



УДК: 621.67

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОПОРОЖНЕНИЯ КОЛОННЫ ЖИДКОСТИ ИЗ ТРУБОПРОВОДА ПРИ НАЛИЧИИ НАСАДКА НА ЕГО КОНЦЕ

Э.П. Ащиянц, д.т.н.

Институт водных проблем и гидротехники им. акад. И.В.Егизарова

ashchiyants.e@post.com

СВЕДЕНИЯ

Ключевые слова:

трубопровод,
насадок,
гидравлические сопротивления,
время опорожнения,
жидкость

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается опорожнение жидкости из напорного трубопровода постоянного диаметра с насадком на его конце. Диаметр выходного отверстия насадка меньше диаметра трубопровода. В результате соответствующих преобразований получены расчетные формулы, с помощью которых легко определяется продолжительность опорожнения трубопровода. Приводится сопоставление результатов расчета по полученным зависимостям с соответствующими экспериментальными данными.

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.

Разработанная авторами (Э.П. Ащиянц и др., 2012) напорная автоматизированная оросительная система включает гидравлические линии связи в виде полиэтиленовых труб малых диаметров. В процессе их наполнения водой и опорожнения в них возникают импульсы повышения и понижения давления. Эти импульсы воздействуют на подпружиненные мембраны соответствующих механизмов, которые, в свою очередь, воздействуют на пробки кранов управления, обеспечивая очередность открытия и закрытия поливных трубопроводов.

Правильное определение продолжительности наполнения и опорожнения этих труб обеспечивает работоспособность автоматизированной системы орошения.

На продолжительность опорожнения трубопроводов существенное влияние оказывает геометрия трубопровода, гидравлические сопротивления, а также инерционные свойства опорожняющихся колонн жидкости. Решение задачи существенно усложняется в случае опорожнения сложных трубопроводов с насадками на их конце. Анализ существующих исследований (В.С. Дикаревский и др., 1978; Д.А. Бутаев и др., 1981; Э.П. Ащиянц и др., 2010, 2013), посвященных этому вопросу, показывает, что в них недостаточно изучена динамика движения колонны жидкости при нестационарном процессе, а существующие расчётные зависимости, определяющие время опорожнения водоводов, нуждаются в усовершенствовании. В настоящее время в существующей технической литературе не приводится аналитического решения этой задачи при одновременном учёте как местных, так и распределённых по длине трубопровода гидравлических сопротивлений.

Вышеуказанное определяет актуальность исследований, рассматриваемых в настоящей работе.

Материалы и методы

Целью настоящей работы является разработка простых и надежных зависимостей, с помощью которых при минимальных затратах времени и с достаточной для практических расчётов погрешностью определяется продолжительность опорожнения колонны жидкости из трубопровода, снабженного насадком на его конце, при учете влияния всех вышеуказанных факторов, влияющих на его величину.

Рассматривается напорный трубопровод постоянного диаметра d_1 (рис.), из которого опорожнение жидкости происходит через насадок с диаметром выходного отверстия d_0 , меньшим диаметра трубопровода.

Существующие исследования (Д.А. Бутаев и др., 1981) показывают, что при отсутствии насадка на конце трубопровода и отсутствии местных гидравлических сопротивлений процесс опорожнения колонны жидкости из трубы и разгон жидкости в трубопроводе описывается одинаковым дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dV}{dt} + kV^2 = b, \quad (1)$$

где V - средняя скорость движения колонны жидкости в трубопроводе, k - параметр, определяющий влияние длины трубопровода l и гидравлических сопротивлений на нестационарный процесс, $b = g \sin \alpha$, где g - ускорение силы тяжести, а $\sin \alpha = H_0 / l$ (рис.) H_0 - напор жидкости у насадка при полностью заполненном трубопроводе.

В уравнении (1) параметры k и b являются постоянными величинами.

Интегрируя уравнение (1) при начальном условии: $t=0, V=0$, в указанной работе получена зависимость, определяющая изменение скорости течения колонны жидкости в процессе ее опорожнения, которая может быть представлена в различных видах:

$$V = a \frac{e^{2akt} - 1}{e^{2akt} + 1} \text{ или } V = ath \frac{t}{2T_0} \text{ или } V = a \frac{1 - e^{-2akt}}{1 + e^{-2akt}}, \quad (2)$$

где $a = \sqrt{g/k}$, $k = \frac{\lambda}{2d}$, d - внутренний диаметр трубопровода, λ - коэффициент сопротивления трения, $T_0 = 1/2ak$.

