ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XI, № 6, 1958 Серия технических наук

ГИДРАВЛИКА

С. М. ИСААКЯН

# ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ НИЗКОНАПОРНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

§ 1. Наиболее тяжелые условия работы нагнетательного трубопровода низконапорных насосных установок создаются при внезапной остановке насоса вследствие аварийных выключений энергии. При внезапном выключении мотора единственной энергией, продолжающей действовать в направлении движения воды вверх по трубопроводу, остается кинетическая энергия воды и маховых масс насоса и мотора.

Под влиянием потенциальной энергии и сил трения воды эта энергия быстро уменьшается, происходит понижение числа оборотов насоса. При этом падает также расход в нагнетательной трубе и, в первую очередь, в примыкающей к насосу части. В результате быстрого уменьшения расхода в нагнетательной трубе образуется волна понижения давления гидравлического удара, которая распространяется до приёмного бассейна и, отражаясь от его свободной поверхности с обратным знаком, возвращается к запорному органу ввиду волны повышенного давления.

Когда число оборотов насоса падает до такого значения, что насос не в состоянии бывает преодолевать статический напор, вода сначала останавливается, а затем меняет направление движения вниз и выливается через насос. Насос начинает вращаться в обратную сторону (как турбина); это приводит к опорожнению нагнетательного трубопровода и приемного бассейна (если есть такой), что крайне нежелательно. По условиям совместной работы электромотора и насоса нежелательно также обратное вращение насоса, а для некоторых видов двигателей — и недопустимо.

Во избежание указанных последствий выключения энергии, на нагнетательной линии у насоса обычно ставится обратный клапан быстрого или медленного действия. Обратный клапан закрывается в результате прекращения подачи воды насосом и понижения давления за ним. Вернувшаяся от приемного бассейна положительная волна давления отражается от клапана без изменения знака, вследствие чего амплитуда ее удваивается. В результате создается затухающее колебание относительно статического напора.

Если пониженное давление у обратного клапана достигает давления водяных паров, что случается при низких напорах, начинается

пароотделение, а затем отрыв столба жидкости от обратного клапана. Образовавшаяся волна пониженного давления гидравлического удара распространяется вверх по трубопроводу и отражается от приемного бассейна с обратным знаком, сохраняясь в величине. При этом столб жидкости продолжает отходить от обратного клапана, и после закрытия вернувшаяся сверху положительная волна отражается с границы разрыва сплошности, как от свободной поверхности, снова изменив свой знак и примерно сохранившись в величине (плотности этих двух сред отличаются до 1000 раз, поэтому можно считать отражение полным).

Такое движение волны между двумя концами трубы продолжается до тех пор, пока отошедший от обратного клапана столб жидкости возвращается и заполняет полость разрежения. При этом, в момент замыкания этой полости, спускающийся столб жидкости встречается с закрытым клапаном, и кинетическая энергия этого столба внезапно превращается в потенциальную, т. е. в положительное давление. Величина этого давления зависит от величины скорости, развитой жидкостью при заполнении полости разрежения.

Движение границы разрыва сплошности вверх в общем замедленное, движение вниз ускоренное. В отличие от обыкновенных графиков давления гидравлического удара при низких статических давлениях $\left(h_{ст} < \frac{av_0}{g}\right)$ минимальное значение давления гидравлического удара бывает ниже атмосферного и длится больше одной фазы, а последующее повышение давления больше предыдущей ординаты понижения давления (относительно статического) и длится одну фазу.

Такой механизм явления при низких напорах выявлен Н. Е. Жуковским [1], А. Ф. Мостовским [2], Д. Н. Смирновым [3] и др., исследования которых являются логическими и хронологическими продолжениями работ друг друга.

На рис. 1 приведен график давления опыта № 12, табл. 3 настоящей статьи, полученный в ГЭЛ ВЭНИ автором, что является хорошей иллюстрацией вышеописанного.

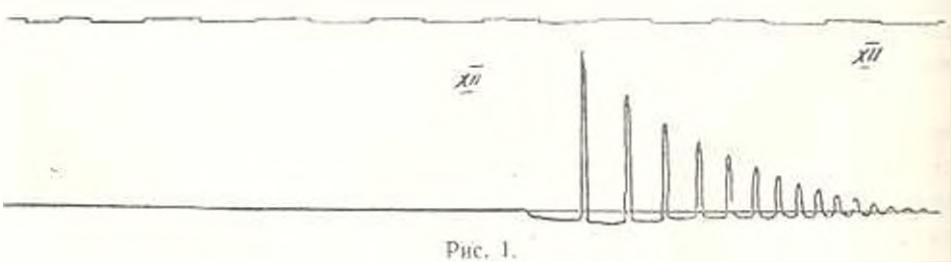


Рис. 1.

