

ГИДРАВЛИКА

А. И. МАРКАРЯН

РАСЧЕТ СЖАТИЯ ВОЗДУХА, ЗАЩЕМЛЕННОГО В МЕСТЕ
 РАЗРЫВА СПЛОШНОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДЕ

Для снижения ударного давления в трубопроводах насосных станций А. Ф. Мошин [1] предлагает произвести выпуск и защемление воздуха в местах образования разрывов сплошности потока. Защемленный 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.

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

Целью настоящей статьи является упрощение расчетов гидравлического удара при выпуске и защемлении воздуха в местах образования разрывов сплошности потока путем применения уравнения неустановившегося движения несжимаемой жидкости в неупругой трубе.

Во избежание распространения колебаний повышения и понижения давления по всей длине трубопровода на вероятных местах образования разрывов сплошности потока рекомендуется устанавливать на трубопроводе отсекающие обратные клапаны и клапаны для выпуска и защемления воздуха [1].

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 сплошности потока произвести выпуск воздуха, то расстояние между разошедшимися колоннами увеличится. Обозначим это расстояние l_n (рис. 1). Определим повышение давления в защемленном воздухе при сближении ко-

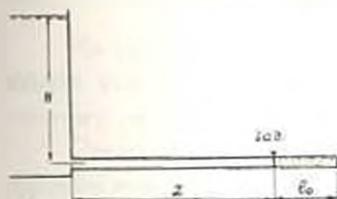


Рис. 1.

лонны воды к отсекающему обратному клапану, установленному на правой границе воздушного участка трубы. Для этой цели рассмотрим неустановившееся движение воды в простом трубопроводе с защем-

ленным воздухом в конце (рис. 1). На границе раздела воды и воздуха установлена задвижка. Начальное абсолютное давление воздуха p_{00} .

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 растворения в воде и объем воздуха пренебрежимо мал по сравнению с объемом воды, заключенной в трубе, то есть $l_0 \ll L$. Примем также, что передний фронт колонны воды плоский и перпендикулярен к оси трубы. В действительности при движении колонны передний фронт принимает пологую форму, а воздух собирается в верхней части трубы. Однако при этом объем воздуха не меняется, и такая идеализованная схема не может принести к существенному изменению истинной картины явлений.

Если пренебречь потерями напора и скоростным напором, то уравнение неустановившегося движения несжимаемой жидкости в неупругой трубе запишется в виде:

$$H + \frac{p_{00}}{\gamma} = \frac{p}{\gamma} + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

где p_{00} — атмосферное давление; p — абсолютное давление воздуха; v — скорость движения воды; t — время; L — длина трубы.

Уравнение (1) содержит две неизвестные функции $p(t)$ и $v(t)$. Скорость движения колонны воды можно определить из выражения:

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

Связь между давлением и объемом воздуха выражается уравнением состояния газа.

При изотермическом сжатии воздуха будем иметь:

$$p_{00} l_0 = pl. \quad (3)$$

Решая уравнение (1) с учетом уравнений (2) и (3) при начальном условии

$$t = 0 \quad v = 0 \quad \text{и} \quad p = p_{00}, \quad (4)$$

получим

$$\frac{v}{v_*} = \int \left[2 \left(1 - \frac{p_{00}}{p} \right) - \ln \frac{p}{p_{00}} \right]^{1/2} dl, \quad (5)$$

где

$$v_* = \left[2g \frac{p_{00}}{\gamma} \frac{l_0}{L} \right]^{1/2} \left[2 - 1 - \frac{\gamma H}{p_{00}} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Адиабатическое сжатие воздуха характеризуется уравнением

$$p_{00} l_0^k = pl^k, \quad (7)$$

где k — показатель адиабаты (для воздуха $k = 1.4$).

Совместное решение уравнений (1), (2) и (7) с учетом (4) дает:

$$\frac{v}{v_*} = \sqrt{\varepsilon \left(1 - \frac{p_{ат}^{1/k}}{p^{1/k}} \right) - \frac{1}{k-1} \left(\frac{p^{(k-1)/k}}{p_{ат}^{(k-1)/k}} - 1 \right)}. \quad (8)$$

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

На рис. 2 приведена зависимость $\frac{v}{v_*} \left(\frac{p}{p_{ат}} \right)$ при изотермическом и адиабатическом сжатии воздуха для $\varepsilon = 2$ и $\varepsilon = 3$.

