

С. М. ИСААКЯН

# СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ НИЗКОНАПОРНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК\*

В работе автора [1] было отмечено, что в трубопроводах низконапорных насосных установок при гидравлическом ударе повышение давления может в несколько сот раз превышать статическое давление или вовсе не превышать его величины. Автор задался целью подобрать такие параметры трубопровода, при которых гидравлический удар не превышал бы допустимых пределов. В связи с этим рассмотрим решенную Бержероном задачу [2] и результаты исследования Д. Н. Смирнова [3]. Ими установлено, что повышение давления при гидравлическом ударе, превышающее два статических напора, вызвано образованием вакуума в трубопроводе и наоборот, предотвращением вакуума можно ограничить максимальное давление двумя статическими.

В задаче 81 Бержерона (рис. 1) характерно то, что при первом падении давления характеристика волны пересекает горизонтальную

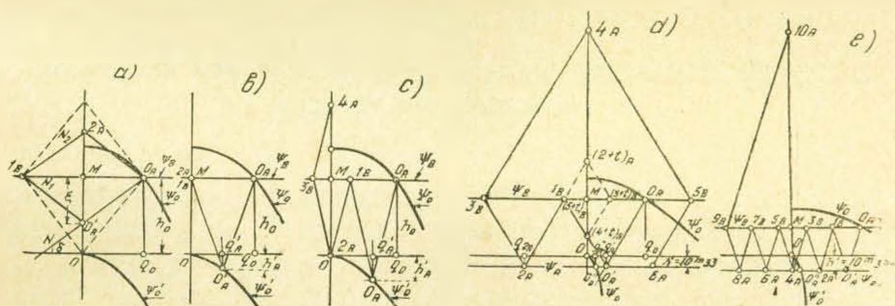


Рис. 1.

линию (давление равно абсолютному нулю, что принято за граничное условие у клапана) в точке  $O_A$ , находящейся одновременно на характеристике  $\psi_0^I$  насоса, работающего в разрежении. Это означает, что

\* Статья С. М. Исаакян посвящена малоизученному и актуальному вопросу уменьшения и предотвращения избыточного давления в низконапорных установках. Следует однако отметить, что предложенные автором формулы проверены только на модели, поэтому они нуждаются в дальнейшей проверке в эксплуатационных условиях (Ред.).

через трубопровод проходит такой расход воды, какой подается насосом, т. е. соблюдается условие неразрывности. В конце следующей фазы движения волны, скорость жидкости у клапана превращается в нуль, а давление жидкости—в атмосферное. Поэтому волна, вернувшаяся от противоположного конца с положительным знаком, полностью отражается от клапана, удваиваясь по величине (клапан принимается жестким). Таким образом, максимальное значение давления получается равным двум статическим.

Если бы характеристика  $1_B-2_A$  пересекла вертикальную ось ( $q=0$ , или  $v=0$ ) выше точки  $O$ , то повышение давления над статическим ограничилось бы величиной ординаты  $M_{2_A}$ , как это имеет место в примере  $81_A$  (рис. 1). В пределе точка  $2_A$  совпадает с точкой  $M$ , как это имеет место в случае  $81_B$ , и повышение давления над статическим получается равным нулю.

Физическая картина явления в этом случае следующая. Вследствие прекращения подачи воды насосом по нормальной характеристике  $\phi_0$  у клапана возникает волна пониженного давления. При этом, расход воды через трубопровод будет соответствовать расходу, который подается насосом. Вследствие совпадения и скорости воды в конце трубопровода и в бассейне, отражение волны не происходит. В связи с отсутствием полости разрежения и движения жидкости вниз, обратному клапану передается только статическое давление, и во всем трубопроводе устанавливается  $h=h_0$ ,  $v=0$ . Тем самым процесс перемены режима в трубопроводе заканчивается. Таким образом видим, что характеристики насоса и трубопровода взаимно обуславливают благоприятный или неблагоприятный исход работы трубопровода при внезапном выключении энергии.

### 1. Случай безударной работы трубопровода при внезапном выключении энергии

Поставим условие, чтобы волна пониженного давления погасилась в пределах трубопровода в течение полупазы, т. е. чтобы режимная точка  $1_B$  совпадала с точкой  $M$ , аналогично случаю  $81_B$  (рис. 2).

