



УДК 629.7:532.542

Козырева Т.С. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: kozyrevats@mail.ru

Ермилова Е.Ю. – аспирант

E-mail: lizabeta\_91@list.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Мац Э.Б. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: meb10@yandex.ru

Казанский национальный исследовательский технический университет им.

А.Н. Туполева

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

### Управление нестационарными процессами в гидравлических системах при срабатывании отсечных устройств

#### Аннотация

Рассматривается управление быстродействующим отсечным устройством на магистральном трубопроводе. Расчетная модель позволяет определять амплитуду колебаний гидродинамических характеристик при различных законах изменения управляемой характеристики с учетом вязкости и наличия в жидкости нерастворенных газов. Приведенные зависимости в безразмерной критериальной форме обобщают полученные результаты на многие сочетания параметров гидросистемы и отсечного устройства.

**Ключевые слова:** отсечное устройство, амплитуда колебания давления, управляющая расходная характеристика, газожидкостная смесь.

Современные гидросистемы характеризуются достаточно высоким уровнем технической оснащенности, внедрением в них систем управления и контроля за технологическими процессами. Срабатывание быстродействующих устройств в таких системах приводит к нестационарным процессам и, соответственно, к увеличению амплитуды колебаний гидродинамических характеристик, влияющих на технологический процесс. Поэтому многие факторы, приводящие к этому явлению, должны быть учтены на стадии проектирования.

Увеличение амплитуды колебаний, вызванное срабатыванием отсечных устройств (ОУ), установленных на магистральных трубопроводах, характерно для гидротранспортных систем различного назначения. Возникновение аварийной ситуации (например, разгерметизация) требует быстрой отсечки потока на участке или на всем трубопроводе. При этом время срабатывания ОУ напрямую связано с потерей продукта из-за утечки и поэтому должно быть минимальным. С другой стороны, уменьшение времени приведет к увеличению амплитуды колебания давления в трубопроводе и к опасности разрушения его. Все это говорит о том, что задача снижения амплитуды колебаний давления в системе должна решаться совместно с задачей уменьшения времени срабатывания ОУ.

Известно, что закон изменения расходной характеристики ОУ оказывает влияние на величину максимального повышения давления в трубопроводе. Синтез оптимальной управляющей зависимости расхода от времени  $Q(t)$  через ОУ с целью достижения минимума максимального повышения давления в простом трубопроводе для идеальной жидкости получен в [1].

Цель управления в этом случае формулируется так:

$$J = \min_{Q(t) \in [0, Q_0]} \left\{ \max_{t \in [0, T_c]} \Delta p(t) \right\}. \quad (1)$$

Оптимальная управляющая функция расхода от времени  $Q(t)$  для критерия (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q_0 \left( 1 - \frac{t}{2T_c - T_\phi} \right), \quad t \in [0, T_\phi]; \\ Q(t) &= Q_0 \left( 1 - \frac{2t - T_\phi}{2T_c - T_\phi} \right), \quad t \in [T_\phi, T_c]. \end{aligned} \quad (2)$$

При таком управлении давление линейно возрастает за первую фазу ударной волны и сохраняется неизменным все оставшееся время до полного закрытия ОУ. Критерий оптимальности в этом случае выражается формулой:

$$J = \Delta p = \frac{\rho c}{f_T} \cdot \frac{Q_0 T_\phi}{2T_c - T_\phi}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$ ,  $c$ ,  $f_T$  – соответственно плотность жидкости, скорость распространения ударной волны, площадь сечения трубопровода;  $Q_0$  – начальный расход жидкости,  $T_\phi = \frac{2L}{c}$  ( $L$  – длина трубопровода) – время фазы ударной волны,  $T_c$  – время отсечки потока,  $\Delta p$  – максимальное повышение давления в трубопроводе при закрытии ОУ.

Получить аналитическое выражение оптимального управления ОУ для реальной жидкости не удается из-за увеличения количества параметров, влияющих на достижение цели.

