

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---------------------------------|----|
| Введение _____ | 4 |
| 1. Теоретические сведения _____ | 5 |
| 2. Пример расчета _____ | 12 |
| 3. Контрольные вопросы _____ | 18 |
| Список литературы _____ | 19 |
| Приложения _____ | 20 |

Введение

Целью данной расчетно-графической работы является закрепление и углубление знаний студентами по дисциплине «Гидравлика», в частности ее разделов *Кинематика* и *Гидродинамика*.

Кинематика жидкости изучает связи между геометрическими характеристиками движения и временем (скоростью и ускорением), а *Гидродинамика* изучает законы движения жидкости как результат действия сил. Расчет простого трубопровода на гидравлический удар обобщает основные положения вышеуказанных разделов дисциплины.

Данные методические указания, включающие в себя краткий теоретический материал, пример расчета, и варианты заданий расчетно-графической работы позволят студентам повысить уровень самоподготовки и овладеть материалом дисциплины.

Исходные данные, характеристики жидкости и материалов труб выбираются соответственно по таблицам А.1, А.2, А.3 «ПРИЛОЖЕНИЯ», согласно номеру варианта, выданному студенту преподавателем. Вариант жидкости выбирается в зависимости от направления, по которому обучается студент – таблица А.4.

Работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки на листах бумаги формата А4.

1. Теоретические сведения

Одним из основных элементов гидравлического расчета является трубопровод, который может быть изготовлен из различных материалов. Трубопроводы бывают напорными и безнапорными, простыми и сложными [1].

Простым называют трубопровод, по которому жидкость транспортируют от питателя к приемнику без промежуточных ответвлений потока.

Сложный трубопровод имеет разветвленные участки, состоящие из нескольких труб (ветвей), между которыми разветвляется жидкость, поступающая в трубопровод из питателей.

Простые трубопроводы принято подразделять на короткие и длинные.

Короткими называют трубопроводы сравнительно небольшой длины, в которых потери напора на преодоление местных сопротивлений составляют не менее 10...15 % общей суммы потерь. К коротким трубопроводам можно отнести: водовыпуски; системы подачи охлаждающей воды, смазочные системы; трубопроводы гидросистем и гидроприводов сельхозмашин и т.п. При их расчете необходимо учитывать отдельно каждое местное сопротивление.

Длинными называют трубопроводы большой длины, в которых доля местных потерь не превышает 5...10 % в общем балансе потерь, то есть

основным видом потерь являются потери на трение по длине. К ним относятся обычные водопроводы, нефтепроводы и т.п.

При расчете простого трубопровода (рис.1) составляют уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 (сечение 2-2 расположено «ниже» по течению), которое в сокращенной форме имеет вид:

$$H_1 = H_2 + h_{\Sigma} , \quad (1)$$

где H_1, H_2 - напор (удельная энергия, приходящаяся на единицу веса жидкости) соответственно в сечениях 1-1 и 2-2, м;

h_{Σ} - суммарные потери напора по длине трубопровода, м.

Суммарные потери напора h_{Σ} при расчетах длинных трубопроводов вычисляют по формуле:

$$h_{\Sigma} = j \cdot \beta \cdot \frac{Q^2}{k^2} \cdot l , \quad (2)$$

где j – коэффициент, учитывающий местные потери напора ($j=1, 1 \dots 1, 2$);

β – коэффициент, учитывающий скорость в трубопроводе [2];

Q – расчетный расход жидкости на рассматриваемом участке трубопровода, м³/с;

k – модуль расхода (в справочниках обычно приводится k^2 или удельное сопротивление $A=1/k^2$);

l – длина рассматриваемого участка трубопровода, м.

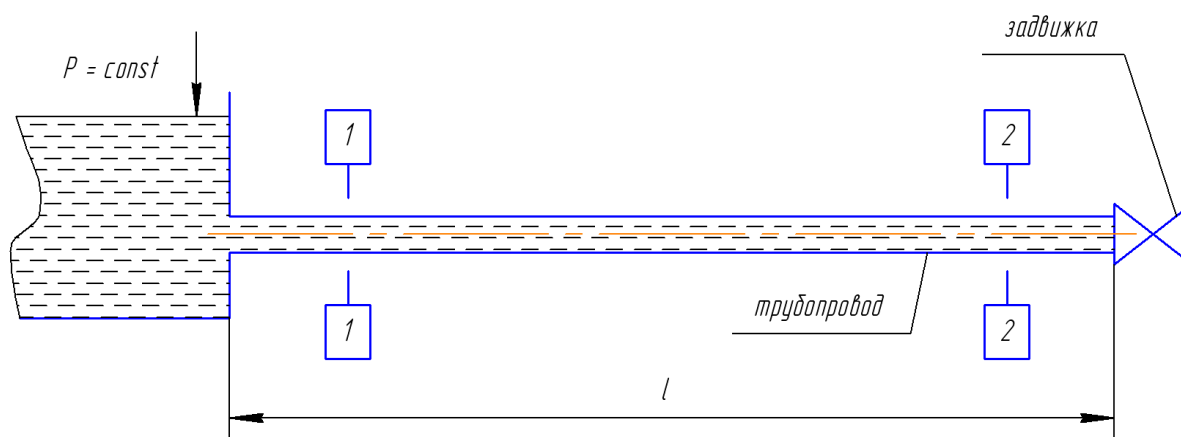


Рисунок 1 – Расчетная схема простого трубопровода

Так как в простых длинных трубопроводах доля местных потерь незначительна, по сравнению с потерями на трение по длине, то равенство (1) можно представить в виде:

$$H_1 - H_2 = H_0 = h_{mp}, \quad (3)$$

где H_0 - напор, соответствующий скорости установившегося движения жидкости в трубопроводе, м;

h_{mp} - потери напора на трение по длине трубопровода, м.