Имея ввиду, что указанные графики Бержерона не учитывают гидравлические потери, что недопустимо при длинных трубопроводах, заменяем граничное условие в конце трубопровода параболой  $h_p = h_0 \pm kq^{2*}$ , как это делает Бержерон при рассмотрении другой задачи и Сурин [4] при численном интегрировании. Граничным условием у обратного клапана является  $h=0$ .

---

\* Знак плюс соответствует движению жидкости вверх по трубе, знак минус—вниз.

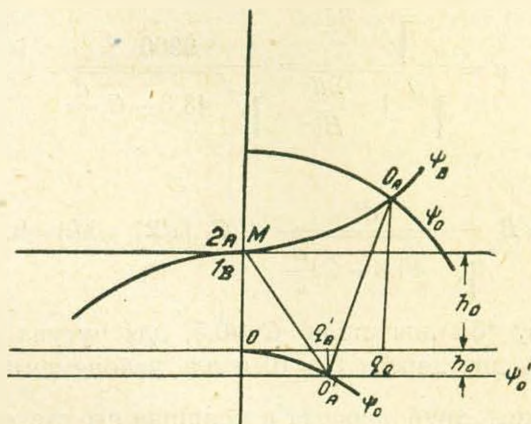


Рис. 2.

Учтем, что согласно уравнению гидравлического удара наклон прямых  $O_A O'_A$  и  $O_A l_B$  равен  $\pm \frac{a}{g\omega}$ , где  $\omega$  — площадь поперечного сечения трубы.

Тогда, согласно рис. 2, можем написать следующие соотношения:

$$\frac{h_p + 10}{\Delta q_1} = \frac{a}{g\omega} \quad (a)$$

$$\frac{h_0 + 10}{\Delta q_2} = \frac{a}{g\omega} \quad (b)$$

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = q_0 \quad (c)$$

где  $h_p = h_0 + kq_0^2$ .

Отсюда можно получить выражение для определения коэффициента потерь  $k$  в следующем виде:

$$k = \frac{a}{q_0 g \omega} - \frac{2}{q_0^2} (k_0 + 10). \quad (1)$$

Если коэффициент  $h$  удовлетворяет условию (1), то при внезапном выключении энергии не будет иметь место повышение давления в трубопроводе. При этом надо подобрать характеристику запорного органа так, чтобы она проходила через точку  $O'_A$ . Если для имеющихся труб расчетная величина  $k$  будет меньше или больше, чем определенная по выражению (1), то необходимо подбирать параметры трубопровода ( $c$ ,  $d$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ,  $l$ ,  $\Sigma \zeta$ ) так, чтобы они удовлетворяли условию (1).

Подставляя в (1)

$$k = \frac{8}{g\pi^2 d^4} \left( \lambda \frac{L}{d} + \Sigma \zeta_m \right),$$



$$a = \frac{\sqrt{\frac{\delta g}{\gamma}}}{\sqrt{1 + \frac{\Sigma d}{E \delta}}} = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + C \frac{d}{\delta}}}$$

получим:

$$Aa^5 + B \frac{d^3}{\sqrt{48,3 + C \frac{d}{\delta}}} + C_1 (d\Sigma_{\text{л}} + \lambda L) = 0, \quad (1')$$

где по Подласову [5], для стали  $C=0,5$ , для чугуна  $C=1$ , для железобетона  $C=3$ , для дерева  $C=10$  и для асбоцемента  $C=20$ ;

$q$  и  $\delta$  — диаметр трубопровода и толщина его стенок;

$\lambda$  — коэффициент сопротивления трения;

$L$  — длина трубопровода;

$\Sigma \zeta_{\text{л}}$  — сумма коэффициентов местных потерь;

$$A = \frac{2}{q_0^2} (h_0 + 10); B = -\frac{4.9900}{\pi g q_0}; C_1 = \frac{8}{g\pi^2}.$$

Если считать  $h_0$  и  $q_0$  заданными, то можно будет подобрать остальные параметры.

Здесь могут встретиться два качественно разных случая.

1) Если требуется уменьшение сопротивления системы и это уменьшение осуществляется за счет увеличения диаметра труб. При этом увеличится их стоимость. Но в данном случае, ее можно уменьшить путем применения труб из более дешевого материала, учитывая пониженные требования к ним.

