

5. **Chugaev R.R.** Гидравлика. – Л.: Энергоиздат Л.О, 1982. – 672 с.
6. **Agroskin I.I.** Tablitsy dlya gidravlicheskih raschetov. – М.–Л.: Gosenergoizdat, 1946. – 198 с.
7. **Kisilev P.G.** Spravochnik po dlya gidravlicheskim raschetam. – М.: Gosenergoizdat, 1972. – 312 с.
8. **Kuznetsov E.V., Khadjiev A.E., Orlenko S.Yu.** Гидравлический расчет открытых русел и гидротехнических сооружений. – Краснодар: FGOU VPO KubGAU, 2009. – 75 с.
9. **Bahmetev B.A.** O neravnomernom dvizhenii zhidkosti v otkrytom rusle. – Л.: Kubuch, 1932. – 306 с.
10. Rekomendatsii po gidravlicheskomu raschetu vodopropusknyh traktov beznapornyyh vodosbrosov na aeratsiyu i volnoobrazovanie. VSN-01 p 66-77/VNIIG. – Л.: 1978. – 52 с.
11. **Chugaev R.R.** Гидравлика. Технические механика жидкости. – М.: GEI, 1963. – 528 с.
12. Elektronny arhiv GPNTB Rossii gpntb.dlibrary.org. Chernomorsky V.I. Zadachi na ustanovivsheesya neravnomernoe techenie vody v otkrytyh pryamyh ruslah s pryamolineinym i trapetseidalnym poperechnym secheniem. – SPb: 1914. – 132 с.
13. De Saint-Venant. Formules et tables Nouvelles pour la solution des problemes relatifs aux eaux courantes. Annales des mines 1851 2<sup>ime</sup> semester
14. Vremennyye ukazaniya po gidravlicheskomu raschetu poverhnostnyh vodosbrosov vysokih gravitatsionnyh plotin. VSN-01-65. GPKEiE SSSR. Energiya. – М.–Л.: Energiya, 1965. – 28 с.
15. Metodicheskie ukazaniya po gidravlicheskomu raschetu kosogornyyh trub. Otделение koordinatsii nauchno-issledovatel'skikh rabot VNIITS. – М.: 1967 г.
16. Rekomendatsii po gidravlicheskomu raschetu vodopropusknyh traktov beznapornyyh vodosbrosov na aeratsiyu i volnoobrazovanie. VSN-01 p 66-77/VNIIG. – Л.: 1978. – 52 с.
17. **Lupina T.A.** Raschet neravnomernogo dvizheniya zhidkosti v otkrytyh ruslah v sisteme mathcad. – М.: МИИТ, 2009. – 44 с.

The material was received at the editorial office  
25.04.2020

#### Information about the authors

**Guryev Alim Petrovitch**, doctor of technical sciences, professor of the department of engineering structures, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Pryanishnikova, 19; e-mail: alim\_guryev@mail.ru

**Haek Bushra Ali**, post graduate student of the department of complex usage of water resources and hydraulics, FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Pryanishnikova, 19, e-mail: bushra.hayek@gmail.com

УДК 502/504: 626.83:532.5

DOI 10.26897/1997-6011/2020-4-122-128

**М.С. АЛИ, Д.С. БЕГЛЯРОВ, Э.Е. НАЗАРКИН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОВОДАХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ РАЗРЫВОВ СПЛОШНОСТИ ПОТОКА

*Цель работы – разработка методики инженерного расчета неустановившегося процесса в газожидкостных смесях в сложных гидросистемах. При определении оптимального варианта режима работы напорной системе необходимо учитывать переходные процессы, возникновение которых связано с изменением режима работы насосных агрегатов: аварийные и плановые отключения, запуск насосов, регулирование их работы, изменение степени открытия запорной и запорно-предохранительной арматуры. Именно поэтому необходимо иметь возможность определять изменения параметров напорных систем водоподачи при переходных процессах. Учет наличия нерастворенного воздуха в гидросистемах является одним из важнейших факторов для обеспечения достоверности расчета, так как наличие воздуха приводит к повышенной сжимаемости среды, за счет чего и возникают резкие колебания давления. В результате работы были сделаны следующие выводы: объем нерастворенного воздуха может составлять от 0.01 до 2%; наиболее простой и эффективной мерой борьбы с недопустимым*

