

CALCULATION OF COMPRESSION OF ENTRAPPED AIR AT THE FLOW SEPARATION POINTProf. U. **Jonqobilov**, DSc in Technical Sciences<https://orcid.org/0000-0003-0871-0317>Assistant **Sh. Xushiye**<https://orcid.org/0009-0001-5198-8958>Assoc. Prof. **S. Jonqobilov**, PhD in Technical Sciences<https://orcid.org/0000-0002-0619-936X>Assoc. Prof. **U. Rajabov**, PhD in Technical Sciencesrajabovulugbek767@gmail.comAssistant **B. Jonqobilov**, PhD in Technical Sciences<https://orcid.org/0009-0003-7523897X>Head teacher **Z. Ruzimurodov**ruzimurodovzair1@gmail.comdoctoral student **Sh. Bahodirov**<https://orcid.org/0009-0000-6269-1220>

Karshi state technical university

Key words: Hydraulic shock, pressure pipe, damper, air compression-expansion law, flow continuity, unsteady motion, isothermal process, adiabatic process.

Annotation. A method for determining the parameters of hydraulic shock in a pressure pipeline has been developed, taking into account the compression of air at the point of violation of the integrity of the liquid and the compressed place of formation of discontinuities in the flow continuity. A mathematical model of resource-saving innovative shock-resistant devices for pumping stations of a pressure pipeline and a scientific justification for their parameters have been developed.

**РАСЧЕТ СЖАТИЯ ВОЗДУХА, ЗАЩЕМЛЕННОГО В МЕСТЕ ОБРАЗОВАНИЯ
РАЗРЫВА СПЛОШНОСТИ ПОТОКА**

Ключевые слова: Гидравлический удар, напорная труба, демпфер, закон сжатия-расширения воздуха, непрерывность потока, неустановившееся движение, изотермический процесс, адиабатический процесс.

Аннотация. Разработана методика определения параметров гидравлического удара в напорном трубопроводе с учетом сжатия воздуха в месте нарушения целостности жидкости

и сжатого места образования разрывов сплошности потока, разработана математическая модель ресурсосберегающих инновационных ударопрочных устройств насосных станций напорного трубопровода и научное обоснование их параметров.

Введение. Гидравлический удар, сопровождающийся нарушением целостности потока, представляет большую угрозу нормальной работе напорных трубопроводов. Процесс гидроудара происходит в напорных трубопроводах насосной станции, вызывая повреждение напорных трубопроводов, обратных клапанов, здания насосной станции и насосных агрегатов. При остановке двигателя снижается скорость насоса, подача воды и напор, а через некоторое время поток меняет направление [1,2].

В трубопроводах насосных станций гидравлические удары, вызываемые остановкой насосов и кратковременным перерывом электропитания, часто сопровождаются образованием разрывов сплошности потока, вследствие чего между разошедшимися колоннами воды образуются пространства, заполненные парами воды и выделенным из воды при вакууме растворенным воздухом [1-5]. В момент ликвидации этих разрывов происходит соударение колонн, движущихся с различными скоростями, что приводит к значительному повышению давления.

Для снижения ударного давления Л.Ф.Мошнин [6] предлагает в местах образования разрывов сплошности потока произвести выпуск и заземление воздуха. Заземленный воздух, играя роль буфера, изменяет условия образования отраженных волн повышения и понижения давления на границах разошедшихся колонн воды. По мере сближения колонн воздух постепенно сжимается, что удлиняет процесс протекания гидравлического удара и, тем самым, исключает возможность мгновенного повышения давления.

Во избежание распространения волн повышений и понижений давления по всей длине трубопровода, в местах образования разрывов сплошности потока рекомендуется устанавливать отсекающие обратные клапаны и клапаны для выпуска и заземления воздуха [2].

