_1^2 = y$, получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{dy}{dx} + y \frac{(1 + \sum \xi_1 + \lambda_1 x / d_1)}{x} = 2g \frac{(H_0 - x \sin \alpha_1)}{x}. \quad (2)$$

Интеграл этого уравнения приводится в работе [4] (зависимость (2.5)).

Указанная зависимость неудобна для практических расчетов, поэтому с целью упрощения расчета поступаем следующим образом. Сначала уравнение (2) интегрируется при условии, что $\lambda_1 = 0$. В результате для определения скорости течения колонны жидкости на участке АВ получается зависимость вида

$$V_1(x) = \sqrt{2g \left[\frac{H_0}{1 + \sum \xi_1} - \frac{x \sin \alpha_1}{2 + \sum \xi_1} \right]}. \quad (3)$$

Если допустить, что $\sum \xi_1 = 0$, а $\lambda_1 \neq 0$, то в результате интегрирования уравнения (2) зависимость $V_1(x)$ будет иметь вид

$$V_1(x) = \sqrt{\frac{2g}{\lambda_1^2 e^{a_1 x}} \{H_0 a_1 (e^{a_1 x} - 1) - \sin \alpha [e^{a_1 x} (a_1 x - 1) + 1]\}}, \quad (4)$$

где $a_1 = \lambda_1 / d_1$

Для получения расчетной формулы, в которой одновременно будет учитываться влияние как местных, так и распределенных по длине водовода гидравлических сопротивлений, поступаем следующим образом. Беря за основу структуру формулы (3), представляем ее в виде

$$V_1(x) = \sqrt{2g \left[\frac{H_0}{1 + K_1(x)} - \frac{x \sin \alpha_2}{2 + K_1(x)} \right]},$$

где $K_1(x)$ - коэффициент, численное значение которого зависит от величины координаты x . Значение $K_1(x)$ определяется из равенства

$$\frac{H_0}{1 + K_1(x)} - \frac{x \sin \alpha_1}{2 + K_1(x)} = \frac{H_0 a_1 (e^{a_1 x} - 1) - \sin \alpha_1 [e^{a_1 x} (a_1 x - 1) + 1]}{a_1^2 x e^{a_1 x}}. \quad (5)$$

Из (5) получается квадратное уравнение относительно параметра $K_1(x)$:

$$K_1^2(x) + \frac{(3M_1 - H_0 + x \sin \alpha_1)}{M_1} K_1(x) - \frac{(2H_0 - x \sin \alpha_1 - 2M_1)}{M_1} = 0, \quad (6)$$

где

$$M_1 = \frac{H_0 a_1 (e^{a_1 x} - 1) - \sin \alpha_1 [e^{a_1 x} (a_1 x - 1) + 1]}{a_1^2 x e^{a_1 x}}. \quad (7)$$

Задаваясь фиксированными значениями x в пределах $0 < x < l_1$ из (7), определяются соответствующие численные значения параметра M_1 , которые подставляются в уравнение (6), с помощью которого определяется соответствующее

значение коэффициента $K_1(x)$. Имея значение $K_1(x_i)$, скорость течения жидкости на участке водовода АВ определяется по формуле

$$V_1(x) = \sqrt{2g \left[\frac{H_0}{1 + \sum \xi_1 + K_1(x)} - \frac{x \sin \alpha_1}{2 + \sum \xi_1 + K_1(x)} \right]}. \quad (8)$$

Если водовод состоит из двух последовательно соединенных участков различного диаметра (рис.1), то в процессе заполнения жидкостью второго участка ВС скорость на первом участке АВ выражается через скорость $V_2(x)$ второго участка, используя для этого уравнение неразрывности вида $A_1 V_1 = A_2 V_2$, где A_1 и A_2 - площади поперечных сечений труб первого и второго участков. Прделав указанные преобразования, для определения скорости заполнения жидкостью второго участка ВС используется уравнение Д. Бернулли вида

$$H_0 - h_1 = x \sin \alpha_2 + \frac{V_2^2}{2g} \left[1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \lambda_1 l_1 / d_1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \sum \xi_1 + \lambda_2 x / d_2 + \sum \xi_2 + \frac{(L_1 + x)}{g} \right] \frac{dV_2}{dt}, \quad (9)$$

где $h_1 = l_1 \sin \alpha_1$; V_2 - скорость течения жидкости на участке ВС (рис. 1); λ_2 - коэффициент Дарси в трубе участка ВС; $L_1 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) l_1$ [2]; d_2 - диаметр трубы участка ВС.