повышением давления при гидравлическом ударе, вызываемом отключением двигателя, является пропуск воды через насос в сочетании с впуском и заземлением воздуха в местах образования разрыва сплошности потока. В напорных трубопроводах, транспортирующих однофазную жидкость (например, воду), всегда имеется небольшое количество нерастворенного воздуха, которая оказывает существенное влияние на нестационарные процессы, возникающие в трубопроводах. Поэтому при определенных условиях следует даже однофазную жидкость рассматривать как двухфазную и учитывать это обстоятельство при расчетах напорного неустановившегося движения и гидравлического удара в трубах

*Насосные станции, напорные системы водоподачи, переходные процессы, гидравлический удар, подача, напор, скорость движения воды, волны изменения давления, кавитационный разрыв сплошности потока.*

**Введение.** Под гидравлической системой понимается совокупность сооружений и других устройств, связанных между собой в пространстве гидравлическими магистралями (трубопроводами) в единый технологический комплекс.

Гидросистема предназначена для обеспечения целенаправленного функционирования технологических объектов с помощью стационарных или нестационарных потоков жидкости в магистралях. При этом под стационарным режимом понимается такой режим работы гидросистемы, при котором ее конструктивные элементы за рассматриваемый промежуток времени не меняют своих гидравлических или технических характеристик.

Расчет гидросистем часто связан с их проверкой на надежность функционирования при определенном сочетании составляющих элементов.

В отличие от стационарного в нестационарном режиме как характеристики элементов гидросистем, так и величины входных и выходных параметров, могут меняться непосредственно в течение рассматриваемого отрезка времени. Общим случаем нестационарного процесса является такой случай, при котором изменение режима течения жидкости происходит непрерывно. В частном случае нестационарного процесса, называемого переходным, рассчитываются параметры гидродинамического процесса при переходе системы из работы в одном стационарном режиме в другой. Таким образом, стационарный режим является исходным и конечным этапом расчета гидросистем в переходных режимах.

К гидросистемам, для которых стационарный режим является рабочим, относятся гидротранспортные системы: водоснабжения, мелиорации, транспортирования полезных ископаемых и т.п. На этапе проектирования любой гидравлической системы происходит создание ее математической модели [1, 2].

**Материалы и методы.** Рассмотрим причины, вызывающие переходные процессы

в напорных системах водоподачи, которые включают в себя: источник питания (насосная станция или в отдельных случаях резервуар, расположенный в повышенном месте); напорные трубопроводы или сеть напорных трубопроводов; водопотребители (водовыпускные сооружения, дождевальные машины и другие водозаборные устройства), а также арматуру различного назначения (запорную, регулирующую, предохранительную и др.).

В основу математической модели положены классические методы и уравнения [3], а именно:

- уравнение движения (закон сохранения количества движения), выражающий соответствие между внешними силами в направлении оси  $x$ , приложенными к единице объема жидкости, имеющей плотность  $\rho$ , а также силами инерции и сопротивления (трения), действующими на эту единицу объема в любой момент времени  $t$ ;

- уравнение неразрывности (сплошности), выражающее закон сохранения материи и устанавливающее соотношение между скоростью жидкости  $V$ , плотностью  $\rho$ , пространственной координатой  $x$  и времени  $t$ . Все параметры, кроме давления  $P$  и скорости  $V$ , должны быть известными или заданными функциями давления и скорости.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \lambda \frac{|v|v}{2d} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

где  $H$  и  $V$  – напор и скорость движения воды, соответственно м и м/с;  $x$  – координата;  $t$  – время, с;  $a$ . скорость распространения волн, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр трубопровода, мм;  $\lambda$  – коэффициент сопротивления на трение по длине трубопровода.