Применение управления (2) для реальных жидкостей показано на рис. 1, 2. Для простого стального трубопровода с ОУ в конце ( $L=600$  м,  $d_T=0,1$  м,  $Q_0=6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с,  $p_0=0,9$  МПа = const,  $T_c=4$  с) был проведен расчет волновых процессов при срабатывании ОУ за время  $T_c$ . Расчет проводился методом характеристик с прямоугольной регулярной сеткой с учетом вязкости жидкости методом Ангуса [2]. На рис. 1 приведены переходные процессы в сечении ОУ с управляющей характеристикой (2) для идеальной (кривая 1) и реальной (бензол-кривая 2) жидкости. На рис. 2 показаны переходные процессы при тех же условиях для жидкостей (бензол, вода, нефть) разных вязкостей. Анализируя эти зависимости, можно видеть, что более вязкие жидкости при прочих равных условиях приводят к большему забросу давления при одинаковом времени срабатывания  $T_c$  ОУ. Сравнивая эти результаты с результатами при управлении по формуле Мишо [3], когда скорость потока в конечном сечении изменяется линейно в течение всего времени  $T_c$  (рис. 3), можно сделать вывод о преимуществе управления по формуле (2).

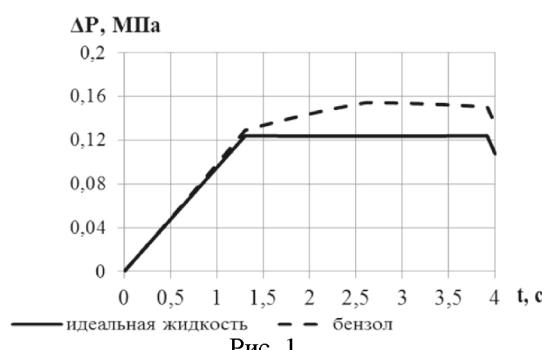


Рис. 1.

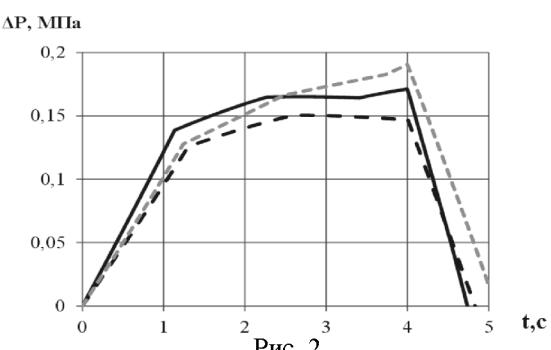


Рис. 2.

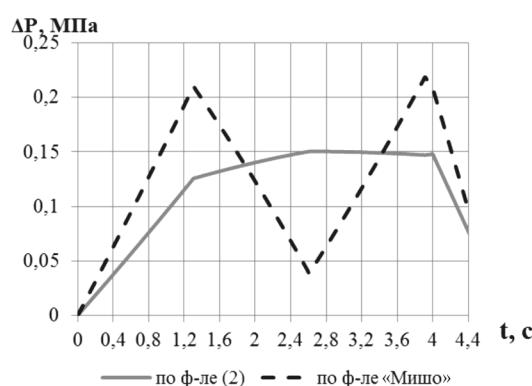


Рис. 3.

Исследования показывают [4, 5, 6, 7, 8, 9], что скорость распространения ударной волны в действительности несколько меньше, чем это дается в формуле Н.Е. Жуковского. Этот факт объясняется, в частности, наличием в жидкости нерастворенных газов. При давлении в системах 0,6…1,0 МПа объемная доля нерастворенных газов в воде составляет от 0,1 % до 2 % [2].

При наличии в жидкости нерастворенных газов модуль объемной сжимаемости  $E_{\text{ж}}$  становится зависимым от амплитуды изменения давления в нестационарном процессе. Тогда и скорость распространения возмущения  $c$  уже не будет постоянной. Расчет волновых процессов с учетом этого явления существенно осложняется, поскольку эти параметры должны вычисляться на каждом расчетном шаге вновь. В работе [5] показано, что в пузырьковых средах при взаимодействии ударных волн слабой  $\left(\frac{\Delta p}{p_0} \ll 1\right)$  и умеренной  $\left(\frac{\Delta p}{p_0} \approx 1\right)$  интенсивности можно использовать модель газожидкостного потока,

