

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РАСЧЁТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Нишонов Ф.Х.

В момент внезапного и полного закрытия задвижки в конце трубопровода вся движущаяся в нем жидкость должна остановиться. Но реальная жидкость, будучи упругой, будет останавливаться не мгновенно, а постепенно сжимаясь от слоя к слою (начиная от слоя у задвижки). При этом одновременно будет повышаться давление на некоторое значение Δp (ударное давление). Упругая деформация сжатия и повышение

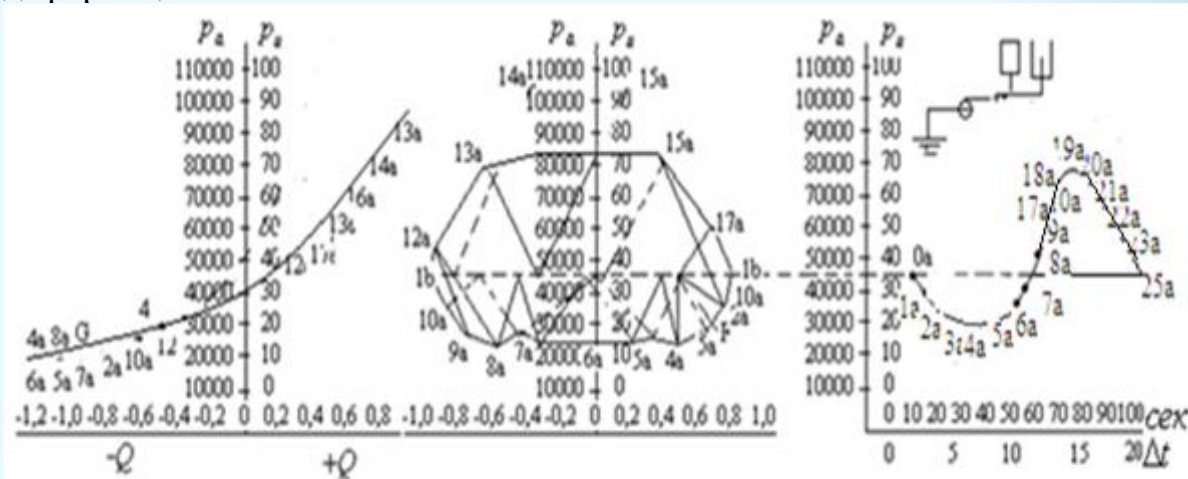


Рис.1.Графическое определение колебания давления в гидравлическом колпаке

давления распространяются вверх по течению и за время T достигают конца

трубы. При этом освободившееся пространство на расстоянии Δl заполняется жидкостью из резервуара.

Рассмотрим процесс гидравлического удара при учете потерь напора на трение воды в трубах; с учетом гидравлического трения. Дифференциальные уравнения неустановившегося движения имеют вид

$$z = \frac{L}{g} \frac{dQ}{dt} \pm \alpha Q^2 \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \omega Q. \quad (2)$$

Первое из них - уравнение движения, а второе - уравнение неразрывности массы воды; оба уравнения соответствуют пограничному сечению между трубопроводом воздушным колпаком. В уравнении (2) знак при αQ^2 (этот член обозначает гидравлические сопротивления) выбирается в зависимости от направления течения, знак + (плюс) соответствует движению воды в направлении от насоса к башне, а (минус) обратному её движению. Здесь: p_a - абсолютное давление в кг/м^2 . p_u - избыточное давление в кг/м^2