2) Если данное решение достигается с помощью увеличения сопротивления трубопровода, то это приводит к увеличению стоимости нагнетания воды. В этом случае необходимо внести эти сопротивления таким образом, чтобы их влияние начинало бы сказываться с момента выключения насоса. То-же относится к случаям работы насоса в других режимах. Для некоторых вероятных режимов можно предусмотреть соответствующие местные сопротивления, которые могли-бы включаться автоматически при сбросе энергии.

Таким образом, в обоих этих случаях вопрос должен рассматриваться с точки зрения экономичности мероприятия.

### Случай повышения давления до величины, равной двум статическим

При небольших статических напорах может быть вполне допустимым максимальное повышение давления до величины, равной двум статическим. Поэтому, если имеем случай, близкий к  $81_c$ , можем соответствующим выбором параметров достигнуть ограничения  $h_{\text{max}}$  двойным статическим напором.



обратного клапана. Тогда, сознавая, что наличие полости разрежения является источником повышения давления свыше двух статических, можем прибегнуть к искусственному предотвращению образования этого разрежения путем заполнения указанной полости водой из стороннего водоисточника.

Этот источник должен быть достаточной мощности, чтобы по мере образования полости разрежения происходило ее заполнение водой.

Мощность источника можно определить с помощью графика Бержерона, построенного для данного случая.

Объем полости по этому графику будет:

$$w = \omega \tau (v_1 + v_2 + \dots + v_{n-1}),$$

где  $\omega$  — площадь поперечного сечения трубы;

$$\tau = \frac{2L}{a} \text{ — фаза движения волны;}$$

$v_1, v_2, \dots, v_{n-1}$  — скорости, соответствующие точкам пересечения характеристик волны с горизонталью  $h=0$ .

На образование указанной полости тратится время  $t_1 = \sigma n_1$ , где  $n_1$  — число фаз, соответствующее времени движения оторвавшейся от клапана колонны воды вверх.

Чтобы полость, объемом  $w$  заполнить по мере ее образования, за время  $t_1$ , необходим расход  $Q = \frac{w}{t_1}$  м<sup>3</sup>/сек, каковым и определяется мощность требуемого источника.

Точность расчета  $Q$  можно установить по точности величин, входящих в его выражение:  $v_i$ ,  $\sigma$ ,  $t_1$  (или  $n_1$ ).

Как было установлено в [1] величины  $v_i$ ,  $n_i$  определяются по методу Бержерона достаточно точно, что подтверждается многочисленными опытами. Следовательно, точность расчета  $Q$  будет зависеть только от точности определения  $\sigma = \frac{2L}{a}$ . Скорость же  $a$  меняется в зависимости от содержания воздуха в воде.

Повидимому для данного конкретного случая можно установить пределы колебания скорости распространения волны гидравлического удара и учесть их при расчете расхода  $Q$ .

Если пределы изменения скорости  $a$  окажутся широкими, то как безударный трубопровод, так и трубопровод, рассчитанный на нагрузку  $2 h_0$  придется снабдить гасителем небольшой мощности для предотвращения случайных колебаний давления.

Нужно заметить, что при выборе мероприятия надо исходить из конкретных условий: материала трубопровода, рельефа местности, длины трубопровода, характеристики насосной установки и т. д.



## Опыты автора

Для проверки предложенного расчета мощности водисточника и гасителя в Водно-энергетическом институте АН Армянской ССР были поставлены следующие опыты.

На установке, описанной [1] путем быстрого закрытия пробкового крана (заменяющего обратный клапан) создавался прямой удар при разных режимах установившегося движения. К пробковому крану, у которого ожидалось образование области разрежения, были присоединены две трубки, которые предназначались для подачи воды из водопроводного крана.

Опыты были произведены для двух случаев: одновременным приключением гасителя вместе с закрытием пробкового крана и закрытием пробкового крана без включения гасителя в систему трубопровода.

Часть опытов произведена с расходом гасителя  $Q = 0,5$  л/сек, другая часть с  $Q = 0,9$  л/сек.

