

УДК 532.542

ГИДРОМЕХАНИКА

Э.П.Ащиянц,
А.Я.Маркарян,
Т.С.Мартirosян,
А.М.Симонян

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ВОДОВОДАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗДУШНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Рассматривается нестационарное движение колонны жидкости в нагнетательном водоводе, в случае когда в начале колонны на нее воздействует давление воздуха, защемленного в воздушной полости, а конец этой колонны сообщается с атмосферой.

Используя уравнение Бернулли, получены аналитические зависимости, определяющие скорость течения колонны жидкости при различных схемах ее движения в трубопроводе.

Ключевые слова: нагнетательный водовод, воздушная полость, давление воздуха, скорость течения жидкости

При эксплуатации напорных водоводов оросительных систем в них возможны скопления определенных объемов воздуха. В частности, в нагнетательных водоводах переменного уклона, включающих дюкеры, при их частичном опорожнении скопления воздуха возможны в пространстве между неопорожненными колоннами жидкости. При последующем пуске насосных агрегатов и движении этих колонн может произойти увеличение давления воздуха в защемленной между колоннами жидкости воздушной полости, что при их последующем движении приводит к увеличению скорости движения вышерасположенной колонны жидкости, которая принимает максимальные значения в процессе излива этой колонны в атмосферу.

Движение колонны жидкости с большими скоростями может сопровождаться колебаниями давления в трубопроводе и вызывать его вибрацию. В ряде насосных станций Армении (Мхчянская, Аревшатская, Сараланджская и др.) истечение воды из водовода с большой скоростью явилось причиной разрушения ирригационных сооружений [1,2].

Исходя из вышеизложенного, для повышения надежности проектирования и эксплуатации насосных станций необходимо совершенствовать методы расчета параметров нестационарного движения жидкости в нагнетательных водоводах при наличии в них воздушных скоплений.

Целью настоящей работы является разработка более совершенной методики расчета параметров нестационарного движения колонн жидкости в случае воздействия на них воздушных скоплений.

Рассмотрим движение жидкости в нагнетательном водоводе с участками различного уклона (рис.1). Участок водовода AC горизонтальный, а участки CD и DE имеют одинаковую длину, равную L , но различные углы наклона к горизонту α и β (рис.1а). Между колоннами жидкости АВ и CD расположена защемленная воздушная полость ВС, давление воздуха в которой максимально и равно P_M (рис.1 а,б).

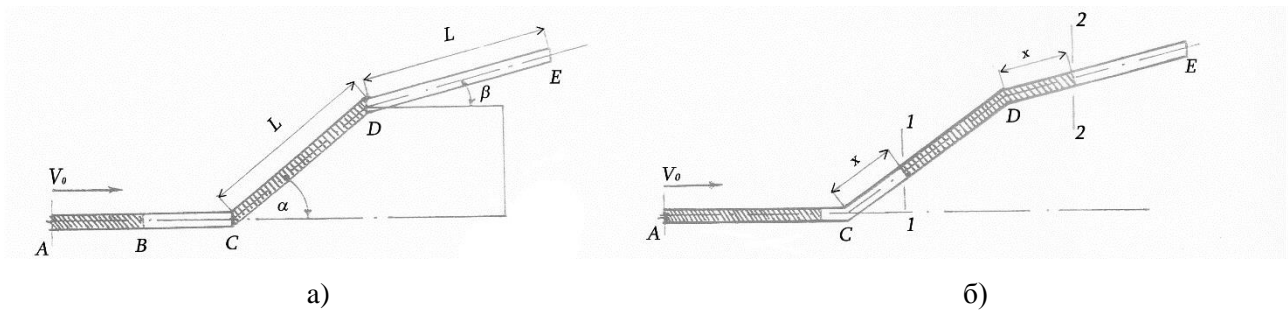


Рис. 1. Расчетная схема концевых участков трубопровода (а), выбор расчетных сечений 1-1 и 2-2 при составлении уравнения Бернулли (б)

При перемещении воздушной полости BC на участок водовода CD происходит заполнение жидкостью участка DE.