§ 2. Интересующая нас максимальная величина повышения давления в нагнетательном трубопроводе низконапорной насосной установки может быть получена только с учетом вышеописанного механизма явления, что вполне логично.

С такой точки зрения можно сразу заметить, что пользование формулой Н. Е. Жуковского $\Delta H_{max} = \frac{a v_0}{g}$ здесь незаконно, так как она получена при условии сохранения неразрывности жидкости, нарушение которой является характерной чертой рассматриваемого случая.

Что касается утверждения В. М. Папина [5] о том, что при низких напорах в насосных установках максимальное давление гидравлического удара можно считать равным удвоенной величине статического напора плюс 10 метров разрежения, то надо заметить, что это представляет сугубо частный случай, когда $av_0/g = h_{ст} - 10$ *м*.

Учитывая работы А. Ф. Мостовского, Д. Н. Смирнова и др., замечаем, что наиболее полное описание этого явления получилось в решении Бержерона [1]. Последний проинтегрировал уравнение гидравлического удара графоаналитическим методом, с учетом разрыва сплошности жидкости и гидравлических потерь, которые вошли в его решение как граничные условия. Разрыв сплошности характеризован давлением, равным абсолютному нулю; гидравлические потери определены коэффициентами потерь, имеющимися при установившемся движении. Длина полости разрежения пренебрежена по сравнению с длиной трубопровода.

По приведенным Бержероном примерам видно, что максимальное давление гидравлического удара может меняться от нуля до величин, в несколько сот раз больших статического давления, что зависит от скорости установившегося движения, статического напора установки и характеристики трубопровода.

Учитывая данные литературы о незавершенности решения задачи гидравлического удара Мостовским в низконапорных насосных установках и то, что расчетные данные Д. Н. Смирнова сильно расходятся с его же экспериментальными данными [3], попытаемся на тех же экспериментах Смирнова проверить расчет по методу Бержерона.

Для краткости изложения поместим все эти данные в табл. 1. Пример расчета опыта № 4, табл. 1, показан на рис. 2.

*Таблица 1*

| № опыта | Статич. напор $h_0$ *м* | Рабочий напор $h_р$ *м* | Скорость | | Максимальное давление | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | уст. дв. $v_0$ *м/сек* | распространение волны $a$ *м/сек* | по опыту $h_{max}$ *м* | по Смирнову [3] *м* | по Бержерону [4] *м* | по Жуковскому [1] *м* |
| 1 | 28.0 | 53.4 | 0.92 | 950 | 95.0 | 63.4 | 100.0 | 89.0 |
| 2 | 28.0 | 44.0 | 0.72 | 1050 | 95.0 | 60.5 | 97.2 | 77.0 |
| 3 | 28.0 | 64.0 | 1.11 | 760 | 107.0 | 57.0 | 104.0 | 71.5 |
| 4 | 28.0 | 53.3 | 1.2 | 727 | 93.0 | 71.5 | 95.0 | 117.0 |
| 5 | 28.0 | 52.75 | 1.2 | 707 | 93.0 | 89.1 | 89.5 | 114.5 |
| 6 | 28.0 | 52.0 | 1.12 | 600 | 110.0 | 75.0 | 95.2 | 95.6 |
| 7 | 28.0 | 55.0 | 1.07 | 595 | 100.0 | 76.0 | 97.2 | 92.8 |
| 8 | 16.0 | 50.7 | 1.36 | 600 | 50.0 | 62.0 | 69.5 | 111.0 |