Некоторые графики давления, записанные при этих экспериментах приведены на рис. 4. Каждая пара кривых на этом рисунке, находящаяся под одним номером, относится к гидравлическому удару, созданному при одних и тех же режимах установившегося движения

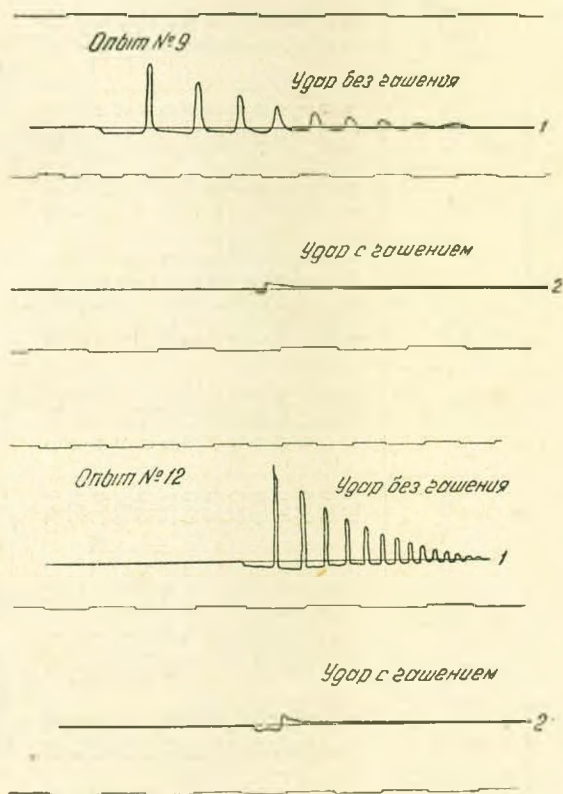


Рис. 4.