Для определения скорости течения колонны CD используется уравнение Бернулли [3] для неустановившегося движения, которое для рассматриваемых сечений 1-1 и 2-2 (рис.1б) можно представить в виде

$$x \sin \alpha + \frac{P(x)}{\rho g} = H_0 + \sin \beta + H_{at} + \left(\frac{\lambda L}{d} + \xi \right) \frac{V^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}, \quad (1)$$

где x - продольная координата оси трубопровода, $P(x)$ - давление воздуха в защемленной воздушной полости, $H_0 = L \sin \alpha$, H_{at} - атмосферное давление, λ - коэффициент гидравлического трения, d - диаметр трубопровода, ξ - коэффициент местных гидравлических сопротивлений, V - средняя скорость течения жидкости, g - ускорение силы тяжести, t - текущее время, ρ - плотность жидкости.

Давление $P(x)$ определяется путем использования уравнения состояния газа при изотермическом процессе сжатия и расширения [4].

$$P(x)W(x) = P_M W_{min}, \quad (2)$$

где W_{min} - минимальный объем воздуха в полости BC при давлении равном P_M , $W(x)$ - изменяющийся объем воздушной полости, который зависит от значения координаты x . Объем $W(x)$ можно представить в виде

$$W(x) = W_{min} + Al(x), \quad (3)$$

где A - площадь сечения трубопровода, $l(x)$ - переменная величина, подлежащая определению.

Используя равенство (3), функцию $P(x)$, входящую в дифференциальное уравнение (1) можно представить в виде

$$H(x) = H_M / \left[1 + \frac{Al(x)}{W_{min}} \right], \quad (4)$$

где $W_{min} = Al_{min}$ l_{min} - линейный размер объема воздуха в воздушной полости при напоре равном H_M .

Так как в рассматриваемой задаче диаметр трубопровода не изменяется, то функцию $H(x)$ можно представить в виде

$$H(x) = H_M / [1 + l(x)/l_{мин}] , \quad (5)$$

где параметры H_M и $l_{мин}$ считаются известными, а функция $l(x)$ должна обеспечивать выполнение следующих граничных условий:

$$\text{при } x = 0 \quad H_{(0)} = H_M ; \quad (6)$$

$$\text{при } x = L \quad H(L) = H_{ам} + L \sin \beta .$$

Указанным условиям удовлетворяет функция вида

$$l(x) = x l_1 / L, \quad (7)$$

$$\text{где} \quad l_1 = \frac{H_M l_{мин}}{(H_{ам} + L \sin \beta)} - l_{мин} . \quad (8)$$

Подставляя выражение (7) в (5), получим

$$H(x) = H_M / (1 + Kx), \quad (9)$$

где $K = l_1 / L l_{мин}$.

Подставляя (9) в уравнение (1) и заменяя в этом уравнении производную dV/dt на $dV^2/2dx$ [5], получим

$$x \sin \alpha + H_M / (1 + Kx) = H_0 + x \sin \beta + H_{ам} + \left(\frac{\lambda L}{d} + \xi \right) \frac{V^2}{2g} + \frac{L}{2g} \frac{dV^2}{dx} . \quad (10)$$

Уравнение (10) интегрируется численными методами с применением компьютера. Однако при практических расчетах особую ценность представляют аналитические зависимости, с помощью которых можно выявить влияние каждого параметра, входящего в дифференциальное уравнение.

В (10) слагаемое $\left(\frac{\lambda L}{d} + \xi \right) \frac{V^2}{2g}$ определяет влияние гидравлических сопротивлений.

Сначала решается поставленная задача без учета гидравлических сопротивлений. В этом случае обозначая V^2 через y и $M = L/2g$, получаем уравнение

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{M} [(\sin \alpha - \sin \beta)x + H_M / (1 + Kx) - (H_0 - H_{ам})] . \quad (11)$$

Уравнение (11) интегрируется при начальном условии: при $x = 0 \quad V = V_0$.

В результате интегрирования получается зависимость для определения скорости течения жидкости

$$V(x) = \sqrt{V_0^2 + \frac{1}{M} \left[(\sin \alpha - \sin \beta) \frac{x^2}{2} + \frac{H_M}{K} \ln(1 + Kx) - (H_0 + H_{ам})x \right]} , \quad (12)$$

в которой координата x изменяется в пределах $(0 < x \leq L)$.

На рис.2 показан график функции (12), построенный при следующих численных значениях расчетных параметров:

$$V_0 = 2,5 \text{ м/с}, \quad M = 0,357 \text{ с}^2, \quad \sin \alpha = 0,43, \sin \beta = 0,143, \quad H_M = 18 \text{ м}, \quad K = 0,09, \quad H_0 = 3 \text{ м}, \\ H_{am} = 10 \text{ м}, \quad l_{min} = 1,15 \text{ м}.$$

Из графика 1 видно, что по мере увеличения численного значения x скорость течения жидкости увеличивается достигая максимального значения $V_{max} = 6,75 \text{ м/с}$ при $x = 7 \text{ м}$.