Решение трехмерной задачи, связанной с нестационарными процессами движения жидкости в трубопроводах, практически едва ли осуществимо, но даже если ее

и можно было решить, особая в этом необходимость во многих случаях отсутствует. Поэтому обычно задачу значительно упрощают и рассматривают как одномерную, то есть все вышеуказанные величины считают функциями только координаты  $x$  и времени  $t$ , причем  $x$  обычно принимают направленным по оси трубопровода, а  $P$ ,  $V$ ,  $\rho$  и  $T$  в этом случае будут представлять средние по сечению трубы значения. Температура воды  $T$  в трубопроводах мелиоративных напорных систем водоподачи изменяется незначительно, поэтому ее можно принять постоянной, и число неизвестных сократится еще. Наконец, плотность воды  $\rho$  можно принять зависящей только от давления  $P$ .

Таким образом, неизвестными функциями остаются давление  $P$  (напор  $H = \frac{P}{\rho g} + z$ ) и скорость движения воды  $V$  (расход  $Q = V \cdot W$ ).

Уравнения (1) и (2) являются системой квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. Для системы уравнений, записанных в таком виде, аналитических решений нет, поэтому необходимо упрощение этих уравнений [4]. Практически для этого необходимо пренебречь членами  $v \frac{\partial v}{\partial x}$ ,  $\lambda \frac{|v|v}{2d}$  и членом  $v \frac{\partial H}{\partial x}$ . Тогда уравнения (1) и (2) примут вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Дифференцируя уравнение (3) по  $t$ , а уравнение (4) по  $x$ , получаем:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = g \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t}, \text{ и } \frac{\partial H}{\partial t \partial x} = \frac{\alpha^2}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}.$$

Общее их решение заключается в следующем:

$$H = H_0 + \varphi\left(t - \frac{x}{\alpha}\right) + \psi\left(t + \frac{x}{\alpha}\right);$$

$$V = V_0 + \frac{g}{\alpha \varphi\left(t - \frac{x}{\alpha}\right)} - \frac{g}{\alpha \psi\left(t + \frac{x}{\alpha}\right)},$$

где  $H_0$  и  $V_0$  – начальные напор и скорость движения воды (до возникновения переходного процесса);  $\varphi\left(t - \frac{x}{\alpha}\right)$  и  $\psi\left(t + \frac{x}{\alpha}\right)$  – функции, представляющие собой волны изменения давления (напор), распространяющиеся по направлению оси  $x$  и соответственно против этого направления.

Для получения частного решения необходимо задание начальных и граничных (краевых) условий. Для простого трубопровода, то есть трубопровода одного и того же диаметра по длине  $L$ , без отборов из него воды начальными условиями будут  $H = H_0$  и  $V = V_0$  ( $0 \leq x \leq L$ ).

Краевые условия характеризуются возмущением потока на границах трубопровода, и по ним определяют  $\varphi$  и  $\psi$ . Изменение напора непосредственно зависит от скорости распространения волн  $\alpha$ .

При наличии в воде нерастворенного воздуха скорость распространения волн  $\alpha$  может уменьшаться значительно, что объясняется существенным увеличением сжимаемости жидкости; плотность при этом практически не изменяется.

Применение современных технологий позволило значительно усовершенствовать методику проведения расчетов переходных процессов в напорных системах водоподачи [5].

**Результаты и обсуждение.** Повышение давления в трубопроводах при гидравлических переходных процессах иногда может быть весьма значительным. Соответствующее понижение давления в трубопроводе может иметь место, если сумма начального давления  $P_0$  и предельного значения вакуума в трубопроводе  $P_{\text{вак}}^{\text{max}}$  не меньше величины изменения давления  $\Delta P$ . Это предельное значение вакуума  $P_{\text{вак}}^{\text{max}}$  соответствует давлению насыщенных паров жидкости. При снижении давления ниже величины  $P_0 + P_{\text{вак}}^{\text{max}}$  происходит переход жидкости в парообразное состояние, и сплошность потока нарушается [6].