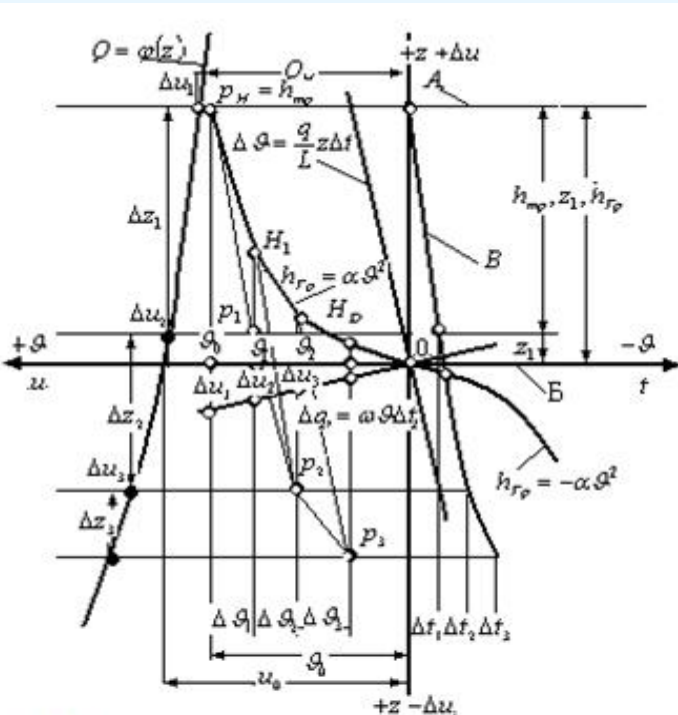


Рис.2. Графическое построение действий демпфирующих приспособлений. А - линия абсолютного напора при установившемся режиме; Б - абсолютный статический режим; В - напоры в воздушном колпаке.

Эта -система уравнений может быть решена приближённым методом, методом конечных разностей.

$$\Delta Q = -\frac{g}{L} (\pm \alpha Q^2 - z) \Delta t \quad (3)$$

$$\Delta Q = \omega Q \Delta t \quad (4)$$

К ним необходимо присоединить характеристическое уравнение воздушного колпака, получаемое из формулы (4):

$$Q = Q_0 (h_0 + 10)^{\frac{1}{n}} (h_0 + 10 + z)^{\frac{1}{n}} = Q_0 p_0^{\frac{1}{n}} (p_0 + z)^{\frac{1}{n}} = Q_n p_n^{\frac{1}{n}} (p_n + z)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