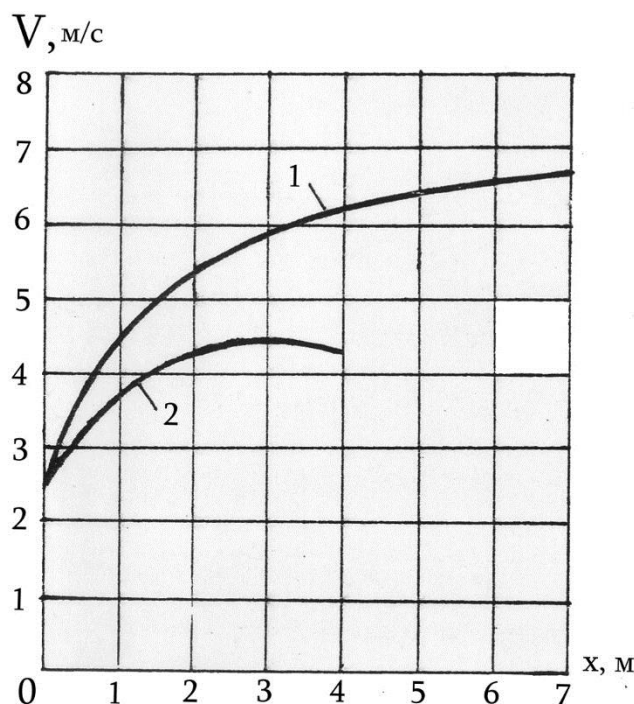


Рис. 2. Изменение скорости течения жидкости на конечном участке трубопровода: 1-по формуле (12), 2-по формуле (15)

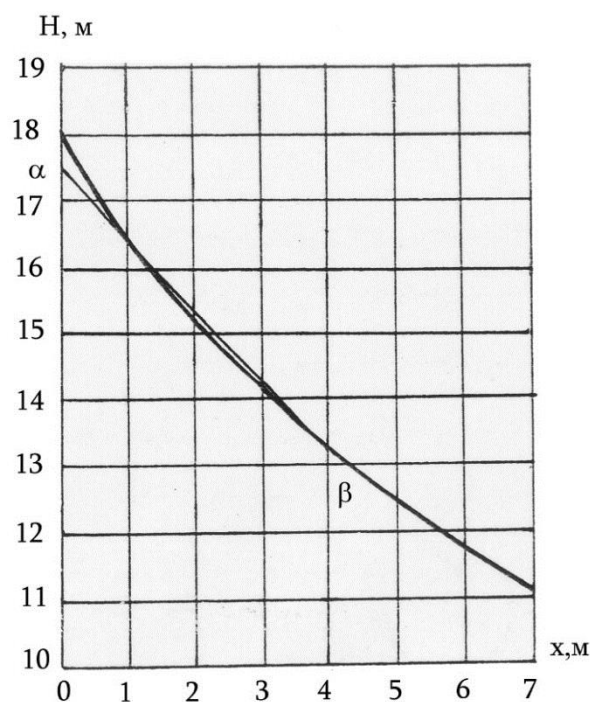


Рис. 3. Изменение давления воздуха в защемленной воздушной полости

При учете влияния гидравлических сопротивлений, скорость течения рассматриваемой колонны CD уменьшается.

Для определения реальной скорости течения жидкости функция (9) (рис.3) в интервале изменения независимой переменной $0 < x < 4$ заменяется линейной функцией вида

$$H_1(x) = H'_M (1 - K_1 x), \quad (13)$$

где $H'_M = 17,5 \text{ м}$ (рис.3), $K_1 = 0,06$.

Подставляя в уравнение (10) вместо функции (9) функцию (13), получаем дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dy}{dx} + py = (A_1 + B_1 x) / M, \quad (14)$$

где $P = (\lambda / d + \xi / L)$, $A_1 = (H'_M - H_0 - H_{am})$, $B_1 = (\sin \alpha - \sin \beta - H'_M K_1)$.