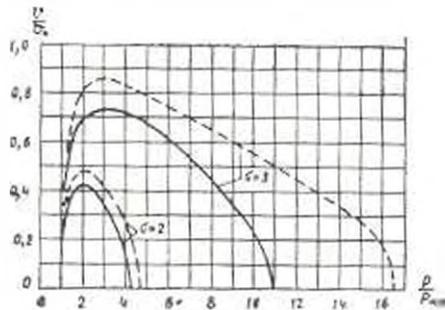


Рис. 2 Кривые зависимости v/v_* от $p/p_{ат}$:

— — — изотермическое сжатие;
 - - - адиабатическое сжатие.

Из (5) и (8) легко заметить, что скорость движения воды достигает максимума при $p/p_{ат} = \varepsilon$. Это означает, что при изменении $p/p_{ат}$ в интервале $[1, \varepsilon]$ движение ускоренное, а в интервале $[\varepsilon, p_{max}/p_{ат}]$ движение замедленное. При изотермическом сжатии максимальная скорость будет:

$$v_{max} = v_* \sqrt{\varepsilon - 1 - \ln \varepsilon}, \quad (9)$$

а при адиабатическом —

$$v_{max} = v_* \sqrt{\varepsilon - \frac{1}{k+1} - \frac{k}{k-1} \varepsilon^{(k-1)/k}}. \quad (10)$$

Из (5) и (8) следует, что $v = 0$ либо при $p = p_{ат}$ [это соответствует условию (4)], либо при $p = p_{max}$, что соответствует максимально сжатому состоянию воздуха.

Стало быть, максимальные давления при изотермическом и адиабатическом сжатиях соответственно определяются выражениями:

$$\varepsilon \left(1 - \frac{p_{ат}}{p_{max}} \right) - \ln \frac{p_{max}}{p_{ат}} = 0, \quad (11)$$

$$\varepsilon \left(1 - \frac{p_{ат}^{1/k}}{p_{max}^{1/k}} \right) - \frac{1}{k-1} \left(\frac{p_{max}^{(k-1)/k}}{p_{ат}^{(k-1)/k}} - 1 \right) = 0. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что p_{max} зависит только от напора и не зависит от длины участка заземленного воздуха.

В действительности процесс сжатия воздуха будет политропным. С одной стороны, пространство, куда впускается воздух, заполнено водовоздушной смесью и имеется интенсивный отвод тепла от воздуха к воде [1]. Поэтому в процессе сжатия температура воздуха изменяется незначительно (в этом отношении процесс близок к изометрическому). С другой стороны, процесс сжатия происходит за короткий промежуток времени и происходит частичный отвод тепла от воздуха к воде (процесс близок к адиабатическому).

Для оценки эффекта, получаемого при пуске и заземлении воздуха в месте образования разрыва, определим p_{max} при отсутствии воздуха. В этом случае в (1) p следует заменить давлением насыщенных паров p_{sat} . Тогда 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:

$$v_{max} = \sqrt{2g \left(H + \frac{p_{sat}}{\gamma} - \frac{p_{atm}}{\gamma} \right) \frac{l_p}{L}} \quad (13)$$

В месте образования разрыва потока величину вакуума принимая максимальной $h_v = 10$ м вод. ст. ($p_{v0} = 0$), (13) запишется в виде:

$$v_{max} = \sqrt{2g \frac{p_{sat}}{\gamma} + \frac{l_p}{L}} \quad (14)$$

Максимальное повышение давления, вызванное гашением скорости v_{max} , будет [2]:

$$p_{max} = \alpha \sqrt{2 \frac{\gamma}{g} p_{sat} + \frac{l_p}{L}} \quad (15)$$

где α — скорость распространения волн изменения давления.

Из (15) видно, что при отсутствии воздуха величина максимального повышения давления зависит от l_p и L , что не имело места при заземлении воздуха.

Для нахождения функции $p(t)$ воспользуемся уравнениями (2), (3) и (5). После несложных преобразований получим:

$$d \left(\frac{t}{\tau_w} \right) = \frac{d \left(\frac{p}{p_{atm}} \right)}{\frac{p^2}{p_{atm}^2} \sqrt{2 \left(1 - \frac{p_{atm}}{p} \right) - \ln \frac{p}{p_{atm}}}} \quad (16)$$

где

$$\tau_w = \frac{l_0}{v_w} = \sqrt{\frac{\gamma l_0 L}{2g p_{atm}}} \quad (17)$$

— некоторый параметр времени.