При технико-экономических расчетах и выполнении гидравлических расчетов на ЭВМ потери напора рекомендуется находить по формуле [2,3]:

$$h_{mp} = k \cdot Q^a \cdot l / d^b, \quad (4)$$

где a, b - величины, определяемые по справочным таблицам;

Q - расчетный расход воды в трубопроводе, м³/с;

l - длина трубопровода, м;

d - диаметр трубы, м.

Согласно [3] при скорости установившегося течения $g_0 > 1$ м/с:
 $k = 0,001735$; $a = 2$; $b = 5,3$.

Скорость установившегося движения жидкости определяется из уравнения расхода:

$$g_0 = Q / S = 4Q / \pi d^2, \quad (5)$$

где S - площадь рассматриваемого сечения трубы, м².

Гидравлический удар – это явление резкого изменения давления в трубопроводе с последующими колебаниями во времени скорости движения жидкости, плотности и давления. Гидравлический удар – частный случай неустановившегося напорного движения жидкости. Удар в трубопроводе происходит в момент, когда скорость движения изменяется в результате быстрого закрытия или открытия задвижки (крана) или внезапной остановки насоса из-за отключения электропитания [1-3].

Например, при закрытии задвижки в конце трубопровода примыкающие частицы жидкости затормаживаются, и в этой зоне повышается давление. Затем тормозятся соседние частицы жидкости. В результате зона повышенного давления быстро расширяется, занимая весь трубопровод. Возникает неравномерное состояние, так как давление в трубопроводе превышает давление, создаваемое напорным резервуаром. Жидкость начинает вытекать из трубопровода, и давление в нем понизится. Из-за инерции жидкости давление станет меньше, чем давление в напорном баке, поэтому жидкость будет вновь втекать в трубопровод и тормозится у задвижки.

Таким образом, при гидравлическом ударе через трубопровод проходят волны повышенного и пониженного давления. При этом скорость движения частиц жидкости гасится, а кинетическая энергия потока расходуется на работу деформации сжатия жидкости и растяжения стенок трубопровода.

В результате сжатия жидкости в момент гидравлического удара возникает дополнительное давление $\Delta p_{уд}$, значение которого весьма значительно (например, для стальных трубопроводов 1Мпа на каждый 1м/с потерянной скорости [5]). Как высокое давление, так и разрежение, возникающие при гидравлическом ударе, нередко являются причиной повреждения трубопроводов.

При мгновенном закрытии задвижки, установленной в конце трубопровода, повышение давления при гидравлическом ударе вычисляют по формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p_{уд} = \rho \cdot c \cdot \mathcal{G}_0, \quad (6)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м³;

\mathcal{G}_0 - скорость установившегося движения жидкости в трубопроводе до удара, м/с;

c - скорость распространения волны гидравлического удара, определяемая по формуле Корвега-Жуковского [2, 5]:

$$c = \frac{\sqrt{E_{жс} / \rho}}{\sqrt{1 + (d / e)(E_{жс} / E)}}, \quad (7)$$

где $E_{жс}$ - модуль объемной упругости жидкости, Па;

d - внутренний диаметр трубопровода, м;

e - толщина стенок трубопровода, м;

E - модуль упругости материала стенок трубопровода, Па;

Значения модулей упругости жидкостей и материала стенок представлены в таблице А.2 «Приложения» [3].

Величина Π называется ударным параметром и определяется по формуле

$$\Pi = \frac{c \cdot \mathcal{G}_0}{2gH_0}, \quad (8)$$

где H_0 - напор, соответствующий скорости установившегося движения жидкости \mathcal{G}_0 , м;

g - ускорение свободного падения, м/с².

При $\Pi < 0,7$ воздействие удара на трубопровод можно считать безопасным. В противном случае необходимо выполнить расчет на гидроудар.

Если l - длина трубопровода, м, примыкающего к задвижке, то промежуток времени

$$\tau_0 = 2l / c \quad (9)$$

называется фазой удара – время пробега ударной волны со скоростью C , м/с, от задвижки (источника удара) до резервуара и обратно к задвижке.

Необходимо отметить, что случай мгновенного закрытия задвижки практически нереален. В действительности задвижка закрывается не мгновенно, а за какое-то, хотя и малое, время $t_{зак}$. При этом повышение давления при гидравлическом ударе будет зависеть от закона закрытия задвижки и в некоторых случаях будет меньше, чем вычисленное по формуле Н.Е.Жуковского.