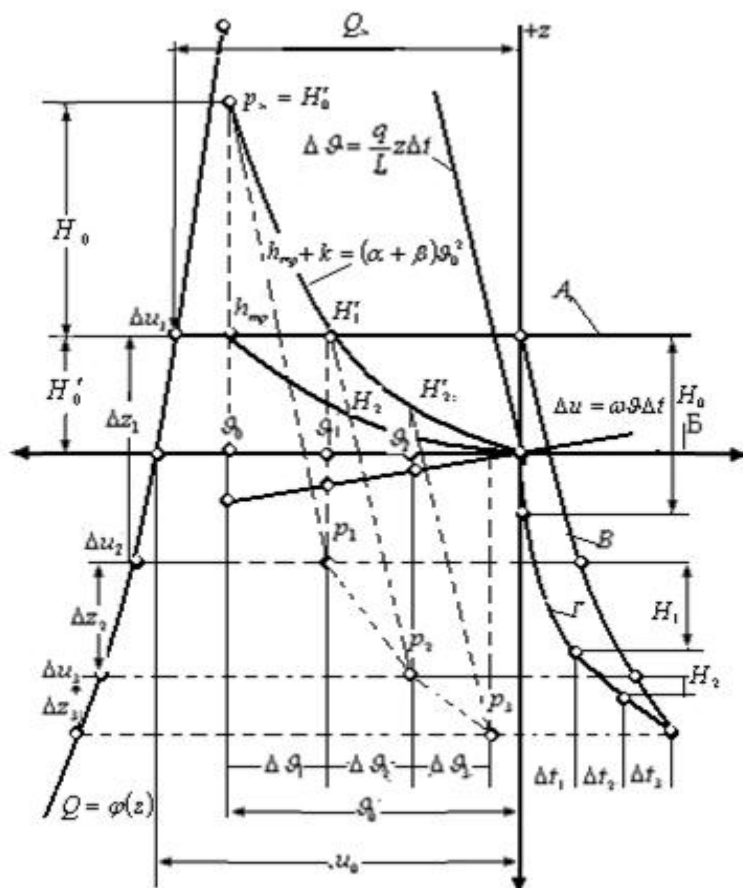


Рис.3. Графическое решение. А - линия абсолютного напора при установившемся режиме; Б - абсолютный статический режим, В - напоры в воздушном колпаке; Г - напоры в трубопроводе

тем с рис.1. но, на оси абсцисс, представляющей одновременно статический горизонт, влево от нуля откладываем положительные скорости $+ \mathcal{Q}$ и одновременно - по этой оси считаем объёмы воздуха в колпаке Q , вправо от нуля по оси абсцисс считаем отрицательные скорости и промежутки времени (интервалы) Δt . По оси ординат вверх - повышения давления $+ Z$ и соответствующие уменьшения объёма воздуха $-\Delta Q$, по оси ординат вниз - понижения давления $- Z$ и соответствующие увеличения объёма воздуха $+\Delta Q$

На эту координатную сетку наносим кривую потерь на гидравлическое трение $h_{mp} = \alpha \mathcal{Q}^2$ и кривую

$Q = \varphi(z)$ по уравнению (5). Выбрав подходящие значения Δt , проводим две прямые.[5]

$$\Delta \mathcal{Q} = \frac{g}{L} z \Delta t \quad \text{и} \quad \Delta Q = \mathcal{Q} \omega \Delta t$$

Условия процесса при установившемся режиме, когда $\mathcal{Q} = \mathcal{Q}_0$ характеризуются точкой $p_n = h_{mp}$. Расстояние от оси ординат до кривой $Q = \varphi(z)$ по горизонтали на высоте $h_0 + 10 + h_{mp}$ даёт начальный объём воздуха Q_n . В течение первого интервала, Δt_1 непосредственно следующего за остановкой агрегата, из воздушного колпака вытекает в трубопровод объём воды

$$\Delta Q_1 = \omega \mathcal{Q}_0 \Delta t_1$$

согласно уравнению (4), вследствие чего объём воздуха увеличивается до

$$Q_1 = Q_n + \Delta Q_1$$

Этот объём откладывается по оси абсцисс влево, и из полученного деления проводится вертикаль до пересечения с кривой $Q = \varphi(z)$. Таким образом получаются и давление $h_1 = h_0 + 10 + h_{mp} - \Delta z_1$ и объём воздуха в колпаке $Q_1 = Q_H + \Delta Q_1$ по истечении первого интервала Δt_1 с момента остановки насоса. Уменьшение скорости за тот же интервал

Δt_1 определится по уравнению(18), если из точки p_H провести параллель к прямой $\Delta \vartheta = \frac{g}{L} z \Delta t_1$ до

пересечения в точке p_1 с горизонталью, соответствующей новому напору $h_1 = h_0 + 10 + h_{mp} - \Delta z_1$, опустив из точки p_1 перпендикуляр на ось абсцисс, получим

значение ϑ_1 , а также точку H_1 на кривой $h_{mp} = \alpha \vartheta^2$. Для второго интервала времени Δt_2 построение совершается точно таким же образом, в результате чего получается $\Delta Q_2 = \omega \vartheta_1 \Delta t_2$ — увеличение воздуха в колпаке и Δz_2 — соответствующее уменьшение напора. Прямая, параллельная $\Delta \vartheta = \frac{g}{L} z \Delta t$ и определяющая $\Delta \vartheta_2$, проводится через точку H_1 до пересечения с горизонталью, соответствующей новому напору $h_2 = h_0 + 10 + h_{mp} - \Delta z_1 - \Delta z_2$, в точке p_2 . Подобным же образом надо поступать и для всех последующих интервалов Δt_i , причём в случае обратного движения воды надлежит пользоваться параболой $h_{mp} = -\alpha \vartheta^2$. Кривая, нанесённая на рис.8. пунктиром, начинается в точке p_H и проходит через точки p_1, p_2, p_3 и т. д.; она изображает в плоскости ϑ, z зависимость между скоростью в трубопроводе и изменением давления в соответствии с уравнением (5).

