

УДК 631.672.46

О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I», Российская Федерация**СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ДАВЛЕНИЯ  
ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРАХ**

*Аннотация:* величина негативных последствий гидравлического удара в напорных трубопроводах зависит от характеристик как перекачиваемой жидкости, так и напорной магистрали. Только, учитывая конкретное сочетание параметров всей напорной системы, с использованием современных методов расчета можно определить состояние потока при возникновении гидравлических ударов и предусмотреть мероприятия по предотвращению негативных последствий таких явлений.

*Ключевые слова:* напорный трубопровод, гидравлический удар, метод характеристик, разрыв сплошности потока.

**Введение**

Неблагоприятные последствия для напорной системы в случае возникновения гидравлического удара наиболее ярко проявляются при разрыве стыковых соединений труб и выходе из строя дорогостоящего оборудования, когда возникают давления, превышающие их предел прочности. Однако колебания давления в трубопроводе при гидроударе, величина которых не превышает предела прочности системы, так же со временем могут приводить к авариям.

Предотвращение подобных ситуаций является важной задачей при проектировании, строительстве и эксплуатации напорных трубопроводов. Для этого проведем оценку степени влияния параметров системы на величину возможных максимальных и минимальных давлений, возникающих при гидравлических ударах.

**Анализ исследований**

Неустановившееся напорное течение в напорном трубопроводе описывается системой дифференциальных уравнений, включающей в себя уравнение неразрывности и уравнение количества движения жидкости [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho_{ж} \cdot c^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \rho_{ж} \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial (P + \rho_{ж} \cdot g \cdot z)}{\partial x} + \frac{\lambda \cdot \rho_{ж}}{2 \cdot D} \cdot V \cdot |V| = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $P$  – давление в рассматриваемом живом сечении, Па;

$t$  – время, с;

$V$  – средняя скорость движения потока в рассматриваемом живом сечении, м/с;

$\rho_{ж}$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – скорость распространения фронта ударной волны, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$z$  – высотная отметка оси трубы, м;

$D$  – внутренний диаметр трубопровода, м;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

Анализ зависимостей (1) показывает, что величина максимального давления, возникающего в системе при гидравлических ударах, зависит как от характеристик перекачиваемой жидкости, так и от параметров напорной магистрали.

Н.Е. Жуковский [2] в 1899 году в своей теоретической работе основанной на обработке результатов наблюдений аварий на московском водоводе решил систему (1) относительно идеальной жидкости и определил величину максимального ударного давления при прямом гидравлическом ударе как

$$H = H_0 + \frac{c \cdot \Delta V}{g}, \quad (2)$$

где  $H$  – значение напора в рассматриваемом узле в процессе гидравлического удара, м. вод.ст.;

$H_0$  – значение напора в рассматриваемом узле при установившемся движении жидкости в трубопроводе, м. вод.ст.;

$\Delta V$  – изменение скорости течения потока, являющееся причиной возникновения гидравлического удара, м/с; при пуске или остановке системы  $\Delta V = V_0$  – скорости течения потока при установившемся движении жидкости в трубопроводе, м/с.

Скорость распространения фронта ударной волны  $c$ , м/с, Жуковский предложил определять по формуле Кортвега:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_{жк}}{\rho_{жк}}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{жк} \cdot D}{E_T \cdot \delta}}} = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{E_{жк} \cdot D}{E_T \cdot \delta}}}, \quad (3)$$

где  $E_{жк}$  – модуль объемной упругости жидкости, Па;

$E_T$  – модуль упругой деформации материала труб, Па;

$\delta$  – толщина стенки трубопровода, м.

На основе проведенных исследований Н. Е. Жуковский установил, что величина максимального давления, возникающего в трубопроводе при гидравлическом ударе, в первую очередь зависит от величины изменения скорости движения, соотношения  $D/\delta$ , упругих свойств материала труб и перекачиваемой жидкости. Дальнейшие исследования этого сложного явления и совершенствование методов расчета [3-12] позволили получить более точные зависимости для определения параметров потока при неустановившемся его движении.