Различают следующие случаи:

- **Прямой гидравлический удар**, при котором время закрытия задвижки $t_{зак} < \tau_0$. В этом случае наибольшее давление при гидравлическом ударе определяется по формуле (6):

$$\Delta p_{y\partial}^{\max} = \rho \cdot c \cdot g_0. \quad (10)$$

- **Непрямой гидравлический удар**, который имеет место при $t_{зак} > \tau_0$. При этом параметры потока изменяются во времени. Если удар не прямой, то расчет ведется в следующей последовательности [3].

За расчетный промежуток времени, в течении которого параметры потока предполагаются постоянными, принимается фаза удара τ_0 . Количество расчетных промежутков составляет

$$n = \text{int}(t_{зак} / \tau) + 1. \quad (11)$$

Расчетные промежутки времени определяются нарастающим итогом:

$$t_i = \tau_0 \cdot i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

В течение первого расчетного промежутка времени ($i = 1$) средняя скорость движения жидкости в трубопроводе находится по зависимости:

$$g_1 = \frac{\sqrt{c^2 + 2(c \cdot g_0 + g \cdot H_0)(\zeta_1^3 + \zeta_0)} - c}{\zeta_1^3 + \zeta_0}, \quad (13)$$

где $\zeta_0 = \frac{2gH_0}{g_0^2} - \zeta_0^3$ - полный коэффициент сопротивления

трубопровода при установившемся движении;

ζ_0^3, ζ_1^3 - коэффициенты местного сопротивления задвижки в зависимости от относительного открытия h/d_3 (h - величина открытия задвижки, d_3 - диаметр задвижки) и отношения диаметра трубопровода к диаметру задвижки d/d_3 (Таблица А.3).

Изменение давления в трубопроводе в течение первого расчетного промежутка времени

$$\Delta p_{y\partial 1} = \rho \cdot c (\mathcal{G}_0 - \mathcal{G}_1). \quad (14)$$

Во второй и последующие расчетные промежутки времени ($i = 2, 3, \dots, n$) изменение давления в трубопроводе определяется взаимодействием прямых и отраженных волн:

$$\Delta p_{y\partial i} = 2\rho g H_0 \left[\Pi_{i-1} + \left(\Pi \frac{\varphi_i}{\varphi_0} \right)^2 - \Pi \frac{\varphi_i}{\varphi_0} \sqrt{1 + 2\Pi_{i-1} + \left(\Pi \frac{\varphi_i}{\varphi_0} \right)^2} \right], \quad (15)$$

где $\Pi_{i-1} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{i-1} \Delta p_{y\partial j}$ - ударный параметр для предыдущего периода времени;

$$\varphi_0 = \mathcal{G}_0 / \sqrt{2gH_0}; \quad \varphi_i = 1 / \sqrt{\zeta_0 + \zeta_i^3} \text{ - коэффициенты скорости.}$$

Давление перед задвижкой во второй и последующий расчетные промежутки времени

$$p_i = p_n + \sum_{j=1}^i \Delta p_{y\partial j}, \quad (16)$$

где p_n - начальное давление жидкости в трубопроводе, Па.

В момент полного закрытия ($i = n$):

$$\Delta p_{y\partial_{полн}} = 2\rho g H_0 \Pi_{n-1}. \quad (17)$$

Через промежуток времени $\tau/2$ после полного закрытия задвижки у резервуара возникает волна понижения давления

$$\Delta p'_{y\partial} = 4\rho g H_0 \Pi^2 \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta p_{y\partial_{полн}}}{2\rho g H_0 \Pi^2}} - 1 \right). \quad (18)$$

Распространение этой волны вызывает обратное течение со скоростью

$$\mathcal{G}_{обр} = \frac{\Delta p'_{y\partial}}{\rho \cdot c}. \quad (19)$$

Если $\Delta p'_{уд}$ больше статического давления в трубопроводе

$$p_{ст} = p_n + \rho g H_0, \quad (20)$$

то происходит разрыв сплошности потока.

Величины $\Delta p_{уд\text{полн}}$ и $\Delta p'_{уд}$ являются определяющими при выборе материала труб или указывают на необходимость защиты от воздействия гидроудара.

На начальной стадии закрытия задвижки ее гидравлическое сопротивление сравнительно невелико, поэтому при расчете «вручную» можно сократить вычисления, полагая, что при увеличении коэффициента сопротивления задвижки от ζ_0^3 до $0,5\zeta_0$ повышение давления можно рассчитывать без учета наложения обратных волн, как для первого расчетного промежутка.

Далее по величине $0,5\zeta_0$ находят отношение h/d_3 (см. табл. А.3), а затем время

$$t = (1 - h/d_3)t_{зак} \quad (21)$$

и номер

$$i = \text{int}[n(1 - h/d_3)] \quad (22)$$

расчетного промежутка, начиная с которого необходимо учитывать наложение обратных волн.

2. Пример расчета

Исходные данные: Жидкость – вода; $Q_0 = 101$ л/с; $p_n = 649$ Кпа; труба – чугунная; $l = 850$ м; $d = 302,2$ мм; $e = 8$ мм; $t_{зак} = 31$ с; $d_3 = 200$ мм.