Приведённое графическое построение применимо также и к установкам, снабжённым демпфирующими приспособлениями (приспособления, тормозящие вход и выход воды из колпака в трубопровод). Наиболее простым демпфирующим приспособлением будет соединение объёма воздушно-гидравлического колпака с трубопроводом через узкую трубочку, которая в этом случае, является источником местных сопротивлений, определяемых по формуле

$$k = \beta \vartheta^2$$

Общие сопротивления в трубопроводе в этом случае определяются по формуле

$$h_{mp} + k = (\alpha + \beta) \vartheta^2$$

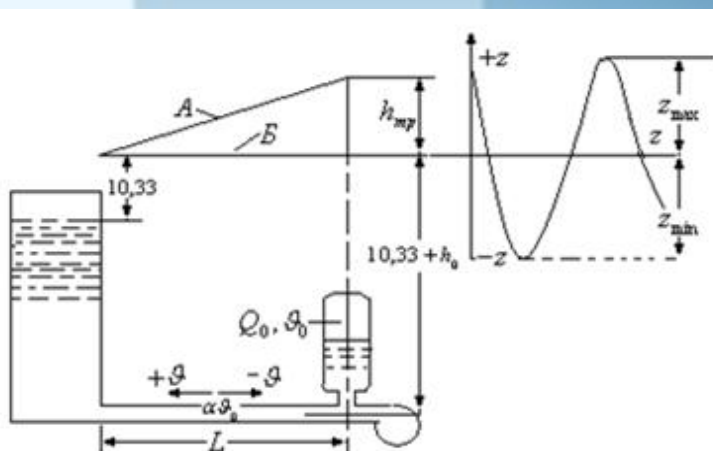


Рис.4.Изменение давления в магистрали непосредственно у воздушного колпака. А — линия абсолютного напора при установившемся режиме; Б — абсолютный статический режим.

Построение в рассматриваемом случае будет аналогично предыдущему, если не считать некоторых изменений, необходимых для учёта влияния различных начальных условий, как это показано на рис.9. Здесь принята та же самая-система координат, что и на рис.8., с нанесением на неё кривых $Q = \varphi(z)$, парабол

$$h_{mp} = \alpha \vartheta^2 \text{ и } h_{mp} + k = (\alpha + \beta) \vartheta^2,$$

а также прямых ΔQ и $\Delta \vartheta$. Условия установившегося режима представлены в данном случае точкой h_{mp} поскольку сопротивления между воздушным колпаком и трубопроводом в этот период не существует. В момент внезапного перерыва в подаче тока и в течение первого интервала, в условиях неустановившегося движения, из воздушного колпака вытекает объём воды $\Delta Q_1 = \omega \vartheta_0 \Delta t$; при этом должно быть преодолено сопротивление за счёт потери