Уравнение (9) справедливо при изменении координаты x в пределах $0 < x < l_2$, где l_2 - длина участка ВС; α_2 - угол наклона участка ВС к горизонту,

Преобразуя уравнение (9) так же, как это было показано выше, получается дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dy}{dx} + y \frac{K_0}{(L + x)} = 2g \frac{[(H_0 - h_1) - x \sin \alpha_2]}{(L_1 + x)}, \quad (10)$$

где $K_0 = 1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \lambda_1 l_1 / d_1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \sum \xi_1 + \xi_2$.

Интегрируя уравнение (10) при условии: $x = 0 \quad V_2 = V_1(l_1)$, где $V_1(l_1)$ находится из формулы (8), получается зависимость $V_2(x)$, определяющая изменение скорости колонны жидкости на участке ВС:

$$V_2(x) = \left\{ V_1^2 \left[\frac{L_1}{L_1 + x} \right]^{K_2} + \frac{2g(H_0 - h_1)}{K_2} \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_1 + x} \right)^{K_2} \right] - \right. \\ \left. - 2g \sin \alpha_2 \left\{ \frac{L_1}{K_2(K_2 + 1)} \left[\frac{L_1}{L_1 + x} \right]^{K_2} + \left[\frac{(L_1 + x)}{K_2 + 1} - \frac{L_1}{K_2} \right] \right\} \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

В зависимости (11) $K_2 = K_0 + K_2(x)$, где $K_2(x)$ определяется из уравнения

$$K_2(x) + \frac{(3M_2 - H_1 + x \sin \alpha_2)}{M_2} K_2(x) - \frac{(2H_1 - x \sin \alpha_2 - 2M_2)}{M_2} = 0, \quad (12)$$

а

$$M_2 = \frac{H_1 a_2 (e^{a_2 x} - 1) - \sin \alpha_2 [e^{a_2 x} (a_2 x - 1) + 1]}{a_2^2 x e^{a_2 x}}, \quad H_1 = H_0 - h_1, \quad a_2 = \lambda_2 / d_2. \quad (13)$$

При неучете влияния гидравлических сопротивлений ($K_2 = 1$) зависимость (11) принимает вид

$$V_2(x) = \sqrt{V_0^2 \left(\frac{L}{L_1 + x} \right) + \frac{2gx}{(L_1 + x)} \left[(H_0 - h_1) - \sin \alpha_2 \frac{x}{2} \right]}, \quad (14)$$

где V_0 определяется из (3) при $\sum \xi_i = 0$.

Представляет интерес определение расстояния, которое после заполнения участка ВС по инерции пройдет колонна жидкости, если условно продлить длину участка ВС, не меняя его уклона и диаметра.

В этом случае для определения этого расстояния используется уравнение Бернулли вида

$$0 = x \sin \alpha_2 + \frac{V_3^2}{2g} \left[1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \sum \xi_i + \sum \xi_2 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \lambda_1 l_1 / d_1 + \lambda_2 l_2 / d_2 + \lambda_2 x / d_2 \right] + \\ + \frac{(L_2 + x)}{2g} \frac{d(V_3^2)}{dx}, \quad (15)$$

где $L_2 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) l_1 + l_2$.