В случаях подачи по трубопроводам воды с нормальной температурой (10...20°C) разрывы сплошности образуются при давлении ниже атмосферного, но практически всегда при более высоких значениях, чем давление насыщенных паров воды. Это происходит вследствие того, что в воде всегда имеется какое-то количество растворенного и нерастворенного воздуха. Растворенный воздух при уменьшении давления выделяется из воды, а нерастворенный значительно увеличивается в объеме, заполняя разрывы сплошности потока.

При распространении волн пониженного давления по трубопроводу наиболее быстро давление уменьшается в повышенных местах его трассы, где наиболее вероятно образование разрывов сплошности

потока. При этом разрывы сплошности потока будут сосредоточенными, то есть области трубопровода, заполненные парами воды и выделившимися газами, будут находиться между колоннами воды. Следует, однако, отметить, что в этих случаях разрывы по сечению трубопровода практически могут быть неполными в нижней части трубопровода может находиться вода.

Образование сосредоточенных разрывов сплошности потока было отмечено еще Н.Е. Жуковским. Однако какие-либо расчеты гидравлического удара в условиях образования разрывов сплошности потока в трубопроводах тогда еще не проводились.

Впервые исследования гидравлического удара, сопровождающегося образованием разрывов сплошности потока, были проведены Л.Ф. Мошниним [7], когда была получена формула, которая может быть записана как

$$\Delta H = \frac{\alpha V_0}{g} + 2(H_{ст} - \Delta h), \quad (5)$$

где  $H_{ст}$  – статический напор в месте образования разрыва сплошности потока;

$$\Delta h = \frac{\alpha V_0}{g} - H_{ст} \text{ при } H_{ст} < \frac{\alpha V_0}{g} < 2H_{ст};$$

$$\Delta h = \frac{\alpha V_0}{g} - 2H_{ст} \text{ при } 2H_{ст} < \frac{\alpha V_0}{g} < 3H_{ст} \text{ и т.д.}$$

При  $\Delta h \rightarrow 0$  пределом повышения напора в трубопроводе, таким образом, является

$$\Delta H_{max} = \frac{\alpha V_0}{g} + 2H_{ст}. \quad (6)$$

При выводе этой формулы были сделаны следующие допущения:

- граница между областью разрыва сплошности потока и водой представляет собой плоскость, перпендикулярную оси трубопровода;
- изменение длины части трубопровода, заполненного водой, не учитывается;
- разрыв сплошности потока предполагается только в одном месте трубопровода;
- гидравлический удар вызывается мгновенным перекрытием сечения трубопровода в его канале;
- потери напора в трубопроводе не учитываются;
- в месте разрыва сплошности потока установлен аэрационный клапан (для

впуска воздуха), через который воздух свободно (без потерь давления) входит в трубопровод при давлении ниже атмосферного и выходит при повышении сверх атмосферного [8].

Совершенно очевидно, что максимальное повышение давления, определенное по формуле (6), может быть весьма значительным, причем если учесть, что образование кавитационного разрыва сплошности потока происходит не при атмосферном давлении, а при предельном значении вакуума  $P_{вак}^{max}$ , то расчетное повышение давления будет еще большим. Для этого формулы (5) и (6) необходимо записать в виде:

$$\Delta H = \frac{\alpha V_0}{g} + 2(H_{ст} + h_{вак}^{max} - \Delta h);$$

$$\Delta H_{max} = \frac{\alpha V_0}{g} + 2(H_{ст} + h_{вак}^{max}).$$

Исследование влияние разрывов сплошности потока на протекание переходных процессов является особенно необходимым, так как повышение давления в этих условиях может быть весьма значительным. Наиболее простым и дешевым средством защиты от повышения давления в этих условиях является выпуск воздуха в места образования разрывов с его последующим сжатием. Авторами работы были проведены расчетно-теоретические исследования влияния выпуска воздуха при расположении аэрационного клапана (рис. 1) в различных точках при длине трубопровода, указанной в работах [9, 10].