Решение:

Определяем неизвестные параметры потока до удара:

- скорость установившегося движения жидкости (см. ф-лу (5)):

$$v_0 = 4Q / \pi d^2 = 4 \cdot 0,101 / (\pi \cdot 0,3022^2) = 1,4081 \text{ м / с};$$

- соответствующий этой скорости напор (ф-лы (3),(4)):

$$H_0 = h_{mp} = 0,001735 \cdot Q^2 \cdot l / d^{5,3} = 0,001735 \cdot 0,101^2 \cdot 850 / 0,3022^{5,3} = 8,547 \text{ м} .$$

Параметры гидравлического удара:

- скорость распространения ударной волны (ф-ла (7) с учетом табл. А2):

$$c = \frac{\sqrt{E_{жс} / \rho}}{\sqrt{1 + (d / e)(E_{жс} / E)}} = \frac{\sqrt{2,03 \cdot 10^6 \cdot 10^3 / 1000}}{\sqrt{1 + (302,2 / 8)0,02}} = 1075 \text{ м / с} ;$$

- фаза гидроудара (ф-ла (9)):

$$\tau_0 = 2l / c = 2 \cdot 850 / 1075 = 1,581 \text{ с} ;$$

- ударный параметр (ф-ла (8)):

$$\Pi = \frac{c \cdot \mathcal{Q}_0}{2gH_0} = \frac{1075 \cdot 1,4081}{2 \cdot 9,81 \cdot 8,547} = 9,027 > 0,7 .$$

Расчет на гидроудар необходим!

Так как $t_{зак} > \tau_0$ ($31 > 1,581$) – удар не прямой. Поэтому расчет ведем по приведенной выше последовательности.

Определяем постоянные величины:

- отношение диаметров:

$$d / d_3 = 302,2 / 200 = 1,5 ;$$

- коэффициент местного сопротивления задвижки в начальный момент времени, при установившемся движении (задвижка полностью открыта $h / d_3 = 1$) (Табл. А.3):

$$\zeta_0^3 = 0,3 ;$$

- полный коэффициент сопротивления трубопровода при установившемся движении:

$$\zeta_0 = \frac{2gH_0}{\mathcal{Q}_0^2} - \zeta_0^3 = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 8,547}{1,4081^2} - 0,3 = 84,276 ;$$

- коэффициент скорости в начальный момент времени:

$$\varphi_0 = \mathcal{Q}_0 / \sqrt{2gH_0} = 1,4081 / \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 8,547} = 0,1087 .$$

Далее определяем количество расчетных промежутков времени, в течение которых параметры потока предполагаются постоянными (ф-ла (11)):

$$n = \text{int}(t_{\text{зак}} / \tau) + 1 = \text{int}(31 / 1,581) + 1 = 19 + 1 = 20$$

и закон закрытия задвижки:

$$\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{i}{n} = 1 - \frac{i}{20}.$$

Время расчетного промежутка находим по зависимости (ф-ла (12)):

$$t_i = \tau_0 \cdot i = 1,581i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Результаты расчета сводим в таблицу 1.

Для первого расчетного промежутка времени ($i = 1$) $t_1 = 1,58c$:

$$\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{1}{20} = 0,95.$$

Значения ζ_i^3 , не попавшие в узлы таблицы Приложения 3, находим по интерполяционной формуле:

$$\zeta_i^3 = \zeta_{j-1}^3 + \frac{\zeta_j^3 - \zeta_{j-1}^3}{\left(\frac{h}{d_3}\right)_j - \left(\frac{h}{d_3}\right)_{j-1}} \left[\left(\frac{h}{d_3}\right)_i - \left(\frac{h}{d_3}\right)_{j-1} \right], \quad (23)$$

где j - номер строки таблицы.

$$\zeta_1^3 = \zeta_0^3 + \frac{\zeta_1^3 - \zeta_0^3}{\left(\frac{h}{d_3}\right)_1 - \left(\frac{h}{d_3}\right)_0} \left[\left(\frac{h}{d_3}\right)_1 - \left(\frac{h}{d_3}\right)_0 \right] = 0,3 + \frac{1-0,3}{0,9-1} (0,95-1) = 0,65$$

Средняя скорость движения жидкости в течение первого расчетного промежутка времени (ф-ла (13)):

$$g_1 = \frac{\sqrt{1075^2 + 2(1075 \cdot 1,4081 + 9,81 \cdot 8,547)(0,65 + 84,27)} - 1075}{0,65 + 84,27} = 1,4078 \text{ м/с},$$

а изменение давления составляет (ф-ла (14)):

$$\Delta p_{y\partial 1} = 1000 \cdot 1075(1,4081 - 1,4078) = 0,354 \text{ КПа}$$

Далее используем сокращенную методику расчета полагая, что при увеличении коэффициента сопротивления задвижки ζ^3 до половины коэффициента полного сопротивления трубопровода ζ_0 повышение давления незначительно (см. значение $\Delta p_{y\partial 1}$).