Формулы (2) показывают, что в процессе опорожнения жидкости происходит ускорение скорости ее движения, которая на завершающей стадии опорожнения стремится к значению " a ".

Формулы (2) используются для определения продолжительности опорожнения трубопровода. С этой целью скорость течения колонны жидкости V представляется в виде $V = dx/dt$.

Полученное дифференциальное уравнение интегрируется при начальном условии: при $t=0, x=0$, где x - расстояние, пройденное колонной жидкости в трубопроводе за время t (рис.).

В результате получается зависимость $x=f(t)$, из которой путем подбора определяется такое значение параметра t , при котором $x=l$, где l - длина опорожняющегося трубопровода.

При установке насадка в конце трубопровода для определения скорости опорожнения колонны жидкости используется такая же методика расчета, как и в работе (Д.А. Бутаев и др., 1981), которая основана на использовании уравнения Д. Бернулли, представленного для двух сечений трубопровода. Первое сечение берется на свободной поверхности жидкости в трубопроводе (рис.), а второе - на выходе жидкости из насадка. В результате получается дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{k(x)}{l-x} V^2 = b, \quad (3)$$

где параметр k является величиной переменной и зависящей от координаты x (рис.). x - расстояние, пройденное свободной поверхностью колонны жидкости в трубопроводе за время t .

Из уравнения (3) следует, что при $x \rightarrow l$ численное значение слагаемого в уравнении (3)

$\frac{k(x)}{l-x} V^2$, определяющее влияние гидравлических сопротивлений на скорость опорожнения колонны жидкости, увеличивается, что приводит к снижению этой скорости до нуля на завершающей стадии опорожнения даже при минимальных значениях коэффициента местных гидравлических сопротивлений ξ_0 . Это противоречит физике явления.

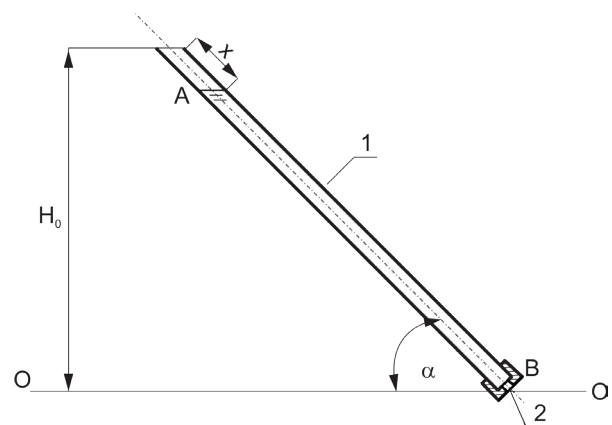


Рис. Расчетная схема трубопровода 1 - трубопровод, 2 - отверстие (составлена автором).

Таким образом, при одновременном учете влияния на процесс опорожнения жидкости как местных, так и распределенных по длине трубопровода гидравлических сопротивлений с целью получения аналитического решения задачи требуются дальнейшие исследования.

В настоящей работе для оперативного решения поставленной задачи рекомендуется использовать зависимости, приведенные в работе (Д.А. Бутаев и др., 1981), справедливые для процесса разгона жидкости в трубопроводе. Насколько такое допущение корректно, будет ясно при сравнении результатов расчета по полученным формулам с соответствующими экспериментальными данными.

При установке насадка на конце трубопровода скорость выхода струи жидкости из насадка V_2 отличается от скорости движения колонны жидкости в трубопроводе V_1 .

В вышеуказанной работе (Д.А. Бутаев и др., 1981) для этого случая количество жидкости, вытекшее из трубы за время t с начала ее открытия, рекомендуется определять по формуле

$$W = A_2 V_2 \cdot 2T_2 \ln ch \frac{t}{2T_2}, \quad (4)$$

где A_2 – площадь поперечного сечения струи при выходе из насадка, V_2 – скорость установившегося истечения струи из насадка

$$V_2 = \sqrt{2gH_0} / \sqrt{1 + \xi_0 + \frac{\lambda l}{d_1} \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}, \quad (5)$$

где ξ_0 – коэффициент гидравлических сопротивлений насадка, λ – коэффициент гидравлического трения, A_1 – площадь сечения трубы.