Методика исследований. Методика расчета гидравлического удара при выпуске и заземлении воздуха в местах образования разрывов сплошности потока, основанная на применении уравнений упругого гидравлического удара, отличается сложностью и трудоемкостью [2-5]. Учет волнового характера протекания процесса гидравлического удара не позволяет непосредственно определить максимум повышения давления без промежуточных расчетов [2].

Предположим, что после выключения насоса в промежуточной точке трубопровода образуется разрыв сплошности потока, вследствие чего колонны воды раздвигаются на расстояние l_p . Если в месте образования разрыва произвести выпуск воздуха, то расстояние между разошедшимися колоннами увеличивается. Обозначим это расстояние через l_0 . Определим повышение давления заземленного воздуха при сближении колонн. Для этой цели рассмотрим неустановившееся движение воды в простом трубопроводе с заземленным воздухом в конце, изображенном на рис.1 [2].

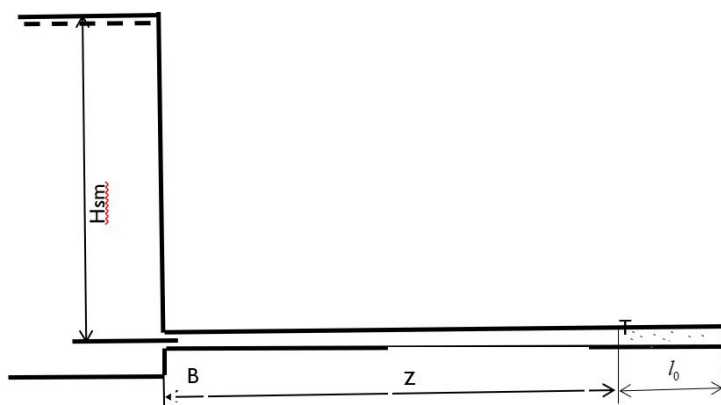


Рис.1. Неустановившееся движение воды в простом трубопроводе с защемленным воздухом в конце трубопровода.

На границе раздела воды и воздуха установлена задвижка. Начальное абсолютное давление воздуха атмосферное – P_{am} . Такая схема соответствует трубопроводу, оборудованному отсекающим обратным клапаном и клапаном для впуска и защемления воздуха [2].

Пусть в момент времени $t = 0$ мгновенным открытием задвижки вызвано неустановившееся движение воды. Определим скорость движения воды и давление воздуха в зависимости от времени. Будем считать, что в период сжатия воздуха не происходит его растворение в воде, как обычно принято при расчете воздушных колпаков и пневматических резервуаров и объем воздуха пренебрежимо мал по сравнению с объемом воды, заключенным в трубе, то есть $l_0 < Z$ [2].

Если пренебречь потерями напора и скоростным напором, то уравнение неустановившегося движения запишется в виде [2]:

$$H + \frac{P_{am}}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} + \frac{Z}{g} \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

где P_{am} – абсолютное давление защемленного воздуха.

Уравнение (1) содержит две неизвестные функции $p(t)$ и $v(t)$.

В качестве второго уравнения используем уравнение неразрывности, которое в данном случае будет [2,3,4]:

$$\vartheta dt = -dl. \quad (2)$$

Связь между давлением и объемом воздуха выражается уравнением состояния газа.

При изотермическом процессе сжатия воздуха имеем [2]:

$$P_{at} l_0 = P l. \quad (3)$$

Решая уравнение (1) с учетом уравнений (2) и (3) при начальном условии $t = 0, \vartheta = 0$ и $P = P_{am}$ получим [2]

$$\frac{g}{g_*} = \sqrt{\sigma \left(1 - \frac{P_{am}}{P}\right) - \ln \frac{P}{P_{am}}} \quad (4)$$

где

$$g_* = \sqrt{2g \frac{P_{am}}{\gamma} \frac{\ell_0}{Z}}; \quad \sigma = \frac{P_{am} + \gamma H_{cm}}{P_{am}}. \quad (5)$$

Адиабатический процесс сжатия воздуха характеризуется уравнением [2]

$$P_{am} \ell_0^\kappa = P \ell^\kappa, \quad (6)$$

где κ - показатель адиабаты, для воздуха $\kappa = 1,4$.