Вводя новое переменное $x = 1 - p_{01}/p$, (16) представится в виде:

$$d\left(\frac{t}{\tau_*}\right) = \frac{dx}{1 - \frac{2}{k}x + \ln(1-x)}. \quad (18)$$

Из уравнений (2), (7) и (8) для адиабатического сжатия получим:

$$d\left(\frac{t}{\tau_*}\right) = \frac{dx}{\sqrt{2x - \frac{1}{k-1}[(1-x)^{1-k} - 1]}}, \quad (19)$$

где

$$x = 1 - p_{01}^{1/k} p^{1/k}.$$

По уравнениям (18) и (19) при $t=0$ $x=0$ на ЭВМ вычислены значения функции $p\left(\frac{t}{\tau_*}\right)$ для $\tau=2$ и $\tau=3$. Графики зависимости

$\frac{p}{p_0}\left(\frac{t}{\tau_*}\right)$ приведены на рис. 3. С помощью этих зависимостей и формул (5) и (8) построены графики функции $\frac{v}{v_*}\left(\frac{t}{\tau_*}\right)$, которые представлены на рис. 3.

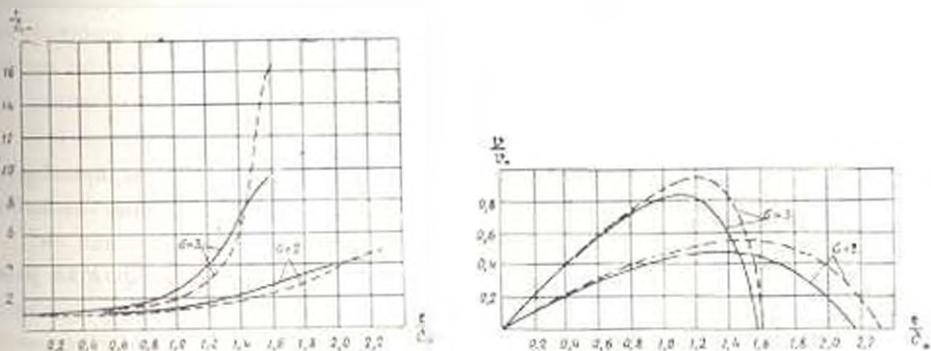


Рис. 3. Кривые зависимости p, p_{01} и v, v_* от t/τ_* .

— — — изотермическое сжатие;
 — — — адиабатическое сжатие.

Из графиков рис. 3 следует, что промежуток времени, в течение которого давление достигает максимума, зависит от параметров τ и τ_* . Из (6) и (17) следует, что этот промежуток времени зависит от H, l_0 и L .

Как видно из рис. 3, эффект торможения потока заземленным воздухом усиливается после достижения скорости движения воды максимума.

В ы в о д ы

1. Максимальное повышение давления при впуске и заземлении воздуха в месте образования разрыва сплошности потока не зависит от H, l_0 и L .

от длины зоны разрыва, а зависит только от статического напора в месте образования разрыва.

2. Впуск и защемление воздуха в месте образования разрыва сплошности потока снижает давление, когда длина разрыва сплошности потока больше ее предельного значения, определяемого совместным решением уравнений (11) и (15) для изотермического сжатия воздуха и (12), (15) для адиабатического.

3. Впуск и защемление воздуха как мера борьбы с гидравлическим ударом тем эффективнее, чем меньше статический напор в месте образования разрыва сплошности потока. При высоких статических напорах предельное значение длины разрыва возрастает и впуск и защемление воздуха становится нецелесообразным, так как достигаемый при этом эффект незначительный.

Ервандовский политехнический институт
им. К. Маркса

Получило 15.IV.1971.

Ա. ՅԱ. ՄԱՐԿՐՅԱՆ

ԽՍՀՄ-ԿԱՆԱԾԱՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱՆՎՆԴԱՏՈՒԹՅԱՆ ԵՐԵՎԱՆԻ ՏԵԿՆԻԿԻ
ԻՑՈՒՆԵՐԻ ՈՍԿԱՐԿՈՒԹՅԱՆ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ

Ս. մ ֆ ո ֆ ո ս լ մ

Հողմածուրդի դիտում է պոմպային հայանների խողովակաշարերում ընդ հոսանքի անընդհատության խզման տեղում օդի մուտքի և խցանման հեռանալու մեջնան փոփոխության հարցը:

Ցզի խզման և ադիաբատ սեղմման դեպքերի համար ստացված են բանաձևեր առավելագույն մեջումների որոշման համար:

Ռաշված է հոսանքի անընդհատության խզման սահմանային երկարությունը, որից մեծ և փոքր երկարության խողովակների դեպքում օդի մուտքը և խցանումը խզման տեղում բերում է մեջնան փոփոխության հակառակ արդյունքների: Ցզի մուտքը և խցանումը հոսանքի անընդհատության խզման տեղում արդյունավետ է, երբ խզվածքի երկարությունը մեծ է նրա սահմանային արժեքից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Указания по защите водопроводов от гидравлического удара. Гостехиздат, М., 1963.
2. Жуковский И. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Гостехиздат, М., 1939.