в которой не учитываются эффекты, связанные с пузырьковой структурой, кроме сжимаемости. Такая простейшая модель квазигомогенной смеси была рассмотрена в [7], где эффективный модуль упругости газожидкостной смеси  $E_{\text{см}}$  с учетом влияния упругости стенок  $E_{\text{ст}}$  трубопровода представлен в виде:

$$\frac{1}{E_{\text{см}}} = \frac{1}{E_{\text{ж}}} + \frac{\varphi}{p} + \frac{d}{\delta \cdot E_{\text{ст}}}, \quad (4)$$

а плотность смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \rho \cdot (1 - \varphi). \quad (5)$$

Здесь  $E_{\text{см}}$ ,  $E_{\text{ж}}$ ,  $E_{\text{ст}}$  – соответственно модуль упругости газожидкостной смеси, чистой жидкости и материала стенки трубы,  $\varphi$  – объемная доля газа в смеси;  $p$  – давление в газожидкостной смеси;  $d$  и  $\delta$  – диаметр и толщина стенки;  $\rho$  и  $\rho_{\text{см}}$  – плотность жидкости и газожидкостной смеси.

С учетом (4) и (5) скорость распространения волны возмущения в смеси выражается формулой Пирсона:

$$c(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{\rho(1-\varphi)\left(\frac{1}{E_{\text{ж}}} + \frac{\varphi}{p} + \frac{d}{\delta \cdot E_{\text{ст}}}\right)}}. \quad (6)$$

Выражение (6) применимо к расчету волновых процессов при следующих допущениях и ограничениях:

- объем газа распределен по маленьким пузырькам;
- газовые пузырьки равномерно распределены и составляют малую долю объема смеси;
- температура газа равна температуре жидкости.

В общем случае всеми этими ограничениями пренебречь нельзя, однако исследования [2, 4, 7, 9] показывают, что если максимальная амплитуда изменения скорости  $\Delta V_{\text{max}}$  и давления  $\Delta p_{\text{max}}$  в системе находится в соотношении:

$$\frac{\Delta V_{\text{max}}}{c(\varphi)} \leq 0,01; \quad \frac{\Delta p_{\text{max}}}{E_{\text{см}}} \leq 0,01, \quad (7)$$

то скорость распространения возмущения  $c(\varphi)$  допустимо полагать постоянной.

С учетом всего сказанного была построена модель для расчета волновых процессов в газожидкостной смеси. Результаты расчета показаны на рис. 4. Анализируя результаты, можно сделать вывод, что присутствие газа в жидкости может как увеличить амплитуду колебания давления ( $\varphi=0,5\%$ ), так и уменьшить ее ( $\varphi=2\%$ ). Наличие в жидкости нерастворенного газа уменьшает скорость  $c(\varphi)$ , которая, в свою очередь, уменьшает абсолютное приращение давления на каждом расчетном участке трубопровода. С другой стороны, уменьшение  $c(\varphi)$  приводит к пропорциональному увеличению фазы ударной волны  $T_f$ , что при одинаковых  $T_c$  увеличивает максимальное приращение давления (формула (3)).

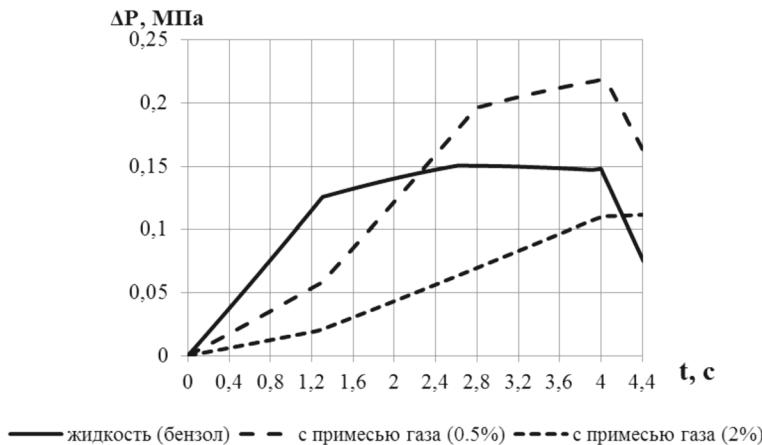


Рис. 4.