Совместное решение уравнений (1), (2) и (6) с учетом того же начального условия дает [2]:

$$\frac{g}{g_*} = \sqrt{\sigma \left(1 - \frac{P_{am}^{1/\kappa}}{P^{1/\kappa}}\right) - \frac{1}{\kappa-1} \left(\frac{P^{1/\kappa}}{P_{am}^{1/\kappa}} - 1\right)}. \quad (7)$$

Скорость g^* характеризует разгонную способность заземленного воздуха. Чем больше длина участка заземленного воздуха в трубе, тем больше v^* , следовательно и скорость движения.

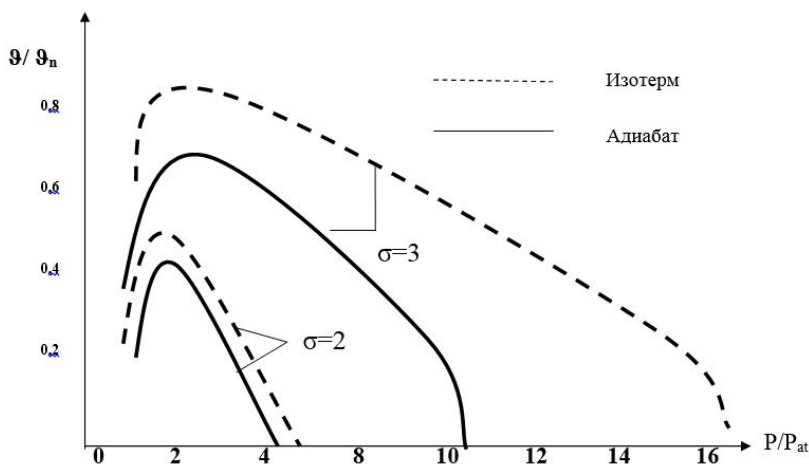


Рис.2. График зависимости при изотермическом и адиабатическом процессах сжатия воздуха для значений параметра $\sigma = 2$ и $\sigma = 3$.

На рис.2. приведена зависимость $\frac{g}{g_*} = f\left(\frac{P}{P_{am}}\right)$ при изотермическом и адиабатическом процессах сжатия воздуха для значений параметра $\sigma = 2$ и $\sigma = 3$.

Графики симметричны относительно оси абсцисс. Верхняя ветвь графика соответствует движению воды от резервуара к заземленному воздуху (воздух сжимается), нижняя ветвь соответствует обратному движению воды (воздух расширяется). Нижние ветви кривых на рисунке не показаны [2].

Из (2.11) и (2.14) легко заметить, что скорость движения воды достигает максимума при $\frac{P}{P_{am}} = \sigma$. Это означает, что в интервале $\{1, \sigma\}$ движение ускоренно, а в интервале $\{\sigma, \frac{P_{max}}{P_{am}}\}$ замедленное [2].

Для изотермического и адиабатического процессов сжатия воздуха максимумы скорости соответственно будут:

$$\frac{g_{max}}{g_*} = \sqrt{\sigma - 1 - \ln \sigma}, \quad (8)$$

$$\frac{g_{max}}{g_*} = \sqrt{\sigma + \frac{1}{K+1} - \frac{K}{K-1} \sigma^{\frac{K-1}{K}}}. \quad (9)$$

Из формул (4) и (7) следует, что $g=0$ либо при $P=P_{am}$, что соответствует начальному условию, либо при $P=P_{max}$, что отвечает максимально сжатому состоянию воздуха. Поэтому, максимумы давления для изотермического и адиабатического процессов определяются соответственно из уравнений [2]:

$$\sigma \left(1 - \frac{P_{am}}{P_{max}}\right) - \ln \frac{P_{max}}{P_{am}} = 0, \quad (10)$$

$$\sigma \left(1 - \frac{P_{am}^{1/K}}{P_{max}^{1/K}}\right) - \frac{1}{K-1} \left(\frac{P_{max}^{K/K-1}}{P_{am}^{K/K-1}} - 1\right) = 0. \quad (11)$$