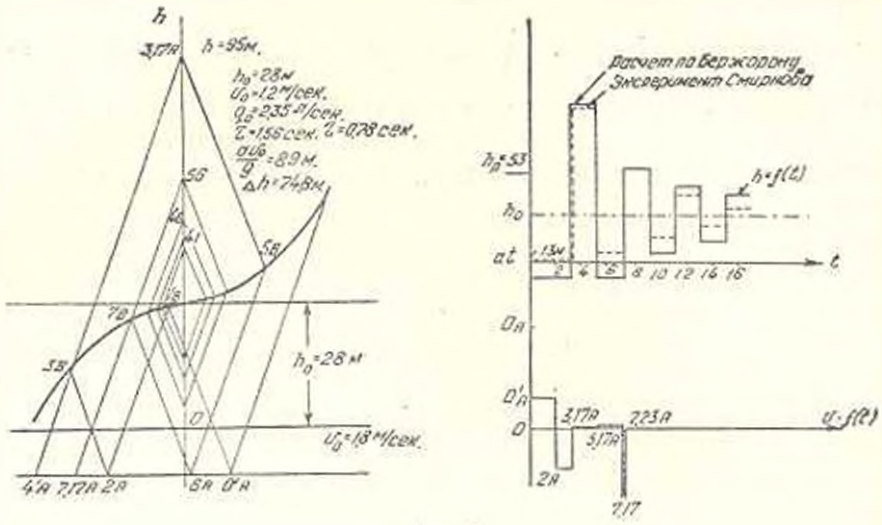


Рис. 2.

Сопоставляя цифры последних трех граф с предыдущим экспериментом, видим, что расчет по формуле Д. Н. Смирнова всегда дает заниженные значения $h_{max}$. Расчет по Жуковскому дает отклонения в одну и в другую сторону. Расчет по Бержерону наилучшим образом совпадает с экспериментальными данными.

Для проверки элементов расчета по Бержерону, теоретические значения скорости движения границы разрыва сплошности вверх и вниз были сопоставлены с экспериментальными данными Д. Н. Смирнова (см. опыты № 1, 2, 3 табл. 1).

На рис. 3 приведены зависимости $S = f(t)$ и $h = f(t)$, заимствованные из [3], а третий с разрешения автора публикуется впервые из

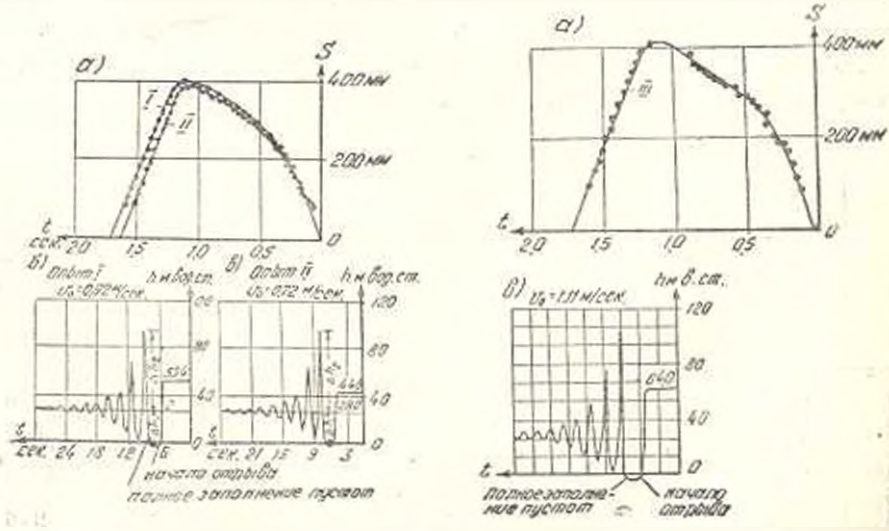


Рис. 3.

его же научного отчета, любезно предоставленного нам на пользование. По расчету скорость движения границы разрыва сплошности вверх $v_1 = 0{,}07$ *м/сек*, вниз $v_2 = 0{,}91$ *м/сек*. Эти же величины при втором разрежении: $v_1 = 0{,}23$ *м/сек*., $v_2 = 0{,}79$ *м/сек*.

По опытам № 1 и 2: $v_1 = 0{,}23$ *м/сек*, $v_2 = 0{,}79$ *м/сек*.

По опыту № 3: $v_0 = 1{,}11$ *м/сек*, $v_1 = 0{,}228$ *м/сек*, $v_2 = 0{,}75$ *м/сек*.

По данным Бержерона для этого опыта: $v_1 = 016$ *м/сек*, $v_2 = 0{,}79$ *м/сек*.

Как видим, и здесь имеется достаточно хорошее подтверждение расчета по Бержерону экспериментами Смирнова, тогда как расчет по Смирнову сильно расходится с его же экспериментами [3].