В формуле (4) $ch \frac{t}{2T_2}$ – гиперболический косинус аргумента $t/2T_2$.

$$T_2 = V_2 l / 2gH_0, \quad (6)$$

При опорожнении трубопровода постоянного диаметра d_1 объём жидкости W , вытекшей из трубы, можно представить в виде

$$W_x = A_1 x,$$

Подставляя в вышеуказанное равенство (4) вместо W выражение $A_1 x$, получим

$$x = \frac{A_2 V_2}{A_1} \cdot 2T_2 \ln ch \frac{t}{2T_2}.$$

Из уравнения неразрывности потока вытекает

$$A_2 V_2 / A_1 = V_1, \quad (7)$$

где V_1 – скорость течения колонны жидкости в трубопроводе при стационарном движении.

С учетом равенства (7), зависимость (4) можно

представить в виде

$$x = V_1 \cdot 2T_2 \ln ch \frac{t}{2T_2}. \quad (8)$$

Используя выражения (5), (6) и (7), параметр T_2 можно представить в виде

$$T_2 = 1/2V_1 k, \quad (9)$$

где

$$k = \frac{1}{2l} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \left[1 + \xi_0 + \frac{\lambda l}{d_1} \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Подставляя выражение (9) в (8), получаем равенство

$$xk = \ln ch \frac{t}{2T_2},$$

которое можно представить в виде

$$e^{xk} = ch \frac{t}{2T_2}.$$

имея в виду, что

$$ch \frac{t}{2T_2} = \frac{e^{t/2T_2} + e^{-t/2T_2}}{2}. \quad (11)$$

после преобразований получается зависимость

$$x = \frac{1}{k} \left[\ln(1 + e^{2V_1 k t}) - \ln 2 \right] - V_1 t. \quad (12)$$

Результаты и анализ

Зависимость (12) позволяет точнее определять время опорожнения трубопровода, так как она не требует использования таблиц численных значений гиперболической функции.

Подставляя в (12) вместо x значение l , путем подбора времени t определяется такое его значение t_{on} , при котором справедливо равенство

$$l = \frac{1}{k} \left[\ln(1 + e^{2V_1 k t_{on}}) - \ln 2 \right] - V_1 t_{on}. \quad (13)$$

В случае, если при расчетах окажется, что в (12) численное значение показателя степени при экспоненте $2V_1 k t > 4$, то влиянием единицы в слагаемом $\ln(1 + e^{2V_1 k t})$ можно пренебречь, в результате чего зависимость (12) принимает вид

$$x = V_1 t - \frac{\ln 2}{k}, \quad (14)$$

из которой выводится зависимость

$$t = (x + \frac{\ln 2}{k}) / V_1, \quad (15)$$

Подставляя в (15) вместо x значение длины трубопровода l , определяется продолжительность его опорожнения t_{on} .

Для установления степени корректности полученных формул проведено сопоставление результатов расчета времени опорожнения трубопровода по полученным формулам с соответствующими экспериментальными данными. С этой целью в гидравлической лаборатории Института водных проблем и гидротехники им. акад. И.В. Егiazарова смонтирована экспериментальная установка, представляющая собой вертикальную полиэтиленовую трубу длиной $l=2.95$ м и внутренним диаметром $d_1=0.016$ м. Коэффициент гидравлического трения трубы $\lambda=0.023$. Опорожнение трубы происходит через отверстие в металлической шайбе, которая перекрывала выходное отверстие трубы. В этом случае при выходе струи воды из насадка происходило сжатие ее поперечного сечения. Площадь сжатого сечения определялась по формуле $A_2=\varepsilon A_0$, где ε -коэффициент сжатия струи при выходе из отверстия в тонкой стенке, значение которого зависит от степени сжатия струи $n = A_0 / A_1$, где A_0 – площадь отверстия шайбы $A_0 = \pi d_0^2 / 4$, d_0 – диаметр отверстия шайбы. Зависимость $\varepsilon = f(n)$ приводится в работе (А.Д. Альтшуль и др., 1987). При проведении экспериментов использовали шайбы с отверстиями диаметром 1.35 см, 1.05 см и 0.65 см.

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

Ниже приводится пример расчета времени опорожнения трубы при установке на её конце насадка в виде шайбы с отверстием $d_0=0.65$ см.