Из этих уравнений следует, что максимум давления зависит только от напора H_{cm} и вовсе не зависит от длины участка воздуха l_0 , длины трубы Z и диаметра трубы D . Тот факт, что максимум давления не зависит от объема воздуха несколько парадоксален. Объясняется это тем, что изменение l_0 приводит к такому изменению v , что относительное сжатие воздуха остается неизменным. Так, при увеличении l_0 возрастает скорость движения воды и относительное укорочение длины участка заземленного воздуха остается неизменным. Следует исключить случаи $l_0 = 0$ и $l_0 \rightarrow \infty$, так как в первом случае $v = 0$, а во втором $v \neq 0$ при всех значениях $t > 0$ [2].

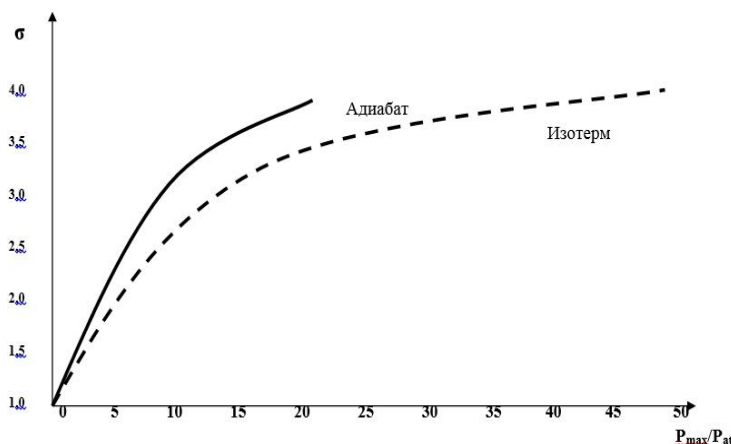


Рис. 3. Кривые зависимости от значений σ для изотермического и адиабатического процессов [2]

На рис.3. приведены кривые зависимости $\frac{P_{\max}}{P_{at}}$ от значений σ для изотермического и адиабатического процессов [2].

Из этих графиков видно, что по мере увеличения σ отношение $\frac{P_{\max}}{P_{at}}$ резко возрастает.

Для изотермического процесса $\frac{P_{\max}}{P_{at}}$ больше, чем для адиабатического, а расхождение по мере увеличения σ сильно возрастает [2].

В действительности процесс сжатия воздуха будет политропным. С одной стороны, пространство, куда впускается воздух, заполнено водовоздушной смесью и будет иметь место интенсивный отвод тепла от воздуха к воде [2]. Поэтому температура воздуха в процессе сжатия изменится мало и в этом отношении процесс близок к изотермическому. С другой стороны процесс сжатия происходит за короткий промежуток времени и тепло лишь частично отводится от воздуха к воде. В этом отношении процесс сжатия близок к адиабатическому.

Для оценки эффекта, получаемого путем впуска и заземления воздуха в месте образования разрыва сплошности потока, определим повышение давления P' при отсутствии воздуха в зоне разрыва [2].

В этом случае в уравнение (1) вместо p следует подставить давление насыщенных паров $P_{н.п.}$, которое в период сжатия воздуха принимается постоянным. После такой замены уравнение (1) будет характеризовать равноускоренное движение воды. Очевидно, что в момент времени, когда граница колонны воды достигнет закрытого конца трубы, скорость движения воды будет максимальной и равной:

$$g'_{\max} = \sqrt{2g\left(H + \frac{P_{at}}{\gamma} - \frac{P_{н.п.}}{\gamma}\right) \frac{\ell_p}{Z}}, \quad (12)$$

а максимальное повышение давления согласно известной формуле Н.Е.Жуковского [7,8,9], будет:

$$p' = \rho a v'_{\max} \cdot \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что величина максимального повышения давления при отсутствии воздуха зависит от длины зоны разрыва l_p и от длины трубопровода Z , что не имело место при заземлении воздуха.