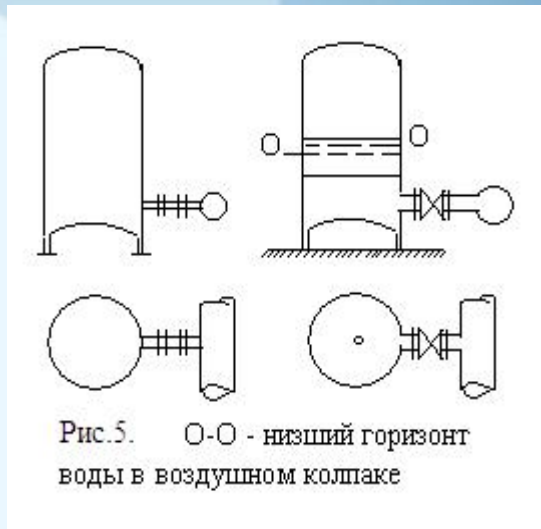
напора $k_0 = \beta \vartheta_0^2$. Поэтому напор в трубопроводе должен мгновенно упасть с $h_0 + 10 + h_{mp}$ до $h_0 + 10 + h_{mp} - k_0$, тогда как в колпаке он держится начальной величины. По истечении времени Δt_1 напор в колпаке падает до $h_0 + 10 + h_{mp} - \Delta z_1$; уменьшение же скорости в трубопроводе за этот промежуток времени Δt_1 определится уравнения

$$\Delta \vartheta = -\frac{g}{L} [\pm (\alpha + \beta) \vartheta^2 - z] \Delta t$$

заменяющего в данном случае уравнение (3).

Этот мгновенный скачок напора является необходимым следствием той теоретической схемы, на которой основаны расчёты. В действительности в трубопроводе возникают явления упругости, которыми, впрочем, можно пренебречь, если потери напора происходят достаточно быстро. Соответствие между допущенным упрощением и фактическим ходом явления обсуждалось и было признано Каламом и Гаденом.[3]

Графическим путём это уменьшение скорости получается, если из точки p_n проведём параллель прямой $\Delta \vartheta$ до встречи в точке p_1 с горизонталью, соответствующей напору в воздушной камере $h_0 + 10 + h_{mp} - \Delta z_1$; уменьшение скорости выразится отрезком $\Delta \vartheta$, а отрезок $O\vartheta$ представит уменьшенную скорость в трубопроводе. Далее построение совершается так же, как в предыдущем случае, с использованием параболы $(\alpha + \beta) \vartheta^2$. Скачок давления между воздушной камерой и трубопроводом измеряете всякий раз отрезками $k_0 - h_{mp} = k_0$ $k_1 - H_1 = k_1$ $k_2 - H_2 = k_2$ и т. д.



Таким образом, можно нанести обе кривые, характеризующие изучаемое явление кривую напоров в воздушном колпаке и соответствующую кривую напоров в трубопроводе; (приведены на первой стороне рис.3.)

Возникает мысль о введении демпфирующего сопротивления, которое не оказывает влияния на условия установившегося режима, но проявляется при неустановившемся режиме; Спарр¹ предлагал его применить для подводных трубопроводов электростанций с целью уменьшения размера воздушных камер приблизительно наполовину. Эта идея не встретила, однако, большого отклика вследствие неудобств, связанных с непостоянством регулировки, а также по той причине, что размеры камеры даже и по сокращению вдвое оставались всё же чрезмерно большими. Между тем в водоподъёмных установках неудобств, связанных с регулированием, не существует, и влияние на величину повышения давления сказывается значительно более чувствительно.

Изложенные выше графические методы служат для контрольной проверки устройств, размеры которых уже назначены; при проектировании же они годны для предварительных намёток путём последующих проверок. Для возможности общего представления решить задачу в безразмерных параметрах.

Для наиболее общего случая, когда имеется демпфирующее сопротивление, уравнения неустановившегося движения, имеют вид:

$$z = \frac{L}{g} \frac{d\vartheta}{dt} \pm (\alpha + \beta)\vartheta^2 \quad (6)$$

Используя формулы (2) ,(5). В безмерных величинах они приобретают другой вид. Так как

$$(\alpha + \beta)\vartheta^2 = (h_{mp} + k_0) \frac{\vartheta^2}{\vartheta_0^2} = (h_{mp} + k_0),$$

разделив уравнение (6) на $h_0 + 10$, получим

$$\bar{z} = \frac{L}{g} \frac{\vartheta_0}{[h_0 + 10]} \frac{d\bar{\vartheta}}{dt} \pm (h_{mp} + k_0)\bar{\vartheta}^2$$