Расчетные данные следующие: $H_0=2.95$ м, $l=2.95$ м, $\xi_0=0.06$, $d_1=0.06$ м, $A_1=2$ см², $A_0=0.33$ см², $\varepsilon=0.6$, $A_2=0.2$ см², $g=9.8$ м/с², $A_1/A_2=10$, $A_2/A_1=0.1$.

Подставляя соответствующие значения параметров в формулу (5), получим

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2.95 / \left[1 + 0.06 + \frac{0.023 \cdot 2.95}{0.016} \cdot 0.01 \right]} = 7.24 \text{ м/с.}$$

Имея V_2 с помощью равенства (7), определяется численное значение скорости $V_1=0.724$ м/с.

С помощью формулы (10) определяется численное значение параметра k .

$$k = \frac{10}{2 \cdot 2.95} \left[1 + 0.06 + \frac{0.023 \cdot 2.95}{0.016} \cdot 0.01 \right] = 1.86 \text{ 1/м.}$$

Подставляя значения $x=l=2.95$ м, $\ln 2=0.7$, $k=1.86$ м, $V_1=0.724$ м/с в формулу (15), определяем t_{on} .

$$t_{on} = (2.95 + \frac{0.7}{1.86}) / 0.724 = 4.6 \text{ сек.}$$

Согласно полученным экспериментальным данным, это время составляло $t_{on}^{\circ} = 5.0$ сек.

При опорожнении колонны жидкости через насадок с отверстием диаметра $d_0=1.35$ см, коэффициент ε принят равным 0.62. В этом случае расчетное время $t_{on}=1.6$ сек, а согласно эксперименту, оно было равно $t_{on}^{\circ}=1.8$ сек.

При установке насадка с диаметром отверстия $d_0=1.05$ см коэффициент $\varepsilon=0.61$. В этом случае расчетное время опорожнения $t_{on}=2.18$ сек, а согласно эксперименту, оно составляет $t_{on}^{\circ}=2.3$ сек.

Заключение

Получены простые расчетные формулы, с помощью которых определяется продолжительность опорожнения напорного трубопровода, снабженного на конце насадком.

Сопоставление результатов расчета по полученным формулам с соответствующими экспериментальными данными подтверждает корректность полученных формул.

Литература

1. Արտոնազիր N 2651A. Ճնշումային ոռոգման ավտոմատացված համակարգ / Է. Աշիյանց, Ա. Մարգարյան, Վ. Թորմաշյան, 2012:
2. Дикаревский В.С., Краснянский И.И. Напорные водоводы железнодорожного водоснабжения. - М.: Транспорт, 1978. - 279 с.
3. Сборник задач по машиностроительной гидравлике // Д.А. Бутаев, З.А. Калмыкова, Л.Г. Подвиз и др. - М.: Машиностроение, 1981. - 464 с.
4. Ащиянц Э.П. Гидравлический удар в нагнетательных водоводах. - Ер.: 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. - Ер., 2013. - № 4. - С. 87-91.
6. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1987. - 414 с.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

**Չեղուկի սյան դատարկման տևողության որոշումը
խողովակաշարի վերջնամասում կցափողի
առկայության դեպքում**

Չողվածում դիտարկվում է կցափողով և հաստատուն տրամագծով ճնշումային խողովակաշարից հեղուկի դատարկման տևողությունը: Կցափողի ելքային անցքի տրամագիծը փոքր է խողովակաշարի տրամագծից: Չամապատասխան փոփոխությունների արդյունքում ստացվել են հաշվարկային բանաձևեր, որոնց միջոցով հեշտությամբ որոշվում է խողովակաշարի դատարկման տևողությունը: Ըստ ստացված կախվածությունների՝ հաշվարկի արդյունքները համադրվում են համապատասխան փորձնական տվյալների հետ:

ABSTRACT

**Determining the Duration of the Liquid Column
Drawdown from the Pipeline in Case of Installing
Nozzle on its End Part**

The article discusses the issues related to the duration of the liquid discharge from the pressure pipeline with constant diameter and with a nozzle on its end part. The diameter of the nozzle outlet is smaller than that of the pipeline. In the result of the appropriate transformations, the calculating formulae have been derived with the help of which the duration of the pipeline drawdown is easily determined. The computing results have been compared with the relevant experimental data per received dependences.

Принята: 09.03.2020 г.
Рецензирована: 08.06.2020 г.