На рис.4. приведен график зависимости $\frac{P'_{\max}}{P_{at}}$ от $\frac{l_0}{Z}$ для значений $\sigma=3$ и $a=1000$ м/сек.

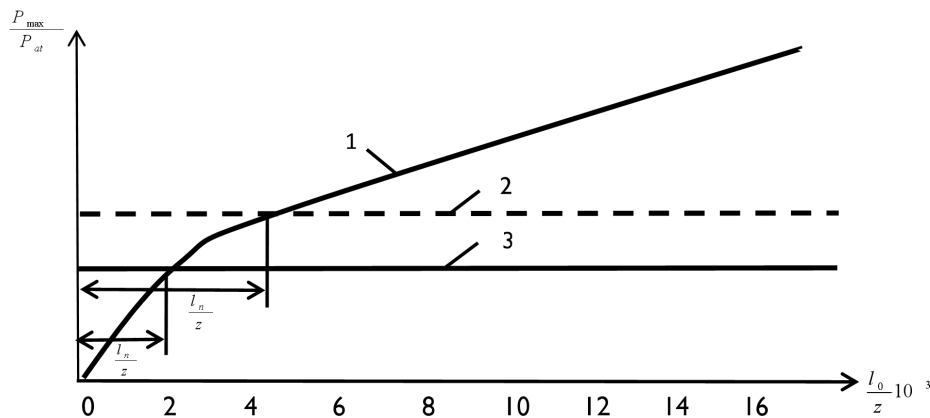


Рис. 4. График зависимости от для значений $\sigma = 3$ и $a = 1000$ м/сек [2].

По графику, приведенному на рис. 3., определены значения $\frac{P'_{\max}}{P_{at}}$ при $\sigma=3$ для изотермического и адиабатического процессов и нанесены на рис. 2.7 в виде прямых, параллельных оси абсцисс. Абсциссы пересечения прямых с кривой $\frac{P'_{\max}}{P_{at}}(\frac{l_0}{Z})$ назовем предельными значениями длины зоны разрыва сплошности потока l_n [2].

Как видно из графика, впуск и заземление воздуха в месте образования разрыва сплошности потока уменьшает давление при $l_0 > l_n$. При $l_0 < l_n$ впуск и заземление воздуха не только не уменьшает, а наоборот, увеличивает давление. Предельное значение длины зоны разрыва для адиабатического процесса меньше, чем для изотермического [2].

Очевидно, что при любом значении l_0 , то есть при впуске и заземлении воздуха в месте образования разрыва сплошности потока в любом количестве должно привести к уменьшению ударного давления. Поэтому увеличение давления в случае $l_0 < l_n$ является ошибочным. Этот результат получается ввиду неучета сжимаемости воды и упругости стенок трубопровода. При меньших объемах воздуха нельзя пренебречь сжимаемостью воды и упругостью стенок труб по отношению к сжимаемости заземленного воздуха. Следовательно, для данной задачи уравнение неустановившегося движения несжимаемой жидкости в жесткой трубе можно применять при $l_0 > l_n$ [2].

Для нахождения функции $p(t)$ воспользуемся уравнениями (2), (3) и (4). После несложных преобразований для изотермического процесса получим [2]

$$d\left(\frac{t}{\tau_*}\right) = \frac{d\left(\frac{P}{P_{am}}\right)}{\frac{P^2}{P_{am}^2} \sqrt{\sigma\left(1 - \frac{P_{am}}{P}\right) - \ln \frac{P}{P_{am}}}}, \quad (14)$$

где τ_* - некоторый параметр времени, равный

$$\tau_* = \frac{\ell_0}{g_*} = \sqrt{\frac{\gamma \ell_0 Z}{2gP_{am}}}. \quad (15)$$

Обозначим $\frac{t}{\tau_*} = y$ и $\frac{P}{P_{am}} = x$.