Пренебрегая в уравнении (15) влиянием слагаемого $\lambda_2 x / d_2$, ввиду незначительности численного значения координаты x по сравнению со всей длиной водовода L_2 , это уравнение интегрируется при условии: $x = 0 \quad V_3(0) = V_2(l_2)$,

где $V_2(l_2)$ определяется с помощью зависимости (11). В результате изменение скорости течения колонны жидкости при движении по инерции определяется формулой

$$V_3(x) = \sqrt{V_2^2 \left[\frac{L_2}{L_2 + x} \right]^{K_3} - 2g \sin \alpha_2 \left\{ \left[\frac{L_2}{L_2 + x} \right]^{K_3} \frac{L_2}{K_3(K_3 + 1)} + \left[\frac{L_2 + x}{K_3 + 1} - \frac{L_2}{K_3} \right] \right\}}, \quad (16)$$

где $K_3 = 1 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \sum \xi_1 + \sum \xi_2 + \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \lambda_1 l_1 / d_1 + \lambda_2 l_2 / d_2$.

Подставляя в (16) различные численные значения x_i и определяя $V_3(x_i)$, находится такое ее значение, при котором $V_3(x_i) = 0$.

Для определения продолжительности времени, в течение которого участки водовода заполняются жидкостью, с помощью формул (8) и (11) строятся графики зависимости $V_1 = f_1(x)$ и $V_2 = f_2(x)$. Затем каждый из участков водовода длиной l_1 и l_2 делится на несколько участков, в пределах которых изменение скорости течения жидкости можно принять происходящим по линейной зависимости. Определяя среднюю скорость в пределах каждого выделенного участка, вычисляется время его наполнения исходя из равенства $t_i = l^i / V_i^{cp}$, а полное время заполнения участка АВ длиной l_1 будет равно $T_H = \sum (l^i / V_i^{cp}) / (A_2 / A_1)$.

Аналогично определяется продолжительность заполнения жидкостью участка ВС.

Для выявления корректности разработанной методики расчета в гидравлической лаборатории смонтирована экспериментальная установка, состоящая из резервуара с водой, в котором поддерживался постоянный уровень свободной поверхности воды.

Глубина погружения центра отверстия в стенке резервуара под постоянный уровень свободной поверхности воды в нем равна $H_0 = 0,85$ м.

Первый участок водовода представляет горизонтальный металлопластовый трубопровод диаметром $d_1 = 0,075$ м и длиной $l_1 = 1,93$ м, который подсоединен к отверстию в стенке резервуара через пробковый кран и угольник. Суммарное значение коэффициентов местных гидравлических сопротивлений $\sum \xi$ на первом участке трубопровода, согласно экспериментальным данным, равно 4,3.

Конец металлопластового трубопровода с помощью перехода ($\xi_2 = 2$) соединен с горизонтальным полиэтиленовым трубопроводом диаметром $d_2 = 0,019$ и длиной $l_2 = 7,56$ м. Этот трубопровод имеет три закругленных

колена в горизонтальной плоскости и одно закругленное в вертикальной плоскости.

Последний, третий участок водовода длиной $l_3 = 1,22$ м представлял продолжение трубопровода второго участка, но имеющего наклон к горизонту ($\sin \alpha_3 = 0,7$).

Коэффициенты гидравлического трения в металлопластовой и полиэтиленовой трубах определялись согласно рекомендациям, приведенным в работе [5] ($\lambda_1 = 0,0255$, $\lambda_2 = 0,0234$). Коэффициент местного гидравлического сопротивления в закруглениях полиэтиленового трубопровода определялся согласно рекомендациям, приведенным в работе [6] ($\xi_2 = 0,2$).

Используя полученные зависимости (8) и (11), в которых $\sin \alpha_1 = 0$ и $\sin \alpha_2 = 0$, построены графики функций $V_1 = f_1(x)$, $V_2 = f_2(x)$ и $V_3 = f_3(x)$, приведенные на рис. 2.