Интегрируя (14) при вышеуказанных начальных условиях, получим

$$V(x) = \sqrt{V_0^2 e^{-px} + \frac{1}{MP} \left\{ A_1 (1 - e^{-px}) + \frac{B_1}{P} [(px - 1) + e^{-px}] \right\}}. \quad (15)$$

На рис.2 показана кривая 2 функции (15), построенная при вышеуказанных численных значениях M , $\sin \alpha$, $\sin \beta$, H_0 , L и при новом значении $H'_M = 17,5 \text{ м}$ и $K_1 = 0,06$.

Коэффициент трения λ принят равным 0,016, а коэффициент $\xi = 0,1$.

Из графика 2 (рис.2) видно, что при $x = 3$ значение скорости течения колонны жидкости CD максимально и равно $V_{\max} = 4,37 \text{ м/с}$.

Таким образом, расчеты показывают, что в случае воздействия на колонну CD давления воздуха в защемленной воздушной полости, скорость движения этой колонны значительно превышает ее начальное значение $V_0 = 2,5 \text{ м/с}$.

Рассмотрим теперь другую расчетную схему течения колонны жидкости на концевом участке водовода при дополнительном воздействии на нее давления воздуха в защемленной между колоннами жидкости воздушной полости (рис.4). Как видно из рис.4 концевой участок трубопровода CD длиной L имеет наклон к горизонту под углом α . Между колоннами жидкости AB и CD расположена воздушная полость BC. Давление воздуха в указанной полости при подходе ее к сечению водовода 1-1 максимально и равно H_M .

При перемещении воздушной полости на участок водовода CD начинается истечение жидкости из трубопровода в атмосферу, в результате чего длина колонны жидкости между передней границей воздушной полости и концом трубопровода все время уменьшается и стремится к нулю.

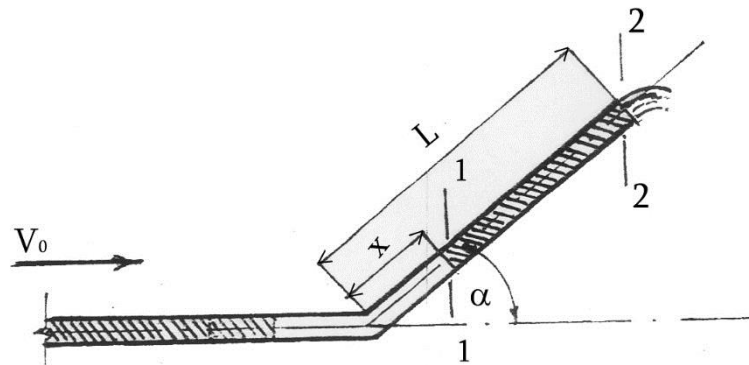


Рис. 4. Расчетная схема концевой участка трубопровода

Для определения скорости истечения жидкости из трубопровода, так же как и ранее используется уравнение Бернулли, которое для рассматриваемых сечений 1-1 и 2-2 (рис.3) имеет вид

$$x \sin \alpha + H(x) = H_0 + H_{am} + \frac{\lambda(L-x)}{d} \frac{V^2}{2g} + \frac{(L-x)}{2g} \frac{dV^2}{dx}, \quad (16)$$

где $H(x)$ - изменяющееся давление в воздушной полости, которое представляется в виде

$$H(x) = H_M \left[1 + \frac{l(x)}{l_{\min}} \right], \quad (17)$$

где функция $l(x)$ должна удовлетворять следующим граничным условиям:

$$\text{при } x=0 \quad H_{(0)} = H_M, \quad (18)$$

$$\text{при } x=L \quad H_{(L)} = H_{am}.$$

Указанным условиям удовлетворяет функция вида

$$l(x) = x l_2 / l_0, \quad (19)$$

где $l_2 = l_0 - l_{мин}$. l_0 - длина воздушной полости при атмосферном давлении H_{am} .

Имея значения H_M и $l_{мин}$ из уравнения (2), определяется значение параметра l_0 , а затем и значение l_2 .