Таблица 1

| №№ опыта<br>$Q$<br>л/сек | $h_0$<br>см | $h_p$<br>см | $v_0$<br>м/сек | $a$<br>м/сек | $\sigma = \frac{2L}{a}$<br>сек | $\Delta h_{\max}$<br>м |                        | $h_3$ | $\frac{av_0}{g}$<br>м | $n_{\text{ш}} = \frac{av_0}{h_0 + 10}$ | По Бержерону |       |              |          |                     |                                       |                         | Опытные данные при гашении |                         |       |     |
|--------------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------|-----------------------|----------------------------------------|--------------|-------|--------------|----------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------|-----|
|                          |             |             |                |              |                                | $h_{\text{взв}}$<br>м  | $\Delta h_{\max}$<br>м |       |                       |                                        | $n$          | $n_1$ | $t_1$<br>сек | $l$<br>м | $w = \omega l$<br>л | $Q_{\Gamma} = \frac{w}{t_1}$<br>л/сек | $Q_{\text{гам}}$<br>л/с | $+\Delta h_{1,\max}$<br>м  | $-\Delta h_{\max}$<br>м |       |     |
|                          |             |             |                |              |                                |                        |                        |       |                       |                                        |              |       |              |          |                     |                                       |                         |                            |                         |       |     |
| 1                        | 1,1         | 60,8        | 70,9           | 0,560        | 970                            | 0,054                  | 41,0                   | 7,0   | 4,0                   | 55,4                                   | 5,22         | 49,6  | 4            | 2        | 0,108               | 0,038                                 | 0,074                   | 0,69                       | 0,5                     | 1,0   | —   |
| 2                        | 1,65        | 61,8        | 106,2          | 0,840        | 970                            | 0,054                  | 60,0                   | 7,5   | 7,63                  | 83,0                                   | 7,8          | 75,0  | 6            | 3        | 0,162               | 0,077                                 | 0,151                   | 0,92                       | 0,5                     | 41,2  | —   |
| 3                        | 0,1         | 57,2        | 57,4           | 0,052        | 970                            | 0,054                  | 8,0                    | 6,5   | 1,0                   | 5,11                                   | 0,49         | 15,3  | 1            | 0,5      | 0,027               | —                                     | —                       | —                          | 0,5                     | 3,0   | —   |
| 4                        | 0,6         | 59,5        | 65,7           | 0,306        | 970                            | 0,054                  | 31,0                   | 6,5   | 2,9                   | 30,3                                   | 2,86         | 34,0  | 2            | 1,0      | 0,054               | 0,011                                 | 0,022                   | 0,40                       | 0,5                     | 0,75  | —   |
| 5                        | 1,2         | 61,0        | 84,5           | 0,61         | 690                            | 0,076                  | 60,0                   | 7,5   | 4,6                   | 43,0                                   | 4,05         | 54,0  | 3            | 2,0      | 0,152               | 0,041                                 | 0,080                   | 0,53                       | 0,5                     | 13,0  | —   |
| 6                        | 0,2         | 57,9        | 58,3           | 0,102        | 750                            | 0,07                   | 10,0                   | 3,25  | 1,14                  | 7,8                                    | 0,74         | 14,0  | 1            | 0,5      | 0,035               | —                                     | —                       | —                          | 0,5                     | 1,0   | —   |
| 7                        | 0,5         | 59,2        | 63,2           | 0,255        | 970                            | 0,054                  | 24,0                   | 8,0   | 2,8                   | 25,2                                   | 2,48         | 39,6  | 2            | 1,0      | 0,054               | 0,0076                                | 0,015                   | 0,28                       | 0,5                     | —     | —   |
| 8                        | 1,45        | 61,5        | 91,5           | 0,740        | 880                            | 0,0595                 | 60,0                   | 7,5   | 5,82                  | 66,4                                   | 6,25         | 71,0  | 5            | 3,0      | 0,18                | 0,06                                  | 0,117                   | 0,65                       | 0,5                     | 12,75 | —   |
| 9                        | 1,7         | 61,9        | 91,9           | 0,870        | 777                            | 0,0673                 | 87,5                   | 7,0   | 5,6                   | 69,0                                   | 6,5          | 89,0  | 6            | 3,0      | 0,202               | 0,087                                 | 0,167                   | 0,825                      | 0,9                     | 7,0   | 7,0 |
| 10                       | 1,3         | 61,4        | 92,6           | 0,664        | 870                            | 0,06                   | 70,0                   | 7,0   | 5,35                  | 58,8                                   | 5,54         | 70,5  | 5            | 3        | 0,18                | 0,0496                                | 0,097                   | 0,54                       | 0,9                     | —     | 8,5 |
| 11                       | 2,7         | 63,1        | 133,1          | 1,375        | 1025                           | 0,051                  | 143,0                  | 7,7   | 11,3                  | 147,5                                  | 13,85        | 153,0 | 13           | 6        | 0,306               | 0,217                                 | 0,425                   | 1,39                       | 0,9                     | 19,2  | 8,5 |
| 12                       | 2,2         | 62,6        | 115,1          | 1,120        | 990                            | 0,053                  | 135,0                  | 7,0   | 9,35                  | 144,0                                  | 10,6         | 118,0 | 9            | 5        | 0,265               | 0,135                                 | 0,271                   | 1,02                       | 0,9                     | 12,2  | 7,0 |
| 13                       | 1,4         | 61,5        | 90,5           | 0,715        | 720                            | 0,073                  | 57,8                   | 8,75  | 4,75                  | 52,5                                   | 4,94         | 57,5  | 4            | 2        | 0,365               | 0,0585                                | 0,115                   | 0,315                      | 0,9                     | 0,5   | 4,5 |
| 14                       | 1,2         | 61,0        | 78,8           | 0,612        | 281                            | 0,185                  | 28,5                   | 6,5   | 2,27                  | 17,5                                   | 1,65         | 26,5  | 1            | 1        | 9,185               | 0,037                                 | 0,072                   | 0,392                      | 0,9                     | —     | 2,5 |

$$\omega = 0,00196 \text{ м}_2, L = 26,15 \text{ м}$$



без включения гасителя и с ее выключением в систему. Измерения произведены у пробкового крана (заменяющего обратный клапан) со стороны напорного трубопровода.

Сравнение первых кривых со вторыми наглядно показывает эффект гашения при заполнении разреженного пространства водой. Они свидетельствуют о положительном действии предлагаемого мероприятия.

Количественные характеристики этих опытов приведены в табл. 1.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными (табл. 1) показывает, что расчетный расход, который необходим для заполнения полости разрежения по мере ее образования, определяется с достаточной точностью и во всех опытах было обеспечено условие  $\Delta h_{\max} \leq h_0$ , когда  $Q_{\text{гаш}} \leq Q_{\text{треб.}}$ . В случае опыта № 9 это не обеспечивается, так как  $Q_{\text{гаш}} \approx Q_{\text{треб.}}$ .