или, учитывая принятое ранее обозначение

$$\sigma = \frac{\omega L}{(h_0 + 10)Q_0} \frac{\vartheta_0^2}{2g}$$

получим

$$\bar{z} = 2\sigma \frac{Q_0}{\omega \vartheta_0} \frac{d\bar{\vartheta}}{dt} \pm (h_{mp} + k_0)\bar{\vartheta}^2$$

Аналогичным образом из уравнения (2) будем иметь

$$\frac{d}{dt} \frac{Q}{Q_0} = \frac{\omega}{Q_0} \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \vartheta_0 \quad (7)$$

или

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \frac{\omega \bar{g}_0}{Q_0} \bar{g}$$

(8)

Наконец, при помощи последнего преобразования переменных из уравнений (7) и (8) может быть исключён множитель $\frac{Q_0}{\omega \bar{g}_0}$; имеющий размерность в

секундах. Положим далее $t = \frac{t}{T}$ и, следовательно, $dt = T d\bar{t}$, где T

определяется по формуле, где кривая колебаний давлений изобразится синусоидой, а длительность периода колебания при изотермическом изменении объёма воздуха определится по формуле при расширении по политропе;

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Q_0 L}{gn\omega(h_0 + 10)}}$$

и означает период колебаний давления в колпаке без учёта гидравлического трения, при учете гидравлического трения можно представить в виде

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2\sigma}{n} \frac{Q_0}{\omega \bar{g}_0}} \quad (9)$$

Тогда уравнения (7) и (8) могут быть преобразованы до вида

$$\bar{z} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2n\sigma} \frac{d\bar{g}}{d\bar{t}} \pm (\bar{h}_{mp} + \bar{k}_0) \bar{g}^2 \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{Q}}{d\bar{t}} = 2\pi \sqrt{\frac{2\sigma}{n}} \bar{g} \quad (11)$$

и уравнение (5) соответственно уравнению изменение давления в магистрали непосредственно у воздушного колпака, измеренное в метрах водяного столба от абсолютного статического уровня $h_0 + 10$, т. е, $\frac{p_0}{\gamma}$ (рис.4.).

В относительных мерах последняя формула будет иметь вид:

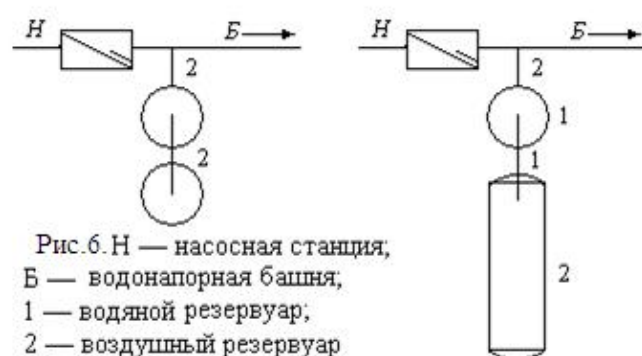
$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{1}{1 + \frac{z}{h_0 + 10}} = \frac{1}{(1 + \bar{z})^{\frac{1}{n}}} \quad (11a)$$

Переходя по предыдущему от дифференциалов к конечным разностям, получаем уравнения (10), (11) и (11a) в виде, удобном для графического решения, а именно:

$$\Delta \bar{g} = -\frac{1}{2\pi} [(\bar{h}_{mp} + \bar{k}_0) \bar{g}^2 - \bar{z}] 2\pi \Delta \bar{t} \quad (12)$$

$$\Delta Q = 2\pi \sqrt{\frac{2\sigma}{n}} \bar{g} 2\pi \Delta \bar{t} \quad (13)$$

Если демпфирующего сопротивления нет, то $\bar{k}_0 = 0$. При введении демпфирующего сопротивления величина его по