Таким образом, функцию (17) представляем в виде

$$H(x) = H_M / [1 + K_2 x], \quad (20)$$

$$\text{где } K_2 = l_2 / l_{мин} \cdot L. \quad (21)$$

Подставляя в (16) значение (20), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{(L-x)}{2g} \frac{dV^2}{dx} + \frac{\lambda(L-x)}{d} \frac{V^2}{2g} = x \sin \alpha + \frac{H_M}{(1+K_2 x)} - (H_0 + H_{am}). \quad (22)$$

При аналитическом интегрировании уравнения (22) вначале не учитывается влияние гидравлических сопротивлений. При этом функция (20) представляется в виде

$$H(x) = H_M \left[1 - \frac{K_2 x}{(1+K_2 x)} \right] \text{ и обозначая } V^2 = y, [H_M - (H_0 + H_{am})] = C, \frac{K_2 x}{(1+K_2 x)} = \frac{x}{(\beta + x)} \text{ где}$$

$$\beta = \frac{1}{K_2}, \text{ получается уравнение вида}$$

$$\frac{dy}{dx} = 2g \left[\frac{C}{(L-x)} + \frac{x}{(L-x)} \sin \alpha - H_M \frac{x}{(\beta + x)(L-x)} \right]. \quad (23)$$

В результате интегрирования (23) при начальном условии: при $x=0 \quad V=V_0$, где значение координаты x изменяется в пределах $0 < x < L$, получена зависимость, определяющая скорость истечения жидкости из трубопровода в атмосферу до момента подхода воздушной плоскости к концу трубопровода

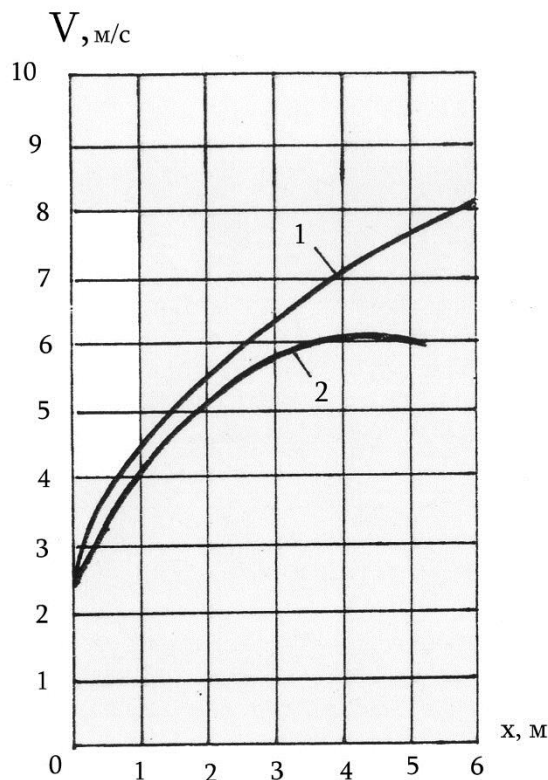
$$V(x) = \sqrt{V_0^2 + 2g \left\{ D \ln \frac{L}{(L-x)} - x \sin \alpha + H_M \left[E \ln \frac{\beta}{(\beta + x)} + G \ln \frac{(L-x)}{L} \right] \right\}}, \quad (24)$$

где $D = C + L \sin \alpha$, $E = -\beta(L + \beta)$, $G = L/(L + \beta)$.

На рис.5 показан график функции (24), построенный при следующих численных значениях расчетных параметров:

$$V_0 = 2,5 \text{ м/с}, M = 0,357 \text{ с}^2, \sin \alpha = 0,43, H_M = 18 \text{ м}, H_0 = 3 \text{ м}, H_{am} = 10 \text{ м}, L = 7 \text{ м}, C = 5 \text{ м}, \\ l_0 = 3 \text{ м}, l_{мин} = 1,67 \text{ м}, l_1 = 1,33 \text{ м}, K_2 = 0,114, \beta = 8,77 \text{ м}, D = 8,01 \text{ м}, E = -0,556 \text{ м}, G = 0,44 \text{ м}.$$

Как видно из графика 1 (рис.5), скорость истечения жидкости из трубопровода в атмосферу при $x = 6$ м превышает 8 м/с, что по сравнению с ранее рассмотренной схемой движения (рис.1) значительно больше.



