

Э.П. АЩИАНЦ

**РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ
ЗНАЧЕНИЯ СКОРОСТИ И ВРЕМЕНИ ОПОРОЖНЕНИЯ КОЛОННЫ
ЖИДКОСТИ ИЗ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ НАЛИЧИИ
НАСАДКА НА ЕГО КОНЦЕ**

Рассматриваются вопросы опорожнения жидкости из напорного трубопровода постоянного диаметра с насадком на его конце. Диаметр выходного отверстия насадка меньше диаметра трубопровода. В результате соответствующих преобразований получены простые расчетные зависимости, с помощью которых можно при минимальных затратах времени и с достаточной для практических расчетов точностью определить продолжительность опорожнения жидкости из трубопровода. Проводится сопоставление результатов расчета по рекомендуемым зависимостям с соответствующими экспериментальными данными.

Ключевые слова: напорный трубопровод, насадок, жидкость, гидравлические сопротивления, время опорожнения.

Введение. Напорные трубопроводы являются составной частью систем водоснабжения. При проектировании и эксплуатации этих систем возникает необходимость опорожнения некоторых участков трубопроводов и определения продолжительности их опорожнения. В частности, такая необходимость возникает при эксплуатации разработанной нами напорной автоматизированной оросительной системы [1], включающей гидравлические линии связи в виде полиэтиленовых труб малых диаметров. Правильное определение продолжительности наполнения и опорожнения этих труб обеспечивает работоспособность указанной системы орошения.

На продолжительность опорожнения колонны жидкости из трубопровода существенное влияние оказывают геометрия трубопровода, гидравлические сопротивления, инерционные свойства опорожняющихся колонн жидкости. Решение задачи существенно усложняется в случае опорожнения сложных трубопроводов с насадками на их конце. Анализ исследований, посвященных данной проблеме [2-4], показывает, что в указанных работах рекомендуемые расчетные зависимости, определяющие скорость опорожнения жидкости из трубопровода, не обеспечивают необходимую точность расчета и нуждаются в усовершенствовании.

Отсутствие современного опытного материала в существующей технической литературе не позволяет оценить корректность рекомендуемых в этих работах формул. Следует также отметить, что в указанных работах не приводится достаточно точного аналитического решения этой задачи при одновременном учете влияния всех основных факторов на скорость опорожнения колонны жидкости из трубопровода.

Целью настоящей работы является получение простых аналитических зависимостей, с помощью которых можно при минимальных затратах времени и с достаточной для практических расчетов точностью определить время опорожнения колонны жидкости из трубопровода с учетом всех основных факторов, влияющих на его величину, что и определяет актуальность проведенных исследований.

Постановка задачи и методы исследования. Рассматривается напорный трубопровод постоянного диаметра d_1 (рис.), из которого опорожнение жидкости происходит через насадок, диаметр выходного отверстия d_0 которого меньше диаметра трубопровода.

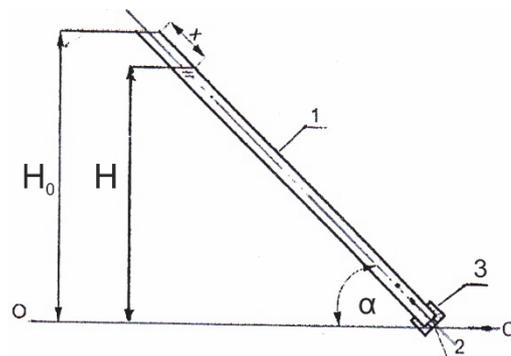


Рис. Расчетная схема трубопровода: 1 – трубопровод, 2 – отверстие, 3 – насадок

Нестационарное движение колонны жидкости, возникающее в трубопроводе, определяется из уравнения Д. Бернулли [4], взятого для двух сечений. Первое сечение принимается в начале опорожняющейся колонны жидкости на ее свободной поверхности, а второе - на выходе жидкости из водовода (рис.). В результате полученное дифференциальное уравнение, определяющее нестационарное движение колонны жидкости в трубопроводе в процессе ее опорожнения, интегрируется при начальном условии: при $x = 0 - V = 0$. В работе [5] получена аналитическая зависимость (16), определяющая изменение скорости течения колонны жидкости $V(x)$ в процессе ее опорожнения через отверстие в насадке (рис.), установленном в конце трубопровода.