При проведении расчетов переходных процессов было принято, что скорость движения воды в начале трубопровода мгновенно снижается до нуля, потери напора не учитывались, аэрационный клапан принимался установленным на 8 м выше уровня воды в водоисточнике, и образования кавитационных разрывов сплошности в трубопроводе не происходило. Характер профиля трубопровода варьировался изменением отношения точки установки клапана от начала трубопровода к его длине  $L$  (значение  $\frac{x}{L}$  было принято равным: 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8). Расчеты проводились при статических напорах  $H_{ст}$  от 16 до 32 м. Результаты расчетов оформлены в виде безразмерных графиков, каждый из которых построен для определенного отношения  $\frac{x}{L}$ .

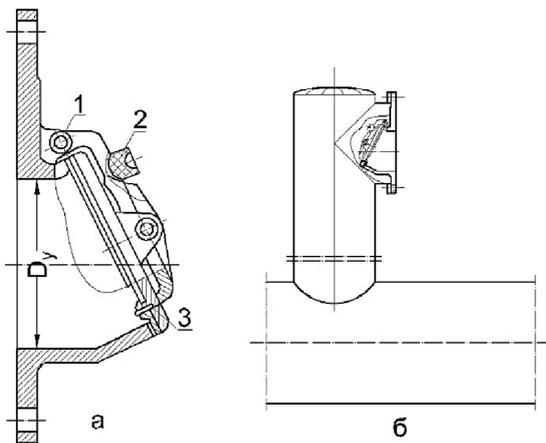


Рис. 1. Аэрационный клапан (клапан для впуска и заземления воздуха):

а – схема клапана

1 – ось для подвески диска;

2 – ограничитель хода диска;

3 – диск с резиновым уплотнением);

б – схема установки клапана

Пример графика зависимости  $\frac{H_{\max}}{H_{\text{ст}}}$  от  $\frac{\alpha V_0}{gH_{\text{ст}}}$  для  $\frac{x}{L} = 0,1$  показан на рисунке 2.

При относительно равномерных подъемах трубопровода к водовыпуску образование кавитационного разрыва сплошности возможно по всей длине после места установки аэрационного клапана. Для устранения кавитационных разрывов сплошности потока необходимо устанавливать на трубопроводе несколько аэрационных клапанов.

Результаты этих расчетов, как и следовало ожидать, подтвердили, что гидравлическое сопротивление оказывает смягчающее влияние на протекание переходного процесса, и повышение давления в трубопроводе с увеличением потерь напора уменьшается.

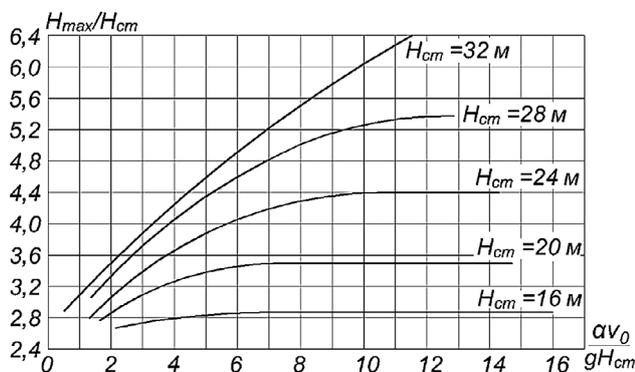


Рис. 2. График для определения максимального напора в трубопроводе при впуске воздуха в место разрыва сплошности потока аэрационного клапана по расстоянию  $0,1 L$  от начала трубопровода

## Выводы

В напорных трубопроводах, транспортирующих однофазную жидкость (например, воду), всегда имеется небольшое количество нерастворенного воздуха, которое оказывает существенное влияние на нестационарные процессы, возникающие в трубопроводах. Поэтому при определенных условиях даже однофазную жидкость следует рассматривать как двухфазную, учитывая это обстоятельство при расчетах напорного неустановившегося движения и гидравлического удара в трубах.

Учет наличия нерастворенного воздуха в гидросистемах является одним из важнейших фактов для обеспечения достоверности расчета. Определение точного количества воздуха в воде в реальных гидросистемах связано с определенными трудностями. В связи с этим даны рекомендации по учету нерастворенного воздуха в трубопроводах систем водоснабжения и орошения. Объем нерастворенного воздуха может составлять от 0.01 до 2%.