$$0,5\zeta_0 = 0,5 \cdot 84,27 \approx 42$$

Если $\zeta^3 = 42$, то (см. табл. А3) $\frac{h}{d_3} \approx 0,250$. Тогда следующий шаг в расчете (ф-ла (22))

$$i = \text{int}[20 \cdot (1 - 0,250)] = 15.$$

$$\underline{i = 15; t_{15} = 23,7c:}$$

Из закона закрытия задвижки: $\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{15}{20} = 0,25$; коэффициент сопротивления задвижки (ф-ла (23)): $\zeta_{17}^3 = 47,0$; результаты промежуточных расчетов:

$$\varphi_{15} = 1 / \sqrt{84,27 + 47,0} = 0,08728, \quad \Pi \frac{\varphi_{15}}{\varphi_0} = 9,027 \frac{0,08728}{0,10874} = 7,2455,$$

$\Pi_{14} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{14} \Delta p_{y\partial j} = 9,027 - \frac{0,354}{83,8} = 9,023$; изменение давления в трубопроводе за данный промежуток времени (ф-ла (15)):

$$\Delta p_{y\partial 15} = 167,687 \cdot (9,023 + 7,2455^2 - 7,2455 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot 9,023 + 7,2455^2}) = 39,486 \text{ КПа};$$

давление перед задвижкой (ф-ла (16)):

$$p_{15} = 649,000 + 0,354 + 39,486 = 688,84 \text{ КПа}.$$

$$\underline{i = 16; t_{16} = 25,28c:}$$

$$\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{16}{20} = 0,2; \quad \zeta_{16}^3 = 80,0;$$

$$\varphi_{16} = 1 / \sqrt{84,27 + 80,0} = 0,078; \quad \Pi \frac{\varphi_{16}}{\varphi_0} = 9,027 \frac{0,078}{0,10874} = 6,475;$$

$$\Pi_{15} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{15} \Delta p_{y\partial j} = 9,027 - \frac{0,354 + 39,486}{83,8} = 8,55;$$

$$\Delta p_{y\partial 16} = 167,687 \cdot (8,55 + 6,475^2 - 6,475 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot 8,55 + 6,475^2}) = 51,946 \text{ КПа};$$

$$p_{16} = 688,84 + 51,946 = 740,786 \text{ КПа}.$$

$$\underline{i = 17; t_{17} = 26,86c:}$$

$$\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{17}{20} = 0,15;$$

$$\zeta_{17}^3 = 160,0 + \frac{280,0 - 160,0}{0,140 - 0,160} \cdot (0,150 - 0,160) = 220,0;$$

$$\varphi_{77} = 1 / \sqrt{84,27 + 220,0} = 0,05733; \quad \Pi \frac{\varphi_{17}}{\varphi_0} = 9,027 \frac{0,05733}{0,10874} = 4,759;$$

$$\Pi_{16} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{16} \Delta p_{y\partial j} = 9,027 - \frac{39,84 + 41,946}{83,8} = 7,93;$$

$$\Delta p_{y\partial 17} = 167,687 \cdot (7,93 + 4,759^2 - 4,759 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot 7,93 + 4,759^2}) = 111,540 \text{ KПа};$$

$$p_{17} = 740,786 + 111,540 = 852,326 \text{ KПа}.$$

$i = 18; t_{18} = 28,44c$:

$$\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{18}{20} = 0,1; \quad \zeta_{18}^3 = 520,0;$$

$$\varphi_{18} = 1 / \sqrt{84,27 + 520,0} = 0,04068; \quad \Pi \frac{\varphi_{18}}{\varphi_0} = 9,027 \frac{0,04068}{0,10874} = 3,377;$$

$$\Pi_{17} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{17} \Delta p_{y\partial j} = 9,027 - \frac{91,786 + 111,540}{83,8} = 6,60;$$

$$\Delta p_{y\partial 21} = 167,687 \cdot (6,60 + 3,377^2 - 3,377 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot 6,60 + 3,377^2}) = 153,657 \text{ KПа};$$

$$p_{18} = 852,326 + 153,657 = 1005,983 \text{ KПа}.$$

$i = 19; t_{19} = 30,02c$:

$$\frac{h}{d_3} = 1 - \frac{19}{20} = 0,05; \quad \zeta_{19}^3 = 2200,0;$$

$$\varphi_{19} = 1 / \sqrt{84,27 + 2200,0} = 0,020923; \quad \Pi \frac{\varphi_{19}}{\varphi_0} = 9,027 \frac{0,020923}{0,10874} = 1,737;$$

$$\Pi_{18} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{18} \Delta p_{y\partial j} = 9,027 - \frac{203,326 + 153,657}{83,8} = 4,26;$$

$$\Delta p_{y\partial 19} = 167,687 \cdot (4,26 + 1,737^2 - 1,737 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot 4,26 + 1,737^2}) = 188,954 \text{ KПа};$$

$$p_{19} = 1005,983 + 188,954 = 1194,937 \text{ KПа}.$$

$i = 20; t_{20} = 31c$:

$$\frac{h}{d_3} = 0; \quad \zeta_{20}^3 = \infty; \quad \varphi_{20} = 0; \quad \Pi \frac{\varphi_{20}}{\varphi_0} = 0;$$

$$\Pi_{19} = \Pi - \frac{1}{\rho g H_0} \sum_{j=1}^{19} \Delta p_{y\partial j} = 9,027 - \frac{356,983 + 188,954}{83,8} = 2,51;$$

$$\Delta p_{y020} = 167,687 \cdot 2,51 = 420,894 \text{ КПа}; p_{20} = 1194,937 + 420,894 = 1615,831 \text{ КПа}.$$