существованию определяется величиной $z_{\min}$. Если демпфирующее сопротивление $\bar{k}_0 < z_{\min}$, то оно не будет регулировать падение давления от $\bar{k}_0$ до $z_{\min}$, а если оно будет больше $z_{\min}$ то может вызвать падение давления против статистического на величину, большую $z_{\min}$. Поэтому обычно принимают

$$k_0 = h_{mp} + |z_{\min}| \quad (14)$$

При насосах с малой инерцией такой выбор k_0 даёт постоянное падение давления $z_{\min}$ (или близкое к нему) в течение первого интервала $\Delta t_1 = \frac{L}{a}$ после остановки насоса.

Введение демпфирующего сопротивления одновременно оказывает пользу при обратном движении воды от водонапорной башни по направлению к насосам; не допуская высоких давлений в колпаке. Демпфирующее сопротивление вводится или в виде узкого соединения колпака с трубопроводом или в виде диафрагмы в нижней, всегда занятой водой части колпака (рис.5). При больших размерах воздушно-гидравлического колпака он может превращаться в пневматическую установку из двух резервуаров (рис.6). Необходимо отметить, что определение потерь напора h_{mp} в трубопроводе отличается некоторой неопределённостью, так как стенки труб со временем покрываются инкрустациями; поэтому во избежание увлечения падения давления рекомендуется некоторое уменьшение h_{mp} не превышающим его величину. По тем же самым соображениям расчёт сопротивления, вызывающего потерю k_0 , необходимо провести с возможной тщательностью, ибо как превышенные, так и заниженные результаты приводят к неудобствам. Необходимо, следовательно, учитывать все возможные потери напора (при втекании, вытекании, резких изменениях направления и т. п.), имеющие место в отдельных случаях, пользуясь при выборе формул и коэффициентов сопротивления результатами последних экспериментальных работ.

Если $k_0 = 0$ или определяется по формуле (14), то в системе уравнений (12), (13) и (11a) остаётся только два основных параметра: это ранее определённая характеристика σ и новая константа h_{mp} , определяющая величину потерь напора в трубопроводе при установившемся движении. Это обстоятельство даёт возможность, пользуясь изложенными выше приёмами, составить номограммы для определения величин $\bar{z}_{\min}$ и $\bar{z}_{\max}$ в функции σ и h_{mp} . Такие номограммы разработаны Д. Еванджелисти и представлены на рис.6. На этих номограммах по осям ординат нанесены значения

$$\bar{z}_{\max} = \frac{z_{\max}}{h_0 + 10} \text{ и } \bar{z}_{\min} = \frac{z_{\min}}{h_0 + 10} \text{ а по осям абсцисс значения } \bar{h}_{mp} = \frac{h_{mp}}{h_0 + 10}$$

Использованная литература

1. Васькевич Ф.А. Использование частотного метода для организации процесса топливоподачи. -В кн. «Судовые силовые установки», №10 Л., «Транспорт», 1973, с 53-67
2. Могендович Е.М. «Гидравлические импульсные системы» Ленинград «Машиностроение», 1977.
3. Нишонов Ф.Х., Худайкулов С.И., Моделирование ударного импульса жидкости в трубопроводе. Ташкент., Проблемы механика 2015 26-30 с
4. Хамидов., С.И., Худайкулов, И.Э. Махмудов «Гидромеханика» ФАН-2008г. 340с.

Нишонов Ф.Х. «Теоретические схемы расчёта гидравлического удара в строительных комплексах» В статье рассматривается процесс гидравлического удара при учете потерь напора на трение воды в трубах; с учетом гидравлического трения. Исследуется мгновенный скачок напора, который является необходимым следствием схемы, на которой основаны расчёты. Введение демпфирующего сопротивления одновременно оказывает пользу при обратном движении воды от водонапорной башни по направлению к устройству гидравлического удара. Изложенные графические методы служат для контрольной проверки устройств, размеры которых уже назначены