Если количество газа в смеси  $\varphi$  будет таким, что  $T_\phi \geq T_c$ , то при срабатывании ОУ возникнет прямой гидроудар, а максимальная амплитуда давления может быть вычислена по формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p_{\max}(\varphi) = \frac{\rho c(\varphi)}{f_T} Q_0, \quad T_\phi \geq T_c. \quad (8)$$

Во всех случаях, когда  $\varphi$  имеет значение, при котором  $T_\phi < T_c$ , величиной амплитуды давления можно управлять по закону (2). Причем, чем больше отношение  $T_c/T_\phi$ , тем больше возможностей уменьшения амплитуды колебания давления.

Приближенно для реальной жидкости эту величину можно оценить по (3):

$$\Delta p_{\max}(\varphi) = \frac{\rho c(\varphi)}{f_T} \frac{Q_0}{\frac{2 \cdot T_c}{T_\phi(\varphi)} - 1}, \quad T_\phi < T_c. \quad (9)$$

В большинстве практических случаев точное содержание газа в жидкости неизвестно. Чтобы проанализировать возможный диапазон колебания давления при вероятном газосодержании, уравнения (6), (8), (9) приведены к безразмерному виду в критериальной форме:

$$\begin{aligned} \pi(\varphi) &= \frac{1}{\sqrt{(1-\varphi)(1+\sigma_1\varphi)}}, & \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{(1-\varphi)(1+\sigma_1\varphi)}} &\leq 1; \\ \pi(\varphi) &= \frac{\sigma_2}{2 - \sigma_2 \sqrt{(1-\varphi)(1+\sigma_1\varphi)}}, & \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{(1-\varphi)(1+\sigma_1\varphi)}} &> 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь:

$\pi(\varphi)$  – безразмерная амплитуда колебания давления:

$$\pi(\varphi) = \frac{\Delta P_{\max}(\varphi)}{P_m};$$

$P_m$  – масштаб по давлению, равный величине прямого удара для жидкости без примеси газа:

$$P_m = \frac{\rho c_0}{f_T} \cdot Q_0;$$

$\sigma_1, \sigma_2$  – критерии динамического подобия процессов изменения амплитуды давления при срабатывании ОУ:

$$\sigma_1 = \frac{E_{np}}{P} = idem; \quad \sigma_2 = \frac{T_\phi}{T_c} = idem; \quad (11)$$

$E_{np}$  – приведенный модуль упругости:

$$\frac{1}{E_{np}} = \frac{1}{E_{\infty}} + \frac{d}{\delta \cdot E_{cr}}. \quad (12)$$

Критерий  $\sigma_2$  для конкретной системы и ОУ – величина постоянная. Величина  $\sigma_1$  в общем случае переменная, поскольку давление Р изменяется в течение рассматриваемого периода времени. Однако для систем, в которых амплитуда колебания давления изменяется мало, отношение  $E_{np}/p = \sigma_l$  будет меняться в малых пределах.

На рис. 5 показаны зависимости  $\pi(\varphi)$ , построенные для различных критериев  $\sigma_l$  и  $\sigma_2$ . Здесь 1, 2, 3 – соответствуют  $\sigma_l=1000$ ;  $\sigma_l=500$ ;  $\sigma_l=350$  при  $\sigma_2=0,5$ . Кривые 4, 5 –  $\sigma_l=1000$ ;  $\sigma_l=500$  при  $\sigma_2=0,3$ .