Понижение давления в трубопроводе (ф-ла (18)):

$$\Delta p'_{y0} = 4 \cdot 83,8 \cdot 9,027^2 \left(\sqrt{1 + \frac{420,894}{2 \cdot 83,8 \cdot 9,027^2}} - 1 \right) = 417,699 \text{ КПа}.$$

Скорость обратного течения (ф-ла (19)):

$$g_{обр} = \frac{417,699}{1075} = 0,389 \text{ м/с}.$$

Статическое давление в трубопроводе (ф-ла (20)):

$$p_{cm} = 649 + 83,8 = 732,8 \text{ КПа}.$$

Так как $\Delta p' < p_{cm}$, то разрыва сплошности не будет.

Поэтому исходным данным для расчета данного трубопровода на механическую прочность является величина $p = 1615,831 \text{ КПа}$

Таблица 1 - Результаты расчета

| № | t_i, c | $\frac{h}{d_3}$ | ζ_i^3 | φ_i | $\Pi \frac{\varphi_i}{\varphi_0}$ | Π_{i-1} | $\Delta p_i,$ КПа | $p_i,$ КПа |
|----|----------|-----------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------|----------------------|---------------|
| 0 | 0 | 1 | 0,3 | - | - | - | - | 649 |
| 1 | 1,58 | 0,95 | 0,65 | - | - | - | 0,354 | 649,354 |
| .. | | | | | | | | |
| 15 | 23,7 | 0,25 | 47,0 | 0,08728 | 7,2455 | 9,023 | 39,486 | 688,84 |
| 16 | 25,28 | 0,2 | 80,0 | 0,078 | 6,475 | 8,55 | 51,946 | 740,786 |
| 17 | 26,86 | 0,15 | 220,0 | 0,05733 | 4,757 | 7,93 | 111,540 | 852,326 |
| 18 | 28,44 | 0,1 | 520,0 | 0,04068 | 3,377 | 6,60 | 153,657 | 1005,983 |
| 19 | 30,02 | 0,05 | 2200,0 | 0,02092 | 1,737 | 4,26 | 188,954 | 1194,937 |
| 20 | 31 | 0 | ∞ | 0 | 0 | 2,51 | 420,894 | 1615,831 |

Примечание. При выполнении работы предусматривается сравнение ручного подсчета и результатов, полученных при помощи программы Mathcad, воспользовавшись которой студент заполняет таблицу 2 и проводит сравнение результатов в виде графика (рис. 2).

Таблица 2 - Результаты расчета на ЭВМ

| t_i, c | $\Delta p_i,$ КПа | $p_i,$ КПа |
|----------|-------------------|------------|
|----------|-------------------|------------|