Из (14) неизвестную функцию $y = y(x)$ определяем квадратурой

$$y = \int_1^x \frac{d\xi}{\xi^2 \sqrt{\sigma\left(1 - \frac{1}{\xi}\right) - \ln \xi}}. \quad (16)$$

Ввиду невозможности точного вычисления полученного интеграла нужно прибегнуть к приближенным методам вычисления. Так как подынтегральная функция имеет в одном конце ($x=1$) интервала интегрирования особенность, то вычисление на ЭВМ связано с определенными трудностями. Во избежание этого неудобства сначала, введением новой переменной $Z = 1 - \frac{1}{x}$, преобразуем интеграл к виду

$$y = \int_0^{\frac{1-x}{x}} \frac{dz}{\sqrt{\sigma z + \ln(1-z)}}. \quad (17)$$

и затем представляем последний интеграл в виде суммы двух интегралов

$$y = \int_0^{\alpha} \frac{dz}{\sqrt{\sigma z + \ln(1-z)}} + \int_{\alpha}^{\frac{1-x}{x}} \frac{dz}{\sqrt{\sigma z + \ln(1-z)}}, \quad (18)$$

где

$$0 < \alpha < \frac{1-x}{x}.$$

Число α для каждого значения σ выбирается следующим образом [2]:

а) Разлагаем подынтегральную функцию в ряд по степеням $Z^{m-\frac{1}{2}}$ (m —натуральное число) и ограничиваемся конечным числом членов ($n = 6$);

б) Оцениваем остаточный член ряда $R_n(\alpha)$, выбираем α так, чтобы погрешность при замене ряда его отрезком не превышала наперед заданную точность.

Таким образом, после выбора значения α первый интеграл выражения (13) вычисляется приближенно, без помощи ЭВМ, а второй интеграл вычисляется на ЭВМ, так как подынтегральная функция в области интегрирования $\{\alpha, x\}$ является ограниченной и непрерывной.

Из уравнений (2), (6) и (7) для адиабатического процесса сжатия воздуха получим [2]

$$dy = \frac{dx}{\sqrt{\sigma x - \frac{1}{K-1}[(1-x)^{1-K} - 1]}}. \quad (19)$$

Из (14) неизвестную функцию $y = y(x)$ определяем квадратурой

$$y = \int_0^x \frac{d\xi}{\sqrt{\sigma \xi - \frac{1}{K-1}[(1-x)^{1-K} - 1]}}. \quad (20)$$

Подынтегральная функция при $x = 0$ имеет особенность, поэтому, как и в предыдущем случае, полученный интеграл представляем в виде суммы двух интегралов

$$y = \int_0^\alpha \frac{d\xi}{\sqrt{\sigma \xi - \frac{1}{K-1}[(1-x)^{1-K} - 1]}} + \int_\alpha^x \frac{d\xi}{\sqrt{\sigma \xi - \frac{1}{K-1}[(1-x)^{1-K} - 1]}}. \quad (21)$$

Как и в предыдущем случае первый интеграл вычисляем приближенно, без помощи ЭВМ, а второй интеграл на ЭВМ [2].

На основании этих вычислений на рис. 5 приведены кривые зависимости $\frac{P}{P_{am}}$ от $\frac{t}{t_*}$ для изотермического и адиабатического процессов сжатия воздуха при значениях параметра $\sigma = 2, \sigma = 3$.

Из графиков рис. 5. следует, что промежуток времени, в течение которого давление достигает максимума, зависит от параметров σ и τ^* . Из равенств (5) и (15) следует, что этот промежуток времени зависит от напора H_{cm} , длины трубы Z и длины участка заземленного воздуха l_0 [2].