Анализ вывода расчетных формул Д. Н. Смирнова показывает, что расхождение с экспериментами является следствием предположения о постоянстве скорости движения, оторвавшейся от клапана колонны воды вверх и вниз. Такое предположение противоречит полученным Смирновым экспериментальным данным. Оно более наглядно вырисовывается при знакомстве с методом Бержерона решения задач с учетом разрыва сплошности.

Исходя из графика Бержерона, легко заметить, что предположение Смирнова о скорости отхода колонны воды от клапана:

$$v_1 = v_0 - \frac{g}{a}(h_p + h_a)$$

означает, что рабочий напор установки порядка двух раз меньше давления прямого удара $\frac{av_0}{g}$. Поэтому расхождение между расчетом и экспериментами тем больше, чем больше отношение указанных величин $\frac{2v_0}{g}/(h_p + 10)$.

Рассмотрев пример расчета по Бержерону, приведенный на рис. 2, видим, что гашение гидравлического удара на опыте происходит быстрее, чем по расчету. Это означает, что потери напора, рассчитанные по законам стационарного движения, меньше, чем таковые при нестационарном режиме. Такой вывод делается не впервые, но так как пока нет более рационального подхода к этому вопросу, то еще раз подчеркиваем неудовлетворенность существующего способа его расчета.

Кстати, этот пробел не особенно отражается на величину максимального давления, так как он получается в первый период нестационарного движения. Расхождение же усиливается со временем, так как ошибка расчета накладывается от фазы к фазе.

Таким образом, по методу Бержерона достаточно рассчитывается время и скорость образования полости разрежения, а также максимальное давление гидравлического удара в низконапорных насосных установках.

Учитывая работу Л. А. Эпштейна [6], замечаем, что условие $h=10$ *м* вакуума для кавитации не всегда законно. Давление кавитации Эпштейн получал $h=2$—$8$ *м*, и оно не устойчиво при остальных одинаковых условиях. Следовательно, условие $h=10$ *м* вакуума, принятое Бержероном за граничное условие при кавитации, должно внести некоторую ошибку в результаты расчетов, что будет сказываться тем больше, чем меньше статическое давление установки. С такой точки зрения необходимо установление нижнего предела напоров, при которых применение метода Бержерона допустимо.

§ 3. Опыты автора статьи, произведенные в лаборатории Водноэнергетического института АН Армянской ССР, ставились при очень малых статических напорах: $h_0=1$—$2$ *см* и $h_0=0{,}5$—$0{,}7$ *м* на экспериментальной установке, состоящей из двухдюймового трубопровода длиной 26 *м*, выходящей под уровень.

Прямой гидравлический удар в нагнетательном трубопроводе насосной установки с обратным клапаном (после насоса) здесь, как и в опытах Д. Н. Смирнова, воспроизводился быстрым закрытием пробкового крана, заменяющего обратный клапан. Понятно, что такая замена ухудшает условия гидравлического удара, исключая действие инерционных масс при выключении энергии мотора, однако, при значительной длине трубопровода качество явления (разрыв сплошности воды) сохраняется и при такой схеме [3].

Давление записывалось у пробкового крана с помощью майгака с пружинами разных сопротивлений. Расход измерялся треугольным водосливом, размещенным в конце трубопровода в сбросном баке. Разные режимы создавались путем установления разных напоров в голове трубопровода.

Результаты опытов первой серии ($h_0=1$—$2$ *см*) помещены в табл. 2 вместе с расчетными величинами, полученными по методу Бержерона.