В настоящее время современные методики расчета параметров гидравлического удара, как показывает анализ работ [13-17], основаны на зависимостях, получаемых при решении системы уравнений (1) с использованием *метода характеристик*. Но в отмеченных работах оценивается влияние отдельных факторов на величину давления, возникающего при гидравлических ударах, а не их взаимное влияние.

#### Факторы, влияющие на величину давления при гидравлическом ударе

Используя метод характеристик, можно вывести уравнения [17], позволяющие определить значения напора  $H_i'$  и скорости  $V_i'$  в расчетных узлах  $i$  внутри конструктивных участков  $Y$  в каждый момент времени:

$$H_i' = \frac{c(V_{i-1} + V_{i+1})}{2g\sqrt{M_v}} + \frac{H_{i-1} + H_{i+1}}{2}, \quad (4)$$

$$V_i' = \frac{V_{i-1} + V_{i+1}}{2} + \frac{g\sqrt{M_v}}{2c}(H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{\lambda V_i |V_i|}{2D_Y} \Delta t; \quad (5)$$

где  $H_i$  – значение напора в расчетной точке  $X_i$  в расчетный момент времени, м. вод.ст.;

$V_i$  – значение скорости течения жидкости в расчетной точке  $X_i$  в расчетный момент времени, м/с;

$D_Y$  – внутренний диаметр трубы на конструктивном участке  $Y$ , м;

$M_v$  – коэффициент, условно учитывающий кавитационные процессы по длине трубопровода; определяется по формуле, предложенной В. С. Дикаревским [1]:

$$M_v = 1 + \frac{V_0^2}{2cV_k}, \quad (6)$$

где  $V_k$  – скорость жидкости, соответствующая изменению напора на величину  $(H_p + H_B)$  при ударе, начинающимся с волны понижения напора, или на величину  $(H_0 + H_B)$  при ударе, начинающимся с волны повышения напора, м/с.

По формуле Н. Е. Жуковского эти скорости соответственно равны, м/с:

$$V_{k,1} = \frac{g}{c} \cdot (H_p + H_B) \text{ или } V_{k,2} = \frac{g}{c} \cdot (H_0 + H_B). \quad (7)$$

Здесь  $H_p$ ,  $H_B$  – соответственно рабочий и вакуумметрический напоры, м. вод.ст.

Согласно [17], с использованием зависимостей (4)-(7), были проведены расчеты нестационарных режимов течения жидкости для различных напорных систем, которые показывают противоречивое влияние параметров системы на величину максимального и минимального давления при гидравлических ударах.

Уменьшение количества транспортируемой жидкости по трубопроводам, например, в связи со снижением водопотребления в нашей стране, приводит к снижению скорости её движения ( $V_0$ ) на расчетных участках, что при гидравлическом ударе без разрыва сплошности потока приводит к снижению величины максимального ударного давления. Однако с уменьшением скорости  $V_0$  в низконапорных системах увеличивается вероятность возникновения мест разрывов сплошности потока жидкости при нестационарных процессах, что может приводить к возникновению ударных давлений значительно большей величины.

При уменьшении соотношения внутреннего диаметра  $D$  и толщины стенки трубы  $\delta$  (например, при истирании стенок труб в процессе эксплуатации износ может составлять 30-50 % [18]) снижается скорость распространения фронта волны гидравлического удара. В зависимости от соотношения  $D/\delta$  скорость  $c$  при транспортировке воды по трубопроводам из стальных труб варьируется от 1380 м/с до 1180 м/с; полиэтиленовых ПВП – 300-150 м/с; в полиэтиленовых ПНП – 250-125 м/с. При этом в пластмассовых трубах при расчете магистралей на гидравлический удар необходимо учитывать упругое обжатие труб грунтом. И, как показывают исследования [1], в пластмассовых трубах за счет упругого отпора грунта скорость распространения ударной волны может увеличиваться на 40% и более.

Исследования показывают, что скорость распространения фронта ударной волны даже с учетом упругого отпора грунта значительно меньше

в пластмассовых трубах, чем в стальных. Еще большее снижение этой величины возможно при наличии в перекачиваемой жидкости нерастворенных газов [1, 13, 14]. А с уменьшением величины скорости распространения волны гидравлического удара  $c$  снижается и максимальное возможное давление в трубопроводе при ударе. Однако с уменьшением скорости распространения ударной волны в трубопроводах может также увеличиваться вероятность возникновения мест образования кавитационных пустот.