Интересно отметить, что величина максимального разрежения, полученная в этих экспериментах соответствует таковой, полученной графоаналитически.

При наличии количественной характеристики явления можно найти конструктивное решение, обеспечивающее подачу воды в полость разрежения. Так например, если имеется приемный бассейн (в конце нагнетательной линии), расположенный недалеко от обратного клапана и расход гашения небольшой, по-видимому целесообразно воду подавать к области разрежения по трубе, идущей от бассейна.

Отметим, что источником питания водой полости разрежения не может служить сам нагнетательный трубопровод, ибо падение давления у обратного клапана распространяется по всей длине трубопровода со скоростью  $a$  и с периодом  $\sigma = \frac{2L}{a}$ .

Возможно, что питание водой можно осуществить из нижнего бьефа, под действием разности давления в вакуумном пространстве и в атмосфере. Может быть характеристика насоса позволит осуществить дополнительную подачу воды через обходную трубку (от всасывающей трубы в нагнетательный трубопровод).

Если поблизости имеется линия водопроводной сети достаточной мощности ( $Q_2$ ), необходимой для гашения удара, можно использовать этот водоисточник.

При отсутствии такой возможности, если требуемый объем небольшой, можно использовать открытые камеры с обратным клапаном.

Во всех случаях желательно исключить промежуточный механизм между водоисточником и трубопроводом вплоть до применения автоматически действующих клапанов.

Исходя из этих соображений желательно выбрать такую систему подачи воды, чтобы при нормальной работе насоса давление в нагнетательной трубе было уравновешено давлением в водоисточнике, а при снижении давления, чтобы его градиент позволил бы во-время заполнить водой полость разрежения.

При больших установках такие мероприятия могут оказаться экономически не целесообразными. В таких системах нужно найти соответствующий закон закрытия клапана, если конечно, инерционность насоса позволяет пропуск необходимого расхода для обеспечения неразрывности струи в трубопроводе.

Водно-энергетический институт  
АН Армянской ССР

Поступило 2.11.1958

Ս. Մ. ԻՍԱԿՅԱՆ

ՅԱՆՐ ԶՆՇՄԱՆ ՊՈՄՊԱՅԻՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ԶՆՇՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐՈՒՄ  
ՀԻՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐՎԱԾԻ ԿԱՆԽՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿ

Ս. մ փ ո փ ու մ

Ելնելով այն փաստից, որ ցածր ճնշման պոմպային կայանների ճնշման խողովակաշարում հիդրավլիկական հարվածի մեծությունը կախված է այնտեղ առաջացող նոսրացումից և դրա հետևանքով՝ հեղուկի անխզելիության խախտումից, այստեղ որպես հիդրավլիկական հարվածի մեծությունը սահմանափակող միջոց առաջարկված է հեղուկի անխզելիության պահպանումը:

Ցույց է տրված, որ պոմպի իներցիայի բավարար մեծության պայմաններում հնարավոր է խողովակաշարի պարամետրն ընտրել այնպես, որ հիդրավլիկական հարվածը լինի  $\Delta h = (0 \div h_0)$  սահմաններում:

Փոքր իներցիա ունեցող պոմպային սխեմաներում անխզելիությունը ապահովվում է արհեստական ճանապարհով ջուր ներարկելով այդ խողովակ:

Հոգվածում բերված հաշիվներն արված են Բերժերոնի դրաֆոնալիտիկ եղանակով և արդյունքներն ստուգված են հեղինակի ու Սմիրնովի [3] փորձերով: Արդյունքները զոհացուցիչ են:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Исаакян С. М. Выбор метода расчета гидравлического удара в низконапорных насосных установках. «Известия АН Армянской ССР», ОТН. № 6, 1958.
2. Bergeron L. Du coup de béliet en hydraulique au coup de foudre en electricité, Paris, 1950.
3. Смирнов Д. Н. Исследование гидравлического удара в напорных водоводах насосных станций, 1957.
4. Сурин А. А. Гидравлический удар в водоводах и борьба с ним, 1946.
5. Подласов Л. В. Защита напорных трубопроводов от гидравлического удара. Изд. Киевского гос. ун-та, 1955.
6. Мостовский А. Ф. Исследование гидравлического удара в трубах при малых напорах. Тр. МНИ, в. XI, 1929.