Наиболее простой и эффективной мерой борьбы с недопустимым повышением давления при гидравлическом ударе, вызываемом отключением двигателя, является пропуск воды через насос в сочетании с впуском и заземлением воздуха в местах образования разрыва сплошности потока.

В связи с тем, что температура воды и, соответственно, воздуха в трубопроводах изменяется незначительно, допустимо считать процесс сжатия и расширения воздуха изотермическим. Объемы нерастворенного воздуха даже при небольшом давлении значительно меньше объемов, занимаемых водой, поэтому уменьшение последних при наличии нерастворенного воздуха можно не учитывать.

## Библиографический список

1. Али М.С., Бегляров Д.С., Чебаевский В.Ф. Насосы и насосные станции: учебник. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. – 330 с.
2. Бегляров Д.С. Повышение надежности и эффективности работы закрытых оросительных систем. – М.: Изд-во МГУП, 1996. – 140 с.
3. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 2004. – 656 с.
4. Картвелишвили Л.Н. Гидравлический удар: пути развития теории и принципы расчета. – М.: ЗАО «МЭЙН», 2001. – 32 с.
5. Вишневский К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135 с.

6. **Алышев В.М., Масс Е.И.** Рекомендации по расчету неустановившегося движения многофазной жидкости в напорных системах. – М.: ЦНИИС МТС СССР, 1984. – 104 с.

7. **Мошнин Л.Ф., Тетеркин А.А., Бережной В.Н.** Переходные процессы в системах подачи воды // Водоснабжение и санитарная техника. – 1983. – № 4.

8. **Вишневский К.П.** Расчет нестационарных процессов движения воды в напорных трубопроводах с учетом нерастворенного в воде воздуха // Исследование гидротехнических сооружений: Сб. науч. трудов. – М.: МГМИ, 1982. – С. 52-57.

9. **Глинкман Б.Ф.** Математические модели пневмогидравлических систем. – М.: Наука, 1986. – 367 с.

10. **Карамбилов С.Н.** Новые подходы в моделировании и оптимизации трубопроводных систем. Основы, концепции, методы. – LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – С. 355.

### Сведения об авторах

**Али Мунзер Сулейман**, кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, Тимирязевская, 49; e-mail: munzer@yandex.ru

**Бегляров Давид Суренович**, доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, Тимирязевская, 49; e-mail: db4171@mail.ru

**Назаркин Эдуард Евгеньевич**, аспирант кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва; Тимирязевская, 49; e-mail: ednazarkin@mail.ru

**M.S. ALI, D.S. BEGLYAROV, E.E. NAZARKIN**

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

## FEATURES OF CALCULATION TRANSIENT PROCESSES IN WATER PIPELINES OF PUMPING STATIONS UNDER CONDITIONS OF FLOW CONTINUITY DISCONTINUITY FORMATION

*The purpose of this work is to provide a method for engineering calculation of an unsteady process in gas-liquid mixtures in complex hydraulic systems. When determining the optimal version of the pressure system, transient processes should be considered which occurrence is connected with the change of the operation mode of pumping units: emergency and planned turning-off, starting pumps, regulation of their operation, changing of the opening degree of shut-off and safety valves. Therefore, it is necessary to be able to determine changes in parameters of pressure water supply systems during transient processes. Accounting for the presence of the undissolved air in hydro systems is one of the most important factors to ensure the reliability of calculation since the presence of air leads to the increased compressibility in the medium due to which there occur sharp pressure fluctuations. Hydroelectric and water management include pressure systems with pumping stations, providing the necessary required amounts of water to specified heights. As a result of the work, the following conclusions were obtained, which allow us to revise the methodology for calculating transients in water pipelines of pressure water supply systems. The simplest and most effective measure to deal with an unacceptable increase in pressure in the event of a hydraulic shock caused by engine shutdown is to pass water through the pump in combination with the intake and pinching of air at the points where the continuity of the flow is formed. In pressure pipelines transporting a single-phase liquid (for example, water), there is always a small amount of undissolved air, which has a significant impact on the non-stationary processes that occur in the pipelines. Therefore, under certain conditions, even a single-phase liquid should be considered as a two-phase liquid and this circumstance should be taken into account when calculating pressure unsteady movement and hydraulic shock in pipes.*