*Таблица 2*

| № опыта | $Q$ *м³/сек* | $v_0$ *м/сек* | $h_0$ *см* | $h_{тр}$ *см* | $h_p$ *см* | $h_{маш}$ *м* | $h_{max}$ *м* | $a$ *м/сек* | $n=\frac{l}{a}$ | $av_0$ *g* | $h_{max}$ по Бержерону *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.3 | 0.661 | 1.67 | 11.9 | 13.57 | 8.5 | 49.0 | 735 | 4.62 | 49.7 | 49.7 |
| 2 | 1.5 | 0.765 | 1.95 | 12.0 | 13.95 | 7.5 | 41.5 | 475 | 3.705 | 37.0 | 43.5 |
| 3 | 1.65 | 0.842 | 2.25 | 14.5 | 16.75 | 8.0 | 48.5 | 530 | 4.22 | 45.5 | 44.2 |
| 4 | 1.75 | 0.893 | 2.37 | 19.4 | 21.77 | 8.5 | 53.5 | 638 | 4.2 | 54.8 | 54,5 |
| 5 | 1.1 | 0.561 | 1.25 | 6.8 | 8.05 | 7.5 | 28.0 | 530 | 3.11 | 30.2 | 29,2 |
| 6 | 0.5 | 0.306 | 0.01 | 1.8 | 1.79 | 1.5 | 1.25 | 106 | 1.25 | 3.3 | 1.5 |
| 7 | 1.0 | 0.510 | 1.1 | 7.6 | 8.7 | 4.5 | 10.0 | 203 | 1.63 | 10.55 | 6.3 |
| 8 | 0.8 | 0.408 | 0.69 | 4.6 | 5.29 | 2.75 | 13.4 | 416 | 2.22 | 13.7 | 14,0 |
| 9 | 1.05 | 0.535 | 1.2 | 7.4 | 8.6 | 2.75 | 7.25 | 149 | 1.53 | 8.15 | 7.7 |
| 10 | 0.79 | 0.403 | 0.47 | 3.9 | 4.37 | 2.62 | 4.75 | 171 | 1.50 | 7.05 | 6.9 |

Совпадение величины $h_{max}$ с экспериментом в основном идеальное.

Результаты опытов второй серии ($h_0=0{,}5$—$0{,}7$ *м*) приведены в табл. 3.

*Таблица 1*

| № по пор. | Q л/сек | $h_0$ см | $h_p$ см | $v_0$ м/сек | a м/сек | $\tau = \frac{2L}{a}$ сек | $h_{max}$ м | $h_{min}$ м | $n$ опыт | $\frac{av_0}{g}$ м | $n = \frac{av_0}{g(h_0+10)}$ | По Бержерону $h_{max}$ м | По Бержерону n |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.1 | 60.88 | 70.91 | 0.56 | 970 | 0.051 | 41.0 | 7.0 | 4.0 | 55.4 | 5.22 | 49.6 | 4 |
| 2 | 1.65 | 61.85 | 106.15 | 0.84 | 970 | 0.051 | 69.0 | 7.5 | 7.63 | 83.0 | 7.8 | 75.0 | 6 |
| 3 | 0.1 | 57.2 | 57.4 | 0.052 | 970 | 0.051 | 8.0 | 6.5 | 1.0 | 5.15 | 0.49 | 15.3 | 1 |
| 4 | 0.6 | 59.47 | 65.67 | 0.306 | 970 | 0.051 | 31.0 | 6.5 | 2.9 | 30.3 | 2.86 | 31.0 | 2 |
| 5 | 1.2 | 61.0 | 81.5 | 0.61 | 640 | 0.076 | 60.0 | 7.5 | 4.0 | 40.0 | 4.05 | 51.0 | 3 |
| 6 | 0.2 | 57.9 | 58.3 | 0.105 | 720 | 0.07 | 10.0 | 3.25 | 1.11 | 7.8 | 0.71 | 14.0 | 1 |
| 7 | 0.5 | 59.2 | 63.2 | 0.255 | 970 | 0.051 | 24.0 | 8.0 | 2.8 | 25.2 | 2.18 | 39.6 | 2 |
| 8 | 1.45 | 61.17 | 91.47 | 0.71 | 890 | 0.0595 | 60.0 | 7.5 | 5.8 | 65.1 | 6.25 | [illegible] | 5 |
| 9 | 1.7 | 61.87 | 91.87 | 0.87 | 777 | 0.0673 | 87.5 | 7.0 | 5.6 | 69.0 | 6.5 | 89.0 | 8 |
| 10 | 1.3 | 61.35 | 92.65 | 0.661 | 870 | 0.06 | 70.0 | 7.0 | 5.35 | 58.8 | 5.54 | [illegible] | 5 |
| 11 | 2.7 | 63.12 | 136.12 | 1.375 | 1025 | 0.051 | 133.0 | 7.7 | 11.3 | 117.5 | 13.85 | 153.0 | 13 |
| 12 | 2.2 | 62.6 | 115.1 | 1.12 | 990 | 0.053 | 135.0 | 7.0 | 9.35 | 114.0 | 10.6 | 118.0 | 9 |
| 13 | 1.4 | 61.46 | 90.36 | 0.715 | 720 | 0.073 | 57.8 | 8.75 | 4.75 | 52.5 | 4.94 | 57.5 | 4 |
| 14 | 1.2 | 61.0 | 78.8 | 0.612 | 281 | 0.185 | 28.5 | 6.5 | 2.27 | 17.5 | 1.63 | [illegible] | 1 |

Примечание. Площадь сечения трубопровода $\omega$ = [illegible] $м^2$; рабочая длина трубопровода $L = 26{,}15$ м.