**Рис. 5. Изменение скорости течения жидкости при выходе из трубопровода:
1-по формуле (24), 2-по формуле (26)**

В случае движения реальной жидкости используется уравнение (22), в котором слагаемое $\frac{\lambda(L-x)}{d} \frac{V^2}{2g}$ заменяется выражением $\xi \frac{V^2}{2g}$, где ξ принимается при интегрировании постоянной величиной, а функция $H(x) = H_M / (1 + K_2 x)$ в интервале $0 < x \leq 5$ м заменяется линейной функцией и для решения задачи используется дифференциальное уравнение вида

$$\frac{(L-x)}{d} \frac{dV^2}{dx} + \xi \frac{V^2}{2g} = x \sin \alpha + H'_M (1 - K_3 x) - (H_0 + H_{am}). \quad (25)$$

В результате интегрирования (25) получается зависимость, определяющая скорость истечения жидкости из трубопровода в атмосферу

$$V(x) = \sqrt{V_0^2 \left(\frac{L-x}{L}\right)^{\xi(x)} + \frac{A_1}{\xi(x)} \left[1 - \left(\frac{L-x}{L}\right)^{\xi(x)}\right] + B_1 \left\{ \left[\frac{1}{\xi(x)} + \frac{L}{(L-x)(1+\xi(x))} \right] - \left[\frac{1}{\xi(x)} + \frac{1}{1+\xi(x)} \right] \right\}}, \quad (26)$$

где параметр ξ уже не является постоянной величиной, а зависит от независимой переменной x . Значение $\xi(x)$, согласно рекомендациям, приведенным в работе [5], определяется по формуле

$$\xi(x) = \frac{ax}{(1 - e^{-ax})} - 1, \quad (27)$$

где $a = \lambda / d$.

На рис.5 (кривая 2) показан график функции (26), построенный с использованием вышеуказанных численных значений расчетных параметров. Как видно из графика, при учете влияния гидравлических сопротивлений скорость истечения жидкости из трубопровода в атмосферу существенно меньше и ее максимальное значение не превышает 6,16 м/с.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при дополнительном воздействии давления воздуха, защемленного между движущимися колоннами жидкости в трубопроводе, скорость течения этих колонн может превысить их стационарные значения. При этом скорость течения жидкости принимает максимальные значения в случае, когда при истечении жидкости из трубопровода в атмосферу длина этой колонны уменьшается и стремится к нулю.

Է.Պ.Աշիյանց,
Ա.Յա.Մարգարյան,
Տ.Ս.Մարտիրոսյան,
Ա.Մ.Միմոնյան

ՄՂՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ ՕՂԻ ԿՈՒՏԱԿՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ ՀԵՂՈՒԿԻ ՈՉ

ՍՏԱՑԻՈՆԱՐ ՇԱՐԺՈՒՄԸ

Դիտարկվում է հեղուկի սյան շարժումը մղման խողովակաշարում, երբ դրա սկզբում ազդում է սեղմված խոռոչում գտնվող օդի ճնշումը, իսկ սյունի վերջում գոյությունի ունի մթնոլորտային ճնշում: Օգտագործելով Բեռնուլիի հավասարումը՝ ստացված են վերլուծական բանաձևեր, որոնց օգնությամբ որոշվում է հեղուկի սյան արագությունը խողովակաշարում դրա շարժման տարբեր սխեմաների դեպքում:

Առանցքային բառեր. մղման խողովակաշար, հեղուկ, օդային խոռոչ, ճնշում, արագություն

E.P.Ashchiyants,
A.Ya.Margaryan,
T.S.Martirosyan,
A.M.Simonyan

UNSTEADY FLUID MOTION IN FORCE PIPELINES IN THE PRESENCE OF AIR

ACCUMULATE

Unsteady motion of the fluid column in force pipeline is considered, in case when at the beginning of the column it is affected by the air pressure entrapped in the air cavity and end of the column intercommunicates with atmosphere.

By using Bernoulli equation analytical dependences are derived determining the flow velocity of the fluid column in different schemes of its movement in the pipeline.

Keywords: force pipeline, air cavity, air pressure, fluid motion velocity

Литература

1. Ащиянц Э.П., Рафаэлян Р.М. Неустановившиеся движение в частично опорожненном трубопроводе при пуске насосного агрегата //Материалы научно-технической конференции молодых научных работников и специалистов Минводхоза Армянской ССР. - Ереван, 1977. - С.172-177.
2. Մարգարյան Ա.Յ. Ջրային էներգիայի օգտագործման և խողովակաշարերի պաշտպանության հիմնախնդիրները: Տեխն.գիտ. դոկտորի ... ատենախ. սեղմագիր. - Երևան, 2010. - 48 էջ:
3. Հովսեփյան Վ.Մ. Հիդրավլիկա և աերոդինամիկայի տարրերը. - Երևան: Լույս, 1988. - 496 էջ:
4. Сборник задач по машиностроительной гидравлике /Д.А.Бутаев, З.А.Калмыкова, В.Г.Подвиз и др. - М.: Машиностроение, 1981.- 464 с.
5. Ащиянц Э.П., Токмаджян В.О. Определение гидравлических параметров нестационарного процесса при опорожнении нагнетательного водовода //Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН. - 2015. - Т.68, №1.- С.100-107.