В напорных трубопроводах при нестационарных режимах работы, когда давление во всем трубопроводе или в какой-либо его части падает ниже атмосферного, проявляется кавитация потока, которая может приводить к возникновению разрывов сплошности потока жидкости. Образование таких пустот создает условия для возникновения обратной скорости течения жидкости в трубопроводе, превышающей значение ее начальной скорости при установившемся режиме. В процессе гидравлического удара при изменении давления происходит схлопывание разрывов, которое приводит к появлению значительного результирующего давления в этом месте трубопровода, а из-за интерференции волн и во всей напорной системе [1, 17, 19]. На процесс интерференции волн также большое влияние оказывает тип установленной арматуры и профиль трубопроводной магистрали. Возвышенные переломные точки профиля водовода являются опасными с точки зрения возможности образования разрывов сплошности потока.

Таким образом, параметры перекачиваемой жидкости и напорной магистрали могут противоречиво влиять на величину максимального давления, возникающего при гидравлическом ударе.

#### **Оценка влияния различных факторов на величину давления при гидравлическом ударе**

В качестве примера рассмотрим результаты расчета на гидравлический удар, проведенные для реального напорного трубопровода от насосной станции II-го подъема (НС-II) к насосной станции III-го подъема (НС-III) в районе города «С» с заменой стальных труб по ГОСТ 10704-76 ( $D = 800$  мм;  $\delta = 8$  мм) на полиэтиленовые ПЭ100 SDR21-800x38,1 ( $D = 800$  мм;  $\delta = 38,1$  мм). Длина трубопровода составила 5165 м; перепад геодезических отметок около 50 м; глубина прокладки трубопровода в гравелистых грунтах 2,6 м до дна трубы. Вода перекачивается одним рабочим насосом ДЗ200-75а; часовой расход равен

3000 м<sup>3</sup>/час; число оборотов 980 мин<sup>-1</sup>; рабочий напор 75 м; мощность электродвигателя составляет 800 кВт.

Согласно проведенным расчетам для каждого случая скорость распространения фронта ударной волны будет различной и в стальных трубах составит как без, так и с учетом упругого отпора грунта  $c = 1015$  м/с, а при использовании полиэтиленовых труб без учета упругого отпора грунта –  $c = 235$  м/с, а с учетом обжатия труб грунтом –  $c = 264$  м/с.

Наиболее неблагоприятные последствия для данной напорной системы могут наблюдаться в случае гидравлического удара, вызванного остановкой насоса, установленного в насосной станции II-го подъема.

Согласно проведенным исследованиям с учетом профиля прокладки водовода (рис.1), который характеризуется преимущественно постепенным подъемом от НС-II к НС-III, при возможном гидравлическом ударе максимальные величины давления возникают у насоса ДЗ200-75а (НС-II), а снижение давления ниже атмосферного в трубопроводе с возникновением разрывов сплошности потока будет наблюдаться на верхних участках трубопровода у НС-III. График изменения давления у насосной станции в процессе гидравлического удара в случае применения стальных или полиэтиленовых труб представлен на рисунке 2.

Из графика видно, что за счет большой скорости фронта ударной волны в случае применения стальных труб, период колебания давления меньше, чем в полиэтиленовых, что хуже для стыковых соединений и установленной арматуры и оборудования. Кроме этого при использовании стальных труб и у насосной станции II-го подъема возможно понижение давления ниже атмосферного.

В случае применения полиэтиленовых труб давление при гидравлическом ударе нарастает постепенно, разрыв сплошности потока у НС-II не возникает, но резкое увеличение давления происходит после того как к насосной станции доходит волна повышения давления, появляющаяся в процессе схлопывания разрывов сплошности потока жидкости, которые образуются в верхней части водовода у НС-III.