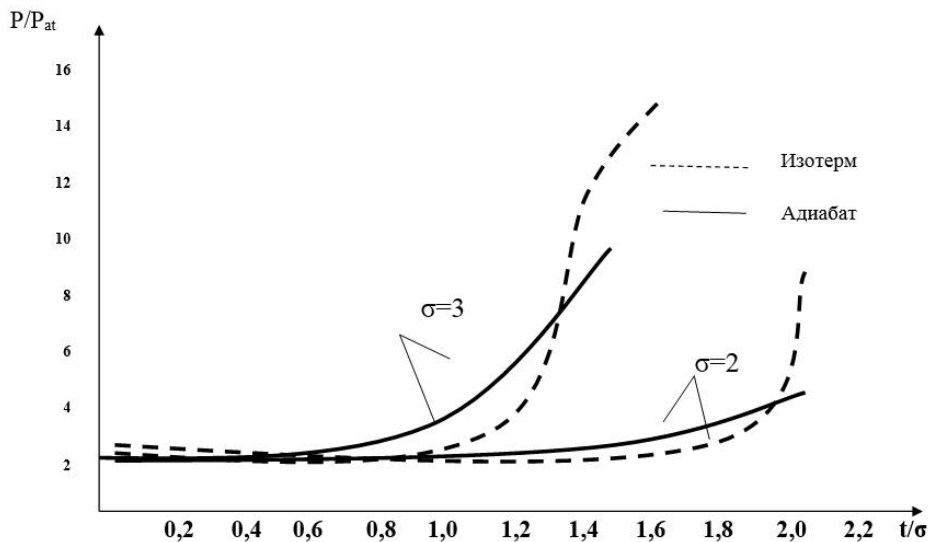


Рис. 5. Кривые зависимости $\frac{P}{P_{at}}$ от $\frac{t}{\sigma}$ для изотермического и адиабатического процессов сжатия воздуха при значениях параметра $\sigma=2, \sigma=3$.

С помощью зависимостей $\frac{P}{P_{at}} \left(\frac{t}{\tau_*} \right)$ и формул (4) и (7) построены кривые зависимости $\frac{\vartheta}{\vartheta_n}$ от $\frac{t}{\tau_*}$, которые представлены на рис. 6.

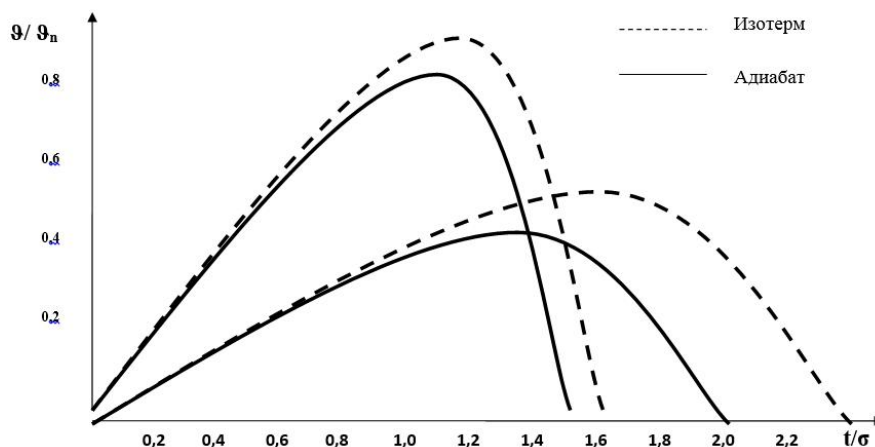


Рис.6. Кривые зависимости $\frac{\vartheta}{\vartheta_n}$ от $\frac{t}{\sigma}$ для изотермического и адиабатического процессов сжатия воздуха при значениях параметра $\sigma=2, \sigma=3$.

Из этих графиков видно, что эффект торможения потока заземленным воздухом усиливается после достижения скорости движения воды от резервуара к воздуху максимума [2,9-14].