Зависимость имеет вид

$$V(x) = \sqrt{\frac{2g \sin \alpha}{K-1} \left[(l-x) - l \left(\frac{l-x}{l} \right)^K \right]}, \quad (1)$$

где α - угол наклона трубопровода к горизонту; l - длина трубопровода; x - расстояние, пройденное колонной жидкости (рис.) за время t ;

$$K = \frac{\lambda}{d_1} l + \left[\left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2 (1 + \zeta_0) - 1 \right], \quad (2)$$

где λ - коэффициент гидравлического трения стенки трубопровода; A_1 - площадь поперечного сечения трубопровода; A_0 - площадь водовыпускного отверстия насадка; ζ_0 - коэффициент гидравлического сопротивления водовыпускного отверстия.

Зависимость (1) используется для определения времени опорожнения колонны жидкости из трубопровода. С этой целью в работе [5] рекомендуется графоаналитический способ определения этого времени, который по точности - расчета уступает аналитическим методам и требует больших затрат времени.

Зависимость (1) можно представить в виде

$$V(x) = \sqrt{\frac{2g(l-x)}{K-1} \left[1 - \left(\frac{l-x}{l} \right)^{K-1} \right]} \sin \alpha, \quad (3)$$

где $0 \leq x \leq l$.

В интервале $0 \leq x \leq l$ функция (3) имеет максимум.

Значение координаты x^M , при которой скорость опорожнения жидкости достигает максимальной величины, определяется по формуле [6]

$$x^M = l \left[1 - \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{K-1}} \right], \quad (4)$$

откуда вытекает, что чем больше значение K , тем меньше величина x^M .

В зависимости (3) слагаемое $\left(\frac{l-x}{l} \right)^{K-1}$ при малых значениях параметра K оказывает существенное влияние на уменьшение скорости опорожнения

колонны жидкости и, следовательно, на увеличение времени ее опорожнения из трубопровода.

Время опорожнения колонны жидкости t из трубопровода определяется из интеграла

$$t = \int \frac{dx}{\sqrt{\frac{2g(l-x)}{K-1} \left[1 - \left(\frac{l-x}{l} \right)^{K-1} \right] \sin \alpha}} + C. \quad (5)$$

В общем случае указанный интеграл не берется в конечном виде, однако путем некоторых упрощений удастся проинтегрировать вышеуказанную функцию, в которой произвольная постоянная "С" определяется из условия: при $x = 0 - t = 0$.

В случае неучета влияния гидравлических сопротивлений ($K = 0$) зависимость (3) принимает вид

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

Формула (6) показывает, что в процессе опорожнения колонны жидкости скорость ее опорожнения все время возрастает и достигает максимума при $x^M = l$.

Подставляя функцию (6) в интеграл (5) и проинтегрировав выражение

$$t = \int \frac{dx}{\sqrt{2gx \sin \alpha}}, \quad (7)$$

получим

$$t = \sqrt{2x / g \sin \alpha}. \quad (8)$$

При $x = l - T_0 = \sqrt{2l / g \sin \alpha}$.

При $K = 1$ зависимость (3) принимает вид

$$V(x) = \sqrt{2g(l-x) \cdot \ln \frac{l}{l-x} \cdot \sin \alpha}. \quad (9)$$

Функция (9) достигает максимума при $x^M = l(1 - e^{-1})$.

С целью интегрирования функции (9) производится некоторое ее упрощение путем замены переменного множителя $\ln \frac{l}{l-x}$ осредненной постоянной величиной, равной $\ln \frac{l}{l-0,5l} = 0,7$.

После указанной замены, подставляя новую функцию $V(x) = \sqrt{2g(l-x) \cdot 0,7 \sin \alpha}$ в (5) и проинтегрировав ее, получим

$$t = 1,19 T_0 \left(1 - \sqrt{\frac{l-x}{l}}\right). \quad (10)$$

При $x = l - T_1 = 1,19T_0$.