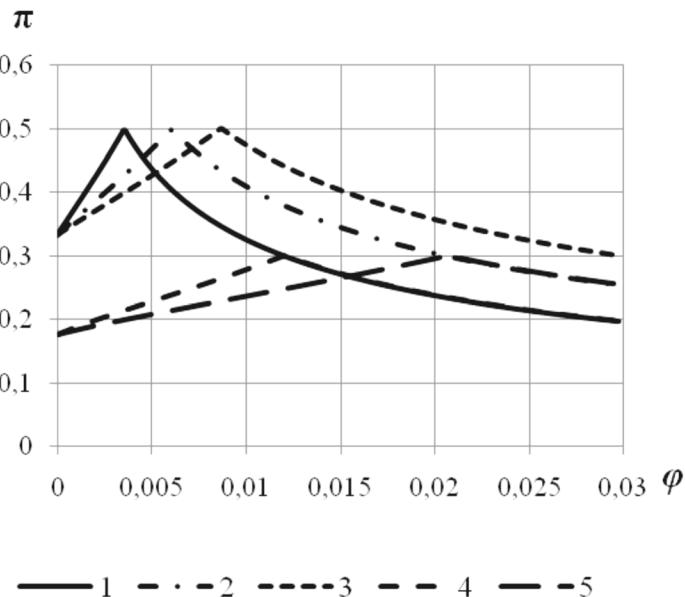


Рис. 5.

Все эти зависимости при некотором значении  $\varphi$  имеют экстремум. Это происходит потому, что с увеличением газовой фазы  $\varphi$  от нуля до определенного предела, величина  $\pi(\varphi)$  растет, так как растет  $T_\phi = 2L/c(\varphi)$ , но она остается меньше времени  $T_c$  срабатывания ОУ (формула (9)). Дальнейшее увеличение газовой фазы  $\varphi$  приводит к  $T_\phi = T_c$  и  $T_\phi > T_c$ . Тогда уже управление отсеченным устройством невозможно и при заданной величине  $T_c$  в системе будет прямой гидроудар. Поскольку с увеличением  $\varphi$  скорость  $c(\varphi)$  будет уменьшаться, то будет уменьшаться и величина  $\pi(\varphi)$  (формула (8)).

Таким образом, наличие газовой фазы  $\varphi$  в потоке может как уменьшить, так и увеличить амплитуду колебаний давления в системе. В большинстве практических случаев точное содержание газовой фазы  $\varphi$  неизвестно. Поэтому проверка работы системы в возможном диапазоне колебания давления при вероятных газосодержаниях  $\varphi$  может дать необходимые выводы о влиянии газовой фазы на нестационарные потоки.

#### Выводы:

- Проведён анализ влияния закона управляющего воздействия расходной характеристикой отсечного устройства на величину амплитуды колебания давления в магистральном трубопроводе при необходимости быстрой отсечки потока. Применяемая расчётная модель позволяет определять амплитуду колебаний гидродинамических характеристик при различных законах управления с учетом вязкости и наличия в жидкости нерастворенных газов.

- Оптимальный закон управления, полученный для идеальной жидкости, дает хорошие результаты по уменьшению амплитуды колебания давления в системе для реальных жидкостей малой вязкости (бензол, вода). Поиск оптимальной управляющей зависимости для жидкостей большой вязкости и гидросистем сложной конфигурации необходимо проводить методом глобальной численной оптимизации. В качестве исходной точки такого поиска может быть использован закон управления для идеальной жидкости.

3. Наличие газовой фазы в жидкости изменяет амплитуду колебания давления при идентичном управлении. Зависимости, определяющие приближенно максимальную амплитуду колебаний давления от объемного содержания газовой фазы в жидкости, приведены к безразмерному виду в критериальной форме, что позволяет обобщить полученные результаты на многие сочетания параметров гидросистемы и отсечного устройства.

### Список библиографических ссылок

1. Козырева Т.С., Долгова О.Ф., Ватолин В.В. Оптимальное управление переходными процессами в гидравлических трубопроводах для снижения гидроудара // Изв. вузов. Авиационная техника, 1990, № 2. – С. 112-115.
2. Лямаев Б.Ю., Небольсин Г.Б., Нелюбов В.А. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. Методы расчета на ЭВМ. / Под ред. Лямаева Б.Ю. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1978. – 192 с.
3. Бондаренко Н.И., Терентьев Ю.И. К вопросу об определении давления в трубопроводе при его закрытии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки», 2012, Спец. выпуск № 8 «Фундаментальные и прикладные задачи механики». – С. 69-78.
4. Суров В.С. К расчету ударно-волновых процессов в пузырьковых жидкостях // Журнал технической физики, 1998, Т. 68, № 11. – С. 12-19.
5. Болотнова Р.Х., Галимзянов М.Н., Агишева У.О. Моделирование процессов взаимодействия сильных ударных волн в газожидкостных смесях // Изв. вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки, 2011, № 2 (18). – С. 3-14.
6. Колесников К.С., Джикаев Б.Л. Нестационарные процессы в простом трубопроводе при быстром срабатывании отсечных устройств // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1975, № 1. – С. 174-176.
7. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
8. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – 236 с.
9. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. – Новосибирск: Изд-во института теплофизики, 1983. – 237 с.