Как видно из расчетов, максимальная величина давления при гидравлическом ударе в стальном водоводе у насоса достигает 120 м. вод. ст., а в водоводе из полиэтиленовых труб при  $c = 264$  м/с

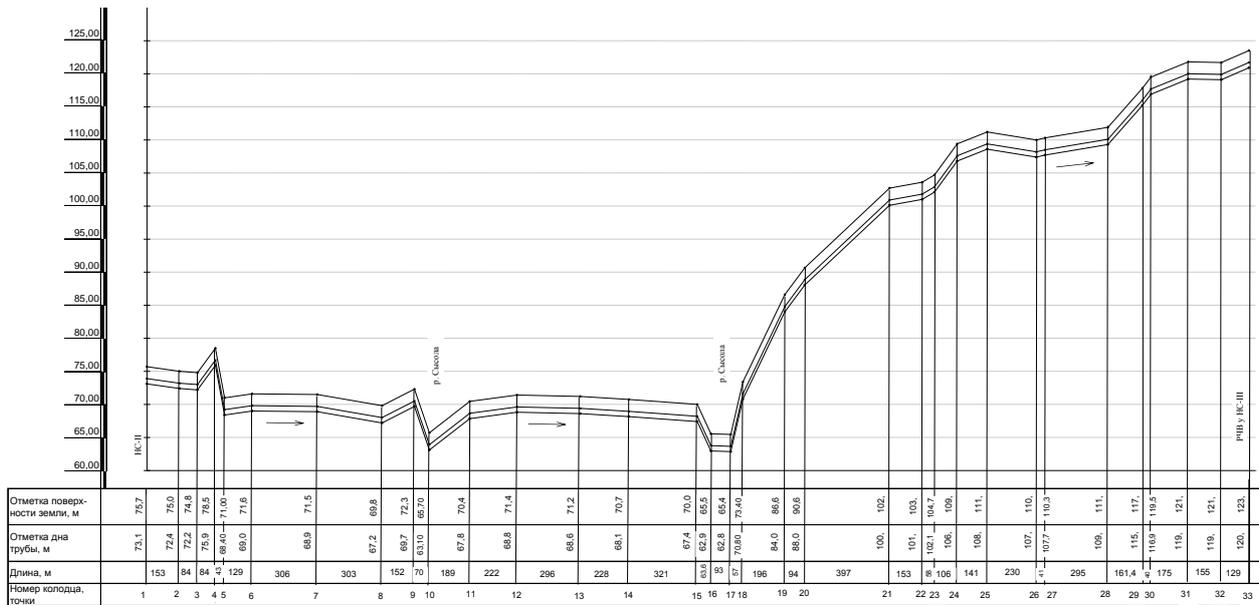


Рис. 1. Упрощенный продольный профиль водовода от НС-II до РЧВ у НС-III

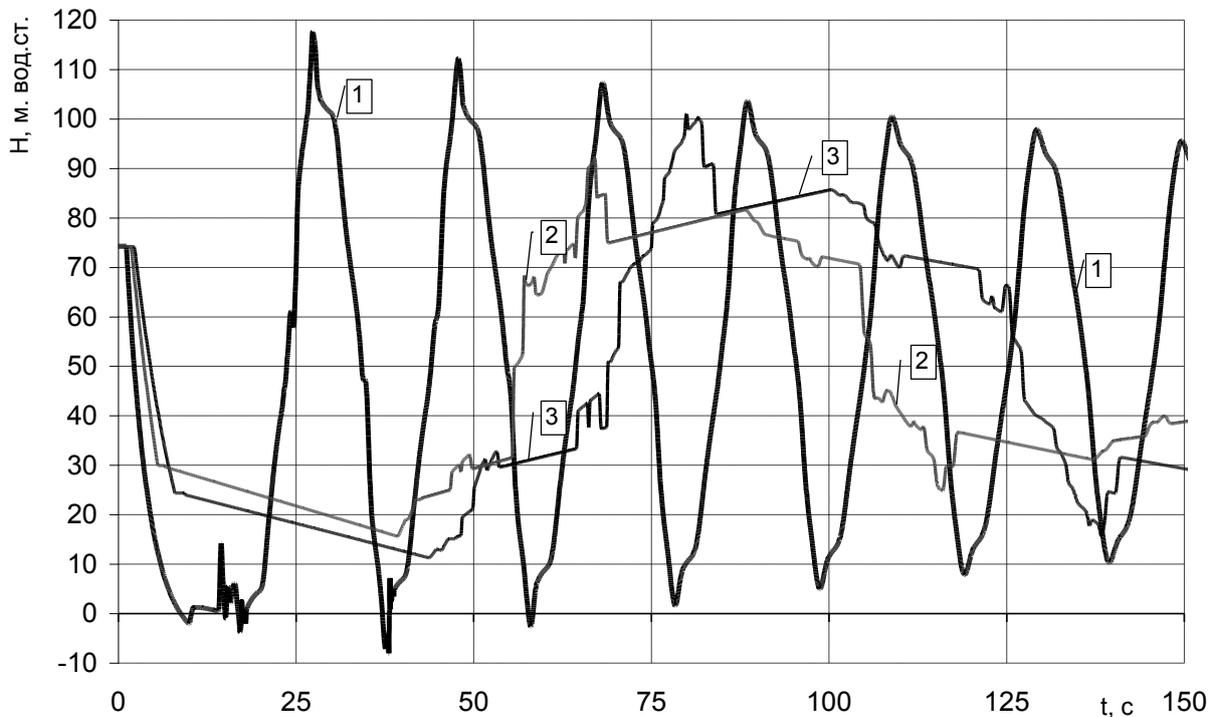


Рис. 2. Диаграмма изменения напора во времени у насосной станции второго подъема: 1 – в случае укладки водовода из стальных труб (скорость ударной волны  $c = 1015$  м/с); 2 – водовод из полиэтиленовых труб (скорость ударной волны  $c = 235$  м/с); 3 – водовод из полиэтиленовых труб (скорость ударной волны определена с учетом упругого отпора грунта  $c = 264$  м/с);  $H$  – расчетный напор, м. вод. ст.;  $t$  – время, с

составляет 100 м. вод. ст., что в том и в другом случае близко к пределу прочности материала труб и установленного оборудования.

Таким образом, уменьшение скорости распространения фронта ударной волны за счет использования полиэтиленовых труб может приводить к уменьшению максимального давления при гидравлическом ударе в трубопроводе, но не

снижает риска возникновения давлений, превышающих предел прочности для данного типа труб.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что, принимая решение о выборе трассы водовода, типа труб и устанавливаемой арматуры при строительстве новых напорных систем или

реконструкції існуючих трубопроводів необхідно проводити розрахунок всіх параметрів можливого гідравлічного удару. Тільки ухвалюючи конкретне поєднання параметрів всієї напорної системи з використанням вичислювальної техніки і сучасних методів розрахунку можна визначити стан потоку при виникненні гідравлічних ударів, на основі яких передбачити заходи по запобіганню негативних наслідків таких явищ [17, 19].