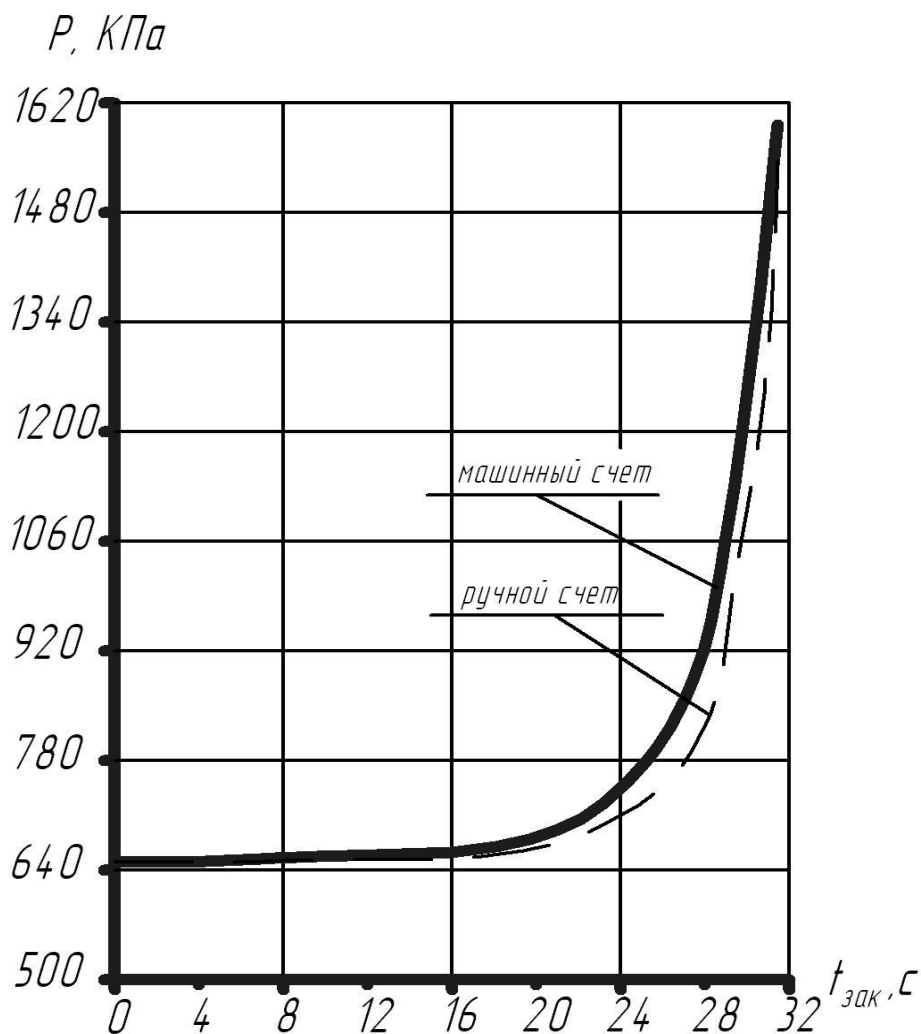


Рисунок 2 – График изменения давления перед задвижкой

Контрольные вопросы

1. Какие трубопроводы называются простыми и сложными, короткими и длинными? В чем особенности гидравлического расчета таких трубопроводов?
2. Что называется прямым и непрямым гидравлическим ударом? Что называется фазой гидравлического удара? Как она влияет на повышение давления при гидравлическом ударе?
3. Что такое скорость распространения ударной волны? От каких величин она зависит?
4. Чем гасится колебательный процесс, имеющий место при гидравлическом ударе?

5. Как можно уменьшить или предотвратить ударное повышение давления?

6. Что называется отрицательным гидравлическим ударом и когда он возникает?

Список литературных источников

1. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: - КолосС, 2007. - 656с.

2. Ловкис Э.В., Бердышев В.Е. и др. Гидравлика и гидравлические машины. М.: - Колос, 1995. - 303с.

3. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотвещения. Л.: - Стройиздат, 1986.

4. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. М.: - Стройиздат, 1984.

5. Штеренлихт Д.В. и др. Гидравлические расчеты. М.: - Колос, 1982.- 287 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 - Исходные данные к выполнению расчетно-графической работы

| № вар-та | Q_0 , л/с | p_n , КПа | Материал труб | l , м | d , мм | e , мм | $t_{зак}$, с | d_3 , мм |
|----------|-------------|-------------|---------------|---------|----------|----------|---------------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0 | 101 | 649 | сталь | 850 | 302,23 | 8 | 31 | 200 |
| 1 | 135 | 652,5 | полиэТ | 830 | 11 | 7 | 30 | 200 |
| 2 | 119 | 653 | чугун | 840 | 352,4 | 12 | 36 | 250 |
| 3 | 125 | 654 | сталь | 870 | 322 | 10 | 37 | 200 |
| 4 | 102 | 655,5 | чугун | 920 | 414 | 12 | 38 | 200 |
| 5 | 107 | 659 | ж/б | 930 | 311 | 8 | 39 | 200 |
| 6 | 135 | 658 | сталь | 940 | 352,4 | 8 | 35 | 250 |
| 7 | 105 | 657,5 | полиэТ | 950 | 337 | 7 | 34 | 200 |
| 8 | 129 | 651 | чугун | 960 | 325 | 9 | 33 | 250 |
| 9 | 115 | 660 | сталь | 970 | 322 | 8 | 32 | 250 |
| 10 | 107 | 660,5 | ж/б | 980 | 363 | 10 | 31 | 200 |
| 11 | 124 | 661 | чугун | 1000 | 386 | 10 | 34 | 250 |
| 12 | 146 | 662 | полиэТ | 800 | 235 | 7 | 35 | 200 |
| 13 | 106 | 662,5 | сталь | 810 | 260 | 8 | 36 | 200 |
| 14 | 118 | 663 | ж/б | 820 | 251 | 12 | 37 | 250 |
| 15 | 103 | 664 | полиэТ | 760 | 302,2 | 14 | 38 | 250 |
| 16 | 117 | 664,5 | сталь | 770 | 279 | 12 | 40 | 200 |
| 17 | 139 | 665 | чугун | 780 | 209 | 8 | 41 | 200 |
| 18 | 95 | 667 | полиэТ | 790 | 289 | 10 | 30 | 200 |
| 19 | 99 | 667,5 | чугун | 600 | 279 | 7 | 32 | 250 |
| 20 | 90 | 668 | сталь | 870 | 325 | 15 | 33 | 200 |
| 21 | 82 | 669 | полиэТ | 880 | 500 | 8 | 33 | 200 |
| 22 | 83 | 669,5 | полиэТ | 890 | 235 | 10 | 34 | 200 |
| 23 | 97 | 670 | ж/б | 900 | 363 | 15 | 35 | 200 |
| 24 | 93 | 671 | чугун | 910 | 302,2 | 10 | 36 | 250 |
| 25 | 95 | 671,5 | сталь | 700 | 279 | 8 | 37 | 250 |
| 26 | 98 | 672 | чугун | 710 | 200,8 | 8 | 39 | 250 |
| 27 | 89 | 673 | полиэТ | 720 | 235 | 7 | 40 | 300 |
| 28 | 88 | 674,5 | ж/б | 730 | 260 | 8 | 30 | 300 |
| 29 | 82 | 675 | сталь | 740 | 260 | 12 | 31 | 300 |
| 30 | 84 | 676 | чугун | 750 | 235 | 15 | 32 | 300 |
| 31 | 86 | 676,5 | полиэТ | 610 | 260 | 710 | 37 | 250 |
| 32 | 88 | 668 | чугун | 620 | 285 | 8 | 39 | 250 |
| 33 | 91 | 679 | сталь | 630 | 209 | 7 | 40 | 300 |