При $K = 2$ зависимость для скорости (3) принимает вид

$$V(x) = \sqrt{\frac{2g}{l}(lx - x^2) \sin \alpha}. \quad (11)$$

Значение координаты x^M , при которой скорость опорожнения колонны жидкости достигает максимума, равно $0,5l$.

Подставляя (11) в (5) и проинтегрировав выражение, получим [6]

$$t = \frac{T_0}{2} \cdot \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{2x}{l} - 1\right) \right]. \quad (12)$$

При $x = l - T_2 = 1,57T_0$.

При $K = 4,21$, согласно экспериментальным данным, время опорожнения колонны жидкости будет $T_{4,21} = 1,5$ с, а $T_0 = 0,775$ с.

Таким образом, анализ полученных значений T_K при значениях параметра K , находящихся в интервале $0 \leq K < 5$, позволил установить линейную связь между временем полного опорожнения колонны жидкости из трубопровода T и параметром K вида

$$T = T_0(1 + 0,27K). \quad (13)$$

При значениях параметра $K > 5$ в зависимости (3) слагаемым $\left(\frac{l-x}{l}\right)^{K-1}$ при практических расчетах можно пренебречь и использовать для скорости опорожнения колонны жидкости зависимость вида

$$V(x) = \sqrt{\frac{2g(l-x)\sin\alpha}{K-1}}. \quad (14)$$

Подставляя указанную функцию в (5) и проинтегрировав ее, получим формулу, с помощью которой определяется время опорожнения колонны жидкости из трубопровода с насадком на его конце:

$$t = T_0\sqrt{K-1} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{l-x}{l}}\right). \quad (15)$$

При

$$x = l - T = T_0\sqrt{K-1}. \quad (16)$$

Следует отметить, что в формуле (2) параметр K определяет влияние как местных, так и распределенных по длине трубопровода гидравлических сопротивлений. Численное значение этого параметра зависит от диаметра d_1 трубопровода, длины трубы l , а также от отношения A_1/A_0 . В разработанной нами автоматизированной оросительной системе [1] используются полиэтиленовые трубы малых диаметров 9...16 мм и длиной l , изменяющейся в пределах 20...200 м. Среднее значение коэффициента гидравлического трения λ для таких труб можно принять равным 0,023. При указанных численных значениях расчетных параметров значение параметра K всегда превышает 12, что указывает на корректность использования зависимости (14).

Для установления степени корректности полученных формул проведено сопоставление результатов расчета времени опорожнения жидкости из трубопровода по этим зависимостям с соответствующими экспериментальными данными. С этой целью в гидравлической лаборатории Института водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егиазарова смонтирована экспериментальная установка, представляющая вертикальную полиэтиленовую трубу длиной $l = 2,95$ м и диаметром $d_1 = 0,016$ м. Коэффициент гидравлического трения

этой трубы $\lambda = 0,023$. Опорожнение жидкости из трубы проходило через круглое отверстие в металлической шайбе, которая монтировалась в насадке (рис.). При выходе струи воды из отверстия диаметром d_0 в шайбе происходило сжатие ее поперечного сечения. Площадь сжатого сечения A_c определялась по формуле $A_c = \varepsilon A_0$, где A_0 - площадь отверстия в шайбе. Коэффициент сжатия струи ε определялся по формуле [4]

$$\varepsilon = 0,62 + 0,38(A_0 / A_1)^2, \quad (17)$$

в которой $A_1 = 2 \text{ см}^2$.

При проведении экспериментов использовались шайбы с диаметрами d_0 отверстий, равными 1,6; 1,35; 1,23; 1,05; 0,87; 0,65 и 0,55 см.

Отверстия в шайбах закрывались резиновыми пробками, после чего труба полностью заполнялась водой. Затем пробки быстро удалялись и с помощью секундомера фиксировалось время опорожнения жидкости.