Заключение. При выключении насосов на некоторых промежуточных участках по длине трубы происходит разрыв потока, где появляется зазор, и если в это место ввести воздух, то расстояние между выступающими столбиками увеличивается. По мере сближения столбиков наблюдается увеличение давления сжатого воздуха. В результате рассматривается неустановившееся движение воды в простой трубе с собранным на конце сжатым воздухом. Зазор, в который поступает воздух, заполнен водовоздушной смесью, и

от воздуха к воде интенсивно выделяется тепло. Поэтому в процессе сжатия температура воздуха мало изменяется, и в этом отношении процесс близок к изотермическому процессу. С другой стороны, процесс сжатия происходит за короткое время, и тепло от воздуха к воде выделяется лишь частично. В этом отношении процесс сжатия близок к адиабатическому процессу [2].

Из графиков следует, что временной интервал достижения давлением максимального значения зависит от параметров σ и τ^* . Из уравнений (5) и (15) следует, что этот временной интервал зависит от давления H , длины трубопровода L и длины зоны сжатого воздуха l_0 [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрияшев М.М. Графические расчеты гидравлического удара в водоводах. Издательство литературы по строительству, М., 1969. -65 с.
2. Арифжанов А.М., Жонқобилов У.У., Жонқобилов С.У. Бир жинсли ва газли суюклик напорли окимларининг гидравлик зарбага ҳисоби. Монография, Т.: Ворис нашриёт. 2019, -155 б.
3. Смирнов Д.Н., Зубов Л.Б. Гидравлический удар в напорных водоводах. – М., Стройиздат, 1975. – 125 с.
4. Сурин А.А. Гидравлический удар в водопроводах и борьба с ним. – М. – Л., Трансжелдориздат, 1946. – 371 с.
5. Трозян Р.Е. Понижение давления в трубопроводе при гидравлическом ударе. Сб. научн. Трудов Ереванского политехнического института, т.22, серия: Экономика, энергетика, гидротехника. Вып.1, 1965, с.23-37.
6. Мошнин Л.Ф., Тимофеева Е.Т. Указания по защите водоводов от гидравлического удара. – М., Стройиздат, 1961, - 227 с.
7. Жонқобилов У.У., Ражабов У.М, Жонқобилов Б.У., Хушиев Ш.П., Улугмуродов М.Б. Максимально возможный напор в трубопроводе при прямом гидроударе с повышением давления. *Samo qalqonlari. Ilmiy – axborot jurnali*. 2023 y.
8. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.-Л. 1949.- 104-с.
9. A. Arifjanov, U Jonqobilov, S Jonqobilov, Sh Khushiyev, J Xusanova. The influence of hydraulic friction on the maximum pressure of water hammer. ICECAE 2020, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012092, IOP Publishing, doi:10.1088/1755-1315/614/1/012092.
10. Jonkobilov, S., Jonkobilov, B., Bahodirov, S., Ruzikulov, J., & Ulugmuradov, M. (2025, July). Water shock when starting pumps in automated pumping stations. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3256, No. 1, p. 020034). AIP Publishing LLC.
11. Jonkobilov, U., Rajabov, U., Jonkobilov, S., Xushiyev, S., & Bahodirov, S. (2025, July). Air chamber as hydraulic shock absorber. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3256, No. 1, p. 020033). AIP Publishing LLC.
12. Jonkobilov, U., Jonkobilov, B., Rajabov, U., Jonkobilov, S., & Ulugmuradov, M. (2025, June). Maximum increase in direct hydraulic shock pressure. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3286, No. 1, p. 040032). AIP Publishing LLC.
13. Jonqobilov S.U. Nasos stansiyasini ishga tushirishda gidravlik zarba. *Innovatsion texnologiyalar jurnali*, 2025-yil 4(60)-son, Qarshi, -86-95 betlar. <https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2025-4.11>.
14. Jonqobilov S.U. Gidravlik zarbaga qarshi pnevmogidravlik so'ndirgich. *Innovatsion texnologiyalar jurnali*, 2026-yil 1(61)-son, Qarshi, -47-56 betlar. <https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-1.06>.