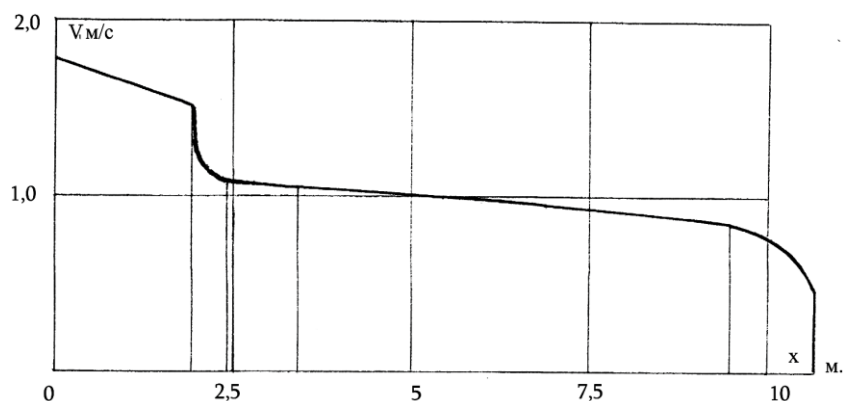


Рис. 2. Расчетный график изменения скорости течения воды при заполнении участков водовода

С помощью этих графиков по вышеуказанной методике определены продолжительности заполнения каждого из трех участков водовода. Общее суммарное расчетное время заполнения водой нагнетательного водовода составило $T_H^p = 10,5$ с, а согласно экспериментальным данным, оно было равно $T_H^{эк} = 10$ с.

Согласно расчету по формуле (16), при остановке колонны жидкости ($V_3 = 0$) превышение горизонта свободной поверхности воды в трубопроводе над статическим горизонтом свободной поверхности воды в резервуаре составило 0,316 м, а согласно эксперименту, оно составило 0,31 м.

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили корректность полученных зависимостей и разработанной методики расчета продолжительности заполнения водовода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ащиянц Э.П., Каранфилян А.А., Шатворян О.Р. Автоматизированная оросительная система // Передовой производственный и научно-технический опыт в мелиорации и водном хозяйстве, рекомендуемый для внедрения: Информационный сборник ЦБНТИ Минводхоза СССР. - М., 1989. - № 6. - С.16-21.
2. Сборник задач по машиностроительной гидравлике / Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвиз и др. - М.: Машиностроение, 1981.- 464 с.
3. Рафаэлян Р.М., Ащиянц Э.П., Мелконян А.С. Расчет параметров неустановившегося движения жидкости при заполнении и опорожнении водовода // Известия АН РА. Сер. ТН. - 1992. - Т.45, № 2. - С. 50-55.
4. Ащиянц Э.П. Гидравлический удар в нагнетательных водоводах.- Ереван: Лимуш, 2010. – 210 с.
5. Ащиянц Э.П., Токмаджян В.О. Рекомендуемые зависимости для определения коэффициентов гидравлического трения в пластмассовых трубах малых диаметров // Известия Национального аграрного университета Армении. – 2013. - №4. - С. 87-91.
6. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика.- М.: Стройиздат, 1987.- 414 с.

Национальный университет архитектуры и строительства Армении. Материал поступил в редакцию 02.06.2015.

Է.Պ. ԱՇՉԻՅԱՆՑ

ՄՂՄԱՆ ԽՈՂԱՎԱԿԱՇԱՐԻ ԼՅՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ ՈՉ ՍՏԱՑԻՈՆԱՐ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԻՂԴԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ստացված են վերլուծական ավելի ընդհանուր կախվածություններ, որոնցով որոշվում է հեղուկի շարժման արագությունը խողովակի լցման ընթացքում՝ հաշվի առնելով բոլոր հիմնական գործոնները, որոնք ներգործում են հեղուկի շարժման արագության վրա, և առաջարկվում է խողովակաշարի լցման ժամանակամիջոցի որոշման մեթոդիկա:

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

E.P. ASHCHYANTS

DEFINING THE HYDRAULIC PARAMETERS OF NONSTATIONARY LIQUID FLOW IN THE PROCESS OF FILLING THE FORCE PIPELINE

More general analytical dependences, defining the change in the liquid flow rate in the process of filling the pipeline, considering all the principal factors influencing its size are obtained. A method for determining the duration of filling the pipeline is recommended.

Keywords: force pipeline, plot of different gradient, hydraulic resistances, velocity, filling duration.