**Kozyreva T.S.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: kozyrevats@mail.ru

**Ermilova E.U.** – post-graduate student

E-mail: lizabeta\_91@list.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Matz E.B.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: meb10@yandex.ru

**Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, K. Marks st., 10

### Management of non-stationary processes in hydraulic system triggering shut-off devices

#### Resume

Modern hydraulic system is characterized by a rather high level of technical equipment, introduction of tools and systems of management and control over technological processes. Actuation of high-speed devices such systems leads to non-stationary processes and, consequently, to the increase of amplitude of fluctuations of the hydrodynamic parameters that affect the technological process. Therefore, many factors leading to this phenomenon should be taken into account at the design stage.

Increase of the amplitude of oscillations caused by operation of the shutoff devices (SD) installed on pipelines, typical for hydrotransport systems for various purposes. The emergence

of an emergency (for example, depressurization) requires quick flow shutoff on the site or the entire pipeline. The response time of the SD directly connected with the loss of product due to leakage and therefore should be minimal. Decreasing the time will increase the amplitude of pressure fluctuation in the pipeline and to the danger of destruction.

For calculation of nonstationary processes triggering shutoff devices applies a method of characteristics with a regular rectangular grid. The calculation model allows to determine the amplitude of fluctuations of the hydrodynamic characteristics at various laws of changing controlling rating curve taking into account the viscosity and the availability of liquid undissolved gases. The relationship defining approximately maximal fluctuation amplitude of pressure from the volumetric gas content in the liquid phase are dimensionless criterial form, which allows us to generalize the results obtained in many combination of parameters of hydraulic and shutoff device.

**Keywords:** shut-off device, fluctuation amplitude of pressure, controlling rating curve, liquid-gas mixture.

### Reference list

1. Kozyreva T.S., Dolgova O.F., Vatolin V.V. Optimal management of the transition processes in the hydraulic pipelines to reduce the hammer // Izv. vuzov. Aviation equipment, 1990, № 2. – P. 112-115.
2. Lyamaev B.U., Nebolsin G.B., Nelyubov V.A. Stationary and transient processes in complex hydraulic systems. Methods of calculation on the computer. / By red. Lyamaev B.U. – L.: Machine engineering. Leningrad department, 1978. – 192 p.
3. Bondarenko N.I., Terentiev U.I. To the question of determination of pressure in the pipeline when it is closed // Vestnik Bauman University. Series «Natural Sciences», 2012, Spec. release № 8 «Fundamental and applied problems of mechanics». – P. 69-78.
4. Surov V.S. To the calculation of the shock-wave processes in bubble liquids // Journal of technical physics, 1998, V. 68, № 11. – P. 12-19.
5. Bolotnova R.X., Galimzyanov M.N., Agisheva Y.O. Modeling of processes of interaction of strong shock waves in gas-liquid mixtures // Izv. vuzov. Povolzhskiy region. Physico-mathematical science, 2011, № 2 (18). – P. 3-14.
6. Kolesnicov K.S., Dgikaev B.L. Nonstationary processes in a simple pipeline with the rapid triggering of stop devices // Izv. AS SSSR. Energy and transport, 1975, № 1. – P. 174-176.
7. Focs D.A. Hydraulic analysis of unsteady flow in pipe. – M.: Energoizdat, 1981. – 248 p.
8. Nigmatullin R.I. Dynamics of multiphase media. – M.: Science, 1987. – 236 p.
9. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. Wave propagation in gas and vapor-liquid environments. – Novosibirsk: Publishing house of the Institute of Thermophysics, 1983. – 237 p.