Здесь также в основном имеет место хорошее совпадение расчетных величин с экспериментальными как $h_{max}$, так и $n$ — длительности существования вакуумной зоны. Расхождение в основном получено при опытах с тонкой пружиной майгака. По опытам можно прийти к выводу, что условие разрыва сплошности, выраженное через условие $h = 10$ м вакуума, приемлемо для развитой кавитации и для очень малых статических давлений, так как имеется хорошее совпадение расчетных данных с экспериментом в большинстве приведенных выше случаев.

Колебание в величине скорости распространения волны удара $a$ в эксперименте, полученное вследствие изменения содержания воздуха в трубопроводе при переходе от одного опыта к другому, учтено при расчетах, а потому не влияет на оценку точности метода расчета.

Таким образом, при принятых граничных условиях, достаточно удачно воспроизведенных на экспериментах Смирнова и автора, методом Бержерона решается задача гидравлического удара в низконапорных насосных установках.

Принятые нами граничные условия в расчетах соответствовали экспериментам. В натуре действуют инерционные силы насоса мотора и вращающейся массы воды, а также инерционные свойства обратного клапана, которые должны определить ход явления удара в нагнетательном трубопроводе. Пример расчета с учетом этих факторов приведен в работе Парнакиана [7], исследования которого также показывают, что метод Бержерона является вполне приемлемым для расчета гидравлического удара в низконапорных насосных установках.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 24 VIII 1957

Ս. Մ. ԻՍԱՀԱԿՅԱՆ

## ՅԱՎՈՐ ՃՆՇՄԱՆ ԳՈՄՊԱՅԻՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ՃՆՇՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐՎԱԾԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ:

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

*Անխզելիության պայմանի իրականման պատճառով ցածր ճնշման պոմպային կայաններում հիդրավլիկական հարվածի հաշվման $\Delta H_{max} = \frac{av_0}{g}$ Ն. Ե. Ժուկովսկու բանաձևը դառնում է անկիրառելի:*

*Գործնականությունում եղած տվյալների համաձայն հիդրավլիկական հարվածի ալս դեպքը դնահատվում է տարբեր ձևերով, որոնք երբեմն տալիս են նշանակալի հակասական արդյունքներ: Դիտված են Ժուկովսկու, Ամիրնովի, Պապինի և Բերժերոնի հաշվման սկզբունքները, և տեսական ու փորձնական անալիզից հետո գերադասությունը է տրված Բերժերոնի (4) մեթոդին: Բերժերոնի մեթոդով հաշվումները ստուգված են Ամիրնովի 8 փորձերով և հնդինակի 24 փորձերով, որոնց տվյալները բերված են 1, 2, 3, աղյուսակներում: Հաշվային ու փորձնական տվյալները լավագույն համաձայնության մեջ են գտնվում:*

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Жуковский Н. Е.* Исследование гидравлического удара в водопроводных трубах. Собр. соч., т. III, 1949.
2. *Мостовский А. Ф.* Исследование гидравлического удара в трубах при малых напорах. Тр. МИИТ, вып. XI, 1927.
3. *Смирнов Д. Н.* Исследование гидравлического удара в напорных водоводах насосных станций. 1951.
4. *Bergeron L.* Du coup de belier en hydraulique au coup de foudre en electricite. Paris, 1950.
5. *Иванов В. М.* Гидравлический удар в водоводах насосных станций. М., 1951.
6. *Эпштейн Л. А.* Кавитация и возможность ее теоретического исключения как сверхзвукового течения гипотетической жидкости. Тр. ЦАГИ, № 514, 1946.
7. *Parmakian J.* Pressure surges at large Pump Installations. Transactions of the ASCE, v. 75, August, 1950, № 6.