| | | | | | | | | |
|----|----|-------|--------|-----|--------|----|----|-----|
| 34 | 94 | 679,5 | полиэт | 640 | 233 | 10 | 41 | 200 |
| 35 | 96 | 680 | сталь | 650 | 200,82 | 7 | 42 | 250 |
| 36 | 81 | 681 | чугун | 660 | 51 | 8 | 43 | 250 |

Продолжение Таблицы А.1

| | | | | | | | | |
|----|----|-------|--------|-----|-------|----|----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 37 | 79 | 682 | сталь | 685 | 285 | 7 | 41 | 200 |
| 38 | 75 | 683 | полиэт | 670 | 235 | 12 | 42 | 250 |
| 39 | 76 | 684,5 | чугун | 695 | 209 | 8 | 40 | 200 |
| 40 | 77 | 685 | сталь | 545 | 260 | 7 | 35 | 200 |
| 41 | 78 | 686 | полиэт | 532 | 235 | 8 | 36 | 250 |
| 42 | 80 | 687 | чугун | 515 | 200,8 | 10 | 38 | 200 |

Таблица А.2 - Характеристики жидкости и материала труб

| Жидкость или материал труб | Плотность жидкости ρ , кг/м ³ | Модуль упругости жидкости $E_{ж}$ или материала стенок E труб, Па·10 ⁶ | Отношение модулей упругости жидкостей и материала труб $E_{ж}/E$ | | | |
|----------------------------|---|---|--|-------|---------|----------------|
| | | | Вода | Нефть | Керосин | Масло индустр. |
| Вода | 1000 | 2,03 | 1 | - | - | - |
| Нефть | 900 | 1,324 | - | 1 | - | - |
| Керосин | 800 | 1,37 | - | - | 1 | - |
| Масло индустр. | 880 | 1,56 | - | - | - | 1 |
| Ж/бетон. трубы | - | 19,62 | 0,103 | 0,067 | 0,070 | 0,080 |
| Полиэтил. трубы | - | 1,45 | 1,40 | 0,913 | 0,945 | 1,076 |
| Чугунные трубы | - | 98,1 | 0,021 | 0,014 | 0,014 | 0,016 |
| Стальные трубы | - | 196 | 0,011 | 0,007 | 0,007 | 0,008 |

**Таблица А.3 - Значения коэффициента гидравлического сопротивления
задвижки**

| h / d_3 | ζ^3 | | |
|-----------|-----------------|------------------|-----------------|
| | $d / d_3 = 1,0$ | $d / d_3 = 1,25$ | $d / d_3 = 1,5$ |
| 1,000 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| 0,900 | 0,2 | 0,4 | 1,0 |
| 0,800 | 0,5 | 0,7 | 1,6 |
| 0,700 | 0,8 | 1,0 | 2,8 |
| 0,600 | 1,3 | 1,6 | 4,5 |
| 0,500 | 2,5 | 3,0 | 8,0 |
| 0,450 | 3,7 | 4,3 | 11,0 |
| 0,400 | 5,0 | 6,1 | 15,0 |
| 0,350 | 7,1 | 9,0 | 21,0 |
| 0,300 | 11,5 | 14,0 | 30,0 |
| 0,250 | 19,5 | 23,0 | 47,0 |
| 0,200 | 35,0 | 41,0 | 80,0 |
| 0,180 | 47,0 | 57,0 | 110 |
| 0,160 | 66,0 | 75,0 | 160 |
| 0,140 | 95,0 | 98,0 | 280 |
| 0,120 | 140 | 140 | 340 |
| 0,100 | 210 | 280 | 520 |
| 0,090 | 260 | 300 | 670 |
| 0,080 | 310 | 380 | 850 |
| 0,070 | 380 | 490 | 1100 |
| 0,060 | 500 | 700 | 1500 |
| 0,050 | 680 | 1030 | 2200 |
| 0,045 | 800 | 1250 | 2700 |
| 0,040 | 960 | 1650 | 3500 |
| 0,035 | 1200 | 2300 | 4700 |
| 0,030 | 1500 | 3100 | 6500 |
| 0,025 | 2200 | 4800 | 10000 |
| 0,020 | 3200 | 8000 | 16000 |
| 0,018 | 3700 | 10000 | 21000 |
| 0,016 | 4500 | 12500 | 27000 |
| 0,014 | 5800 | 17000 | 35000 |
| 0,012 | 7500 | 24000 | 45000 |
| 0,010 | 11000 | 38000 | 70000 |

Таблица А.4 - Варианты жидкости для различных направлений

| Направление подготовки | Вариант жидкости |
|--|------------------|
| 110800.62 – «Агроинженерия» | Керосин |
| 260800.62 – «Технологии продукции и организация общественного питания» | Вода |