Таблица

Численные значения расчетных и экспериментальных данных

$d_0, \text{ см}$	$A_0, \text{ см}^2$	ε	$A_c, \text{ см}^2$	ξ_0	$K(2)$	$T, \text{ с}$	$T^{\text{эк}}, \text{ с}$
1,6	2	1,0	2	0	2,12	1,22	1,2
1,35	1,43	0,81	1,16	0,04	4,21	1,66	1,5
1,23	1,19	0,75	0,89	0,04	6,37	1,8	1,7
1,05	0,87	0,69	0,60	0,04	12,67	2,64	2,6
0,87	0,59	0,62	0,37	0,04	31,5	4,3	4,0
0,65	0,33	0,62	0,20	0,06	101,0	7,75	7,3
0,55	0,24	0,62	0,15	0,06	189,6	10,64	10,1

В таблице приведены численные значения расчетных и экспериментальных данных. Параметр K определен с помощью формулы (2). При диаметрах отверстий d_0 в шайбах, равных 1,6 см и 1,35 см, время опорожнения жидкости из трубы T определялось по формуле (13), а в остальных случаях - по формуле (16).

Как видно из таблицы, расчетные значения времени опорожнения жидкости из трубы - T , определенные по вышеуказанным зависимостям, незначительно превышают соответствующие экспериментальные данные $T^{\text{эк}}$, что повышает надежность использования рекомендуемых формул.

Заклучение

1. Получены простые и более общие аналитические зависимости, определяющие изменение скорости течения жидкости в процессе ее опорожнения из трубопровода с насадком на его конце.

2. Сопоставление результатов расчета по полученным формулам с соответствующими экспериментальными данными подтверждает корректность этих зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Արտոնագիր N 2651 А. Ճնշումային ոռոգման ավտոմատացված համակարգ / **Է. Աշխիանց, Ա. Մարգարյան, Վ. Թորմաշյան**. - 2012 թ.
2. **Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П.** Гидравлика и аэродинамика.- М.: Стройиздат, 1987.-414 с.
3. **Ащиянц Э.П.** Гидравлический удар в нагнетательных водоводах.- Ереван: Изд-во “Лимуш”, 2010. – 210 с.
4. Сборник задач по машиностроительной гидравлике /**Д.А. Бугаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвиз** и др. - М.: Машиностроение, 1981.- 464с.
5. **Ащиянц Э.П.** К вопросу определения скорости опорожнения колонны жидкости из трубопровода при наличии насадка на его конце // Изв. НАН РА и НПУА. Сер ТН. – 2021. - Т. LXXIV, N2 . - С.221-229.
6. **Бронштейн И.К., Семендяев К.А.** Справочник по математике.- М.: Наука, 1967. - 608 с.

Институт водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егиазарова. Материал поступил в редакцию 01.07.2021.

Է.Պ. ԱՇՁԻՅԱՆՑ

ՄՂՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԻ ՎԵՐՋՆԱՄԱՍՈՒՄ ԿՑԱՓՈՂԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ՀԵՂՈՒԿԻ ՍՅԱՆ ԴԱՏԱՐԿՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ԱՆԱԼԻՏԻԿ ԿԱՆՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Դիտարկվել է հաստատուն տրամագծով ճնշումային խողովակաշարից հեղուկի դատարկման գործընթացը: Հետազոտությունների արդյունքում ստացվել են առավել ընդհանուր անալիտիկ կախվածություններ, որոնցով ավելի հեշտ և ճշգրիտ որոշվում է խողովակաշարից հեղուկի այան դատարկման տևողությունը: Ստացված բանաձևերով կատարված հաշվարկների արդյունքները համեմատվել են համապատասխան փորձարարական արդյունքների հետ:

Առանցքային բառեր. ճնշումային խողովակաշար, կցափող, հեղուկ, հիդրավլիկական դիմադրություններ, դատարկման ժամանակ:

E.P. ASHCIYANTS

**DEVELOPING ANALYTICAL DEPENDENCES DETERMINING THE
VALUE OF THE VELOCITY AND TIME OF EMPTYING THE LIQUID
COLUMN FROM THE PRESSURE PIPELINE IN THE PRESENCE OF A
NOZZLE AT ITS END**

Issues on emptying the liquid from the pressure pipeline of a constant diameter with a nozzle at its end are considered. The diameter of the exit hole of the nozzle is less than the pipeline diameter. As a result of adequate transformations, simple calculation dependencies are obtained. A comparison of the research results according to the obtained formulas with the corresponding experimental data is carried out.

Keyword: pressure pipeline, nozzle, liquid, velocity, hydraulic resistances, emptying time.