*Pumping stations, pressure systems of water supply, transient processes, hydraulic impact, supply, head, water velocity, pressure change waves, cavitation rupture of continuous flow.*

## References

1. **Ali M.S., Beglyarov D.S., Chebaevskiy V.F.** Pumps and pumping stations: Textbook. – Moscow: RSAU-MAA, P., 2015. – p. 330.
2. **Beglyarov D.S.** Increase of reliability and efficiency of closed irrigation systems. – M: MSUE P, 1996. – p. 140.
3. **Vishnevsky K.P.** Transients in Pressure Water Supply Systems. – M: Agroprommizdat, 1986. – p. 135.
4. **Shterenlicht D.V.** Hydraulics. Textbook for High Schools, 3rd ed. revised and supplemented. – M.: Kolos, 2004 – p. 656.
5. **Kartvelishvili L.N.** Hydraulic shock: ways of theory development and calculation principles. – M.: CJCC MAINE, 2001. – p. 32.
6. **Alyshev V.M., Mass E.I.** Recommendations for calculating the unidentified movement of multiphase liquid in pressure systems. – M.: TSNIIS MTS USSR, 1984. – p. 104.
7. **Moshnin L.F., Teterkin A.A., Berezhnoy V.N.** Transitional processes in water supply systems / Water supply and sanitary equipment. – 1983. – No. 4.
8. **Vishnevsky K.P.** Calculation of non-stationary processes of water movement in pressure pipelines taking into account air insoluble in water / Investigation of hydraulic structures: Sat. scientific papers / Moscow: Hydrolyorational, 1982. – p. 52-57.
9. **Glinkman B.F.** Mathematical models of pneumohydraulic systems. – M.: Science, 1986. – p. 367.
10. **Karambirov S.N.** New approaches in modeling and optimization of pipeline systems. Fundamentals, concepts, methods. – LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – p. 355.

The material was received at the editorial office  
08.09.2020

## Information about the authors

**Ali Munzer Suleiman**, Candidate of technical sciences, associate professor of the department of agricultural water supply, drainage, pumps and pumping stations; FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazeva, 49; e-mail: munzer@yandex.ru

**Beglyarov David Surenovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of agricultural water supply, drainage, pumps and pumping stations; FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazeva, 49; e-mail: db4171@mail.ru

**Nazarkin Eduard Evgenevich**, graduate student of the department of agricultural water supply, drainage, pumps and pumping stations; FSBEI HE RSAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Timiryazeva; 49; e-mail: ednazarkin@mail.ru

УДК 502/504:556.3:626/627

DOI 10.26897/1997-6011/2020-4-128-136

**Н.П. КАРПЕНКО, И.М. ЛОМАКИН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

*Цель работы – изучение и оценка состояния подземных вод Московского региона, используемых для питьевого водоснабжения, и разработка мероприятий по улучшению качественных показателей подземных вод. Проведен анализ состояния основных водоносных эксплуатируемых водоносных горизонтов и их динамики и выявлены основные закономерности формирования гидрогеологического режима эксплуатируемых горизонтов Московского региона. Рассмотрены основные факторы, влияющие на химический состав подземных вод. Разработаны и предложены современные подходы для решения проблемы сохранения качества подземных вод питьевого водоснабжения. Для обеспечения качества подземных вод водозаборов Московского региона были разработаны рекомендации по сохранению качества подземных вод и предложен необходимый комплекс природоохранных мероприятий, направленных на минимизацию ухудшения качества питьевых вод. Своевременное выявление возможных источников ухудшения качества подземных вод и применение инновационных технологий по очистке подземных вод от загрязнения позволят предотвратить рискованные ситуации в проблеме*