Աշխատանքն իրականացված է ՀՀ պետական բյուջեից գիտական և գիտատեխնիկական գործունեության թեմատիկ ֆինանսավորման 15-Т-2К136 և ՀՀ պետական բյուջեից գիտական և գիտատեխնիկական գործունեության բազային ֆինանսավորմամբ «ՀՀ ջրային համակարգերի պահպանում, զարգացում և կատարելագործում» ծրագրերի շրջանակում:

Աշխիանց Էդուարդ Պետրոսի, տ.գ.դ-ր (ՀՀ, ք. Երևան) – ՃՀՀԱՀ, ակ. Ի.Վ.Եղիազարյուրի անվան Ջրային հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտ, ա.գ.ա, (+374) 10 557966, (+374) 10653270, Մարգարյան Ալբերտ Յախշիբեկի, տ.գ.դ-ր, պրոֆեսոր (ՀՀ, ք. Երևան) - ՃՀՀԱՀ, ՀՀ ջրային համակարգերի պահպանում, զարգացում և կատարելագործում պրոբլեմային լաբորատորիա, ա.գ.ա., Հիդրավլիկայի ամբիոնի վարիչ, (+374) 91412725, Մարտիրոսյան Տիգրան Մերյոյանի, տնտ.դ-ր, պրոֆեսոր (ՀՀ, ք. Երևան) – ՃՀՀԱՀ, Կառավարման և տեխնոլոգիայի ֆակուլտետի դեկան, (+374) 99077667, (+374) 10583763, Միմոնյան Արմեն Մարտիրոսի, տ.գ.թ., դոցենտ (ՀՀ, ք. Երևան) - ՃՀՀԱՀ, ակ. Ի.Վ.Եղիազարյուրի անվան Ջրային հիմնահարցերի և հիդրոտեխնիկայի ինստիտուտ, թեմայի ղեկավար, (+374) 95111408, (+374) 10653270:

Ащиянц Эдуард Петрович, д.т.н. (РА, г.Ереван) – НУАСА, институт Водных проблем и гидротехники им. ак. И.В.Егизарова, с.н.с., (+374) 10557966, (+374) 10653270, Маркарян Альберт Яхшибекович, д.т.н., профессор (РА, г. Ереван) - НУАСА, Проблемная лаборатория «Сохранение, развитие и усовершенствование водных систем РА», зав.кафедрой Гидравлики, (+374) 091412725, Мартиросян Тигран Серезжаевич, доктор экономики, профессор (РА, г. Ереван) – НУАСА, декан факультета Управления и технологии. (+374) 99077667, (+374) 10583763, Симонян Армен Мартинович, канд.техн.наук, доцент (РА, г.Ереван) – НУАСА, институт Водных проблем и гидротехники им. ак. И.В.Егизарова, руководитель темы, (+374) 95111408, (+374) 10653270.

Ashchianys Eduard Petros, doctor of technical sciences (engineering) (RA, Yerevan) - NUACA, Institute of Water Problems and Hydraulic Engineering named of academician I.V.Yeghiazarov, senior scientific researches., (+374) 10557966, (+374) 10653270, Margaryan Albert Yakhshibek, doctor of technical sciences (engineering), professor (RA, Yerevan) - NUACA, Problem laboratory of conservation, development and improvement of RA water systems, senior researcher, head of the chair of Hydraulics. (+374) 91412725, Martirosyan Tigran Seryoja, doctor of Economics (RA, Yerevan) - NUACA, Dean of faculty of Management and Technology, (+374) 99077667, (+374) 10583763, Simonyan Armen Martin, doctor of Philosophy (PhD) in engineering, associate prof. (RA Yerevan) - NUACA, Institute of Water Problems and Hydraulic Engineering by academician I.V.Yeghiazarov, chief of programme, (+374) 095111408, (+374) 10653270.

Ներկայացվել է՝ 19.12.2016թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 21.12.2016թ.