#### Література:

1. **Дикаревський, В. С.** Водоводи [Текст] : монографія / В. С. Дикаревський ; Труды РААСН. Строительные науки. Том 3. – М. : РААСН, 1997. – 200 с.
2. **Жуковский, Н. Е.** О гидравлическом ударе в водопроводных трубах [Текст] / Н. Е. Жуковский. – М.-Л. : ГИТТЛ, 1949. – 104 с.
3. **Allievi, L.** Theory of Waterhammer [Text] / L. Allievi. – Rome, Italy : Riccardo Garoni, 1925.
4. **Wood, F. M.** The application of Heaviside's Operational Calculus the Solution of Problem in Water Hammer [Text] / F. M. Wood // Journal of the Hydraulics division proceeding of the American Society of civil engineers. – 1937. – Vol. 59, № 8. – P. 707–713.
5. **Лурье, А. И.** Операционное исчисление и его приложение к задачам механики [Текст] / А. И. Лурье. – М. : ГИТТЛ, 1951. – 432 с.
6. **Мостков, М. А.** Расчеты гидравлического удара [Текст] / М. А. Мостков, А. А. Башкиров. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1952. – 200 с.
7. **Берджерон, Л.** От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической цепи [Текст] / Луи Берджерон ; пер. с фр. С. Г. Батюшковой ; под общ. ред. д.т.н. В. А. Архангельского. – М. : Машигиз, 1962. – 348 с.
8. **Аронович, Г. В.** Гидравлический удар и уравнительные резервуары [Текст] / Г. В. Аронович, Н. А. Картвелишвили, Я. К. Любимцев ; Под общ. ред. Н. А. Картвелишвили. – М. : Наука, 1968. – 247 с.
9. **Streeter, V. L.** Water hammer analysis [Text] / V. L. Streeter // Journal of the Hydraulics division proceeding of the American Society of civil engineers. – 1969. – Vol. 95, №6. – P. 151–172.
10. **Христов, Хр.** Резултати от натуралните изследвания на хидравлическия удар в някои наши помпени станции [Текст] / Хр. Христов // Изв. на института по водни проблеми БАН. Отд. за техн. науки. Том.10. – 1969. – с. 121–185.
11. **Мошин, Л. Ф.** Руководство к расчету средств защиты водоводов от гидравлического удара [Текст] / Л. Ф. Мошин, Л. А. Обухов. – М. : ВНИИ-ВОДГЕО, 1970. – 78 с.
12. **Фокс, Д. А.** Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубах [Текст] / Д. А. Фокс ; пер. с англ. – М. : Энергоиздат, 1981. – 247 с.
13. **Лямаев, Б. Ф.** Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах: Методы расчета на ЭВМ [Текст] / Б. Ф. Лямаев, Г. П. Небольсин, В. А. Нелюбов. – Л. : Машиностроение, 1978. – 192 с.
14. **Масс, Е. И.** Рекомендации по расчету неустановившегося напорного и безнапорного движения жидкости [Текст] / Е. И. Масс, В. М. Альшев. – М. : ЦНИИЭС МТС СССР, 1986. – 75 с.
15. **Wylie, E. B.** Fluid transients in systems [Text] / E. B. Wylie, V. L. Streeter, Lisheng Suo. – Prentice Hall, 1993. – 463 p.
16. **Larock, V. E.** Hydraulics of Pipeline Systems [Text] / V. E. Larock, R. W. Jeppson, G. Z. Waters. – Florida : CRC Press LLC, 2000 – 533 p.
17. **Дикаревський, В.С.** Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения [Текст] / В. С. Дикаревський, О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Вестник РААСН. – 2004. – Вып.8. – с. 152–156.
18. **Ашиянц, Э. П.** Гидравлический удар в нагнетательных водоводах [Текст] / Э. П. Ашиянц. – Ереван: Лимуш, 2010. – 210 с.
19. **Капинос, О.Г.** Противоударная защита напорных трубопроводов с применением обратных клапанов [Текст] / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2010. Вып. 1 (22). – с. 93–104.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. Г. Иванов, ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Автор:** КАПИНОС Ольга Геннадьевна  
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кандидат технических наук, доцент

**Автор:** ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна  
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кандидат технических наук, доцент

## EXTENT OF INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS AT PRESSURE SIZE AT WATER HAMMERS

O. G. Kapinos, N. V. Tvardovskaia

**Abstract:** consequences of water hammer is one of the main causes of accidents in pressurized systems. Factors influencing the process of percolation of water hammer is very diverse, their impact is also different.

Despite more than a century of study of the problem of water hammer to identify the most adverse factors affecting the value of the maximum impact pressure, has not lost its relevance. Due to the extensive development of automation on and off pumps, quick-acting check valves, cases of transient process with negative consequences are recorded in pressure systems very often. At the same time, with the development of computer technology became possible detailed study and predict the course of a possible water hammer in the pipes.

The article describes the main factors and their impact on the process of hydraulic impact as the initial velocity of the fluid in the pipe, the speed of the shock front, the view of the pumped liquid, the material and depth of the pipe, the pipe profile. Studies show that, taking into account only the specific combination of parameters of the entire pressure system using computer technology and modern methods of calculation can determine the state of the flow in the event of hydraulic shocks, on the basis of which include activities to prevent the negative consequences of such events.

**Keywords:** Pressure pipe, water hammer, the method of characteristics, the gap of continuous flow.