

ГИДРОМЕХАНИКА

В. М. ПАПИН

**ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ ВОДОВОДА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР**

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 21 II 1953)

При рассмотрении явления гидравлического удара, имеющего место в водоводах насосных станций при внезапном выключении насосов, исходя из того, что после выключения насосов в водоводе возникает отрицательная волна, равная  $\frac{av}{g} + h_{тр}$ , где  $h_{тр}$  — восстанавливающаяся потеря напора на трение. Эта отрицательная волна движется со скоростью  $a$  в направлении к концу трубопровода. Отражаясь от него с переменной знака, волна движется в обратном направлении, восстанавливая на своем пути статический напор. Через промежуток времени, равный  $\frac{2L}{a}$  ( $L$  — длина водовода), она достигает начала трубопровода и отражается от закрытого обратного клапана с тем же знаком, в результате чего в трубопроводе возникает повышение давления, т. е. гидравлический удар.

По такой схеме явление гидравлического удара протекает только в случае, если трубопровод уложен по горизонтальной местности, а в конце его имеется водонапорная башня или резервуар. В действительности же в таких случаях, если они и имеют место, вследствие малого статического давления сила удара незначительна и обычно для водовода опасности не представляет.

Обычно магистральные линии трубопроводов прокладываются по пересеченной местности, и по пути от насосной станции до резервуара всегда имеется ряд промежуточных возвышенностей. В этом случае явление гидравлического удара протекает иначе.

Рассмотрим пример водовода, профиль которого представлен на рис. 1. Водовод стальной, диаметр 350 мм, общая длина 7680 м. На расстоянии 2620 м от начала имеется возвышенность  $e$ .

Сначала манометр был подключен в точке 1 (см. схему в верхней части рис. 1), т. е. до обратного клапана, станция выключена и снята диаграмма падения давления насоса (рис. 2, Б). Затем была сделана серия выключений при различной скорости движения воды в водоводе\*. При этих выключениях самопишущие манометры подключались в точках 2,  $e$ ,  $g$ ,  $k$ ,  $i$ . На рис. 1 нанесены рабочие давления до каждого выключения и минимальные давления после выключения.

Рассмотрим, как изменяется давление в водоводе во времени. Очевидно с момента выключения давление в водоводе начнет падать в соответствии с кривой рис 2, Б и от начала водовода побегут волны пониженного давления. Распространение этих волн можно представить в виде серии кривых, построенных следующим образом: через  $t_1$  сек.

\* В проведении экспериментов участвовал М. И. Ругалев.

после выключения первый импульс понижения давления достигает точки, расположенной на расстоянии  $t_1 a$  от начала водовода. За это же время давление в водоводе упадет до величины  $H_1$  (рис. 2, Б) и волна пониженного до  $H_1$  давления начнет распространяться по водоводу. Беря промежуточное давление  $H_2$ , получаем по графику рис. 2, Б, что до этой величины давление упало за время  $t_2$  и, следовательно, только через  $t_2$  сек. от момента выключения начинают

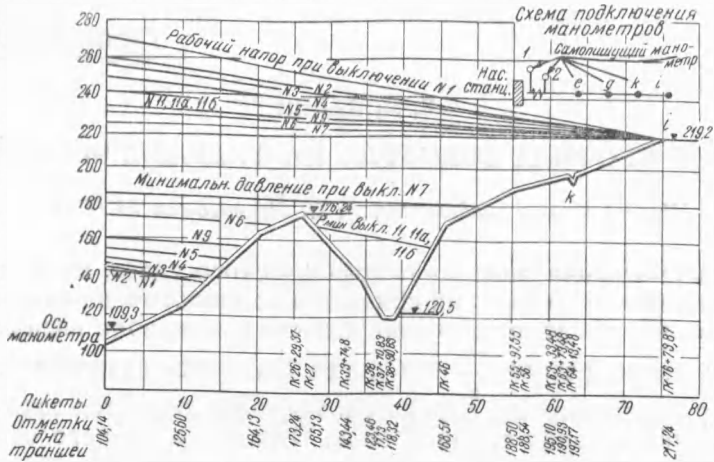


Рис. 1

распространяться волны пониженного до  $H_2$  давления, т. е. за время  $t_1$  с момента выключения пониженное до  $H_2$  давление пробежит расстояние  $(t_1 - t_2) a$ , и т. д. В результате получим кривую 1—2—3, соответствующую положению передней части ударной волны к моменту времени  $t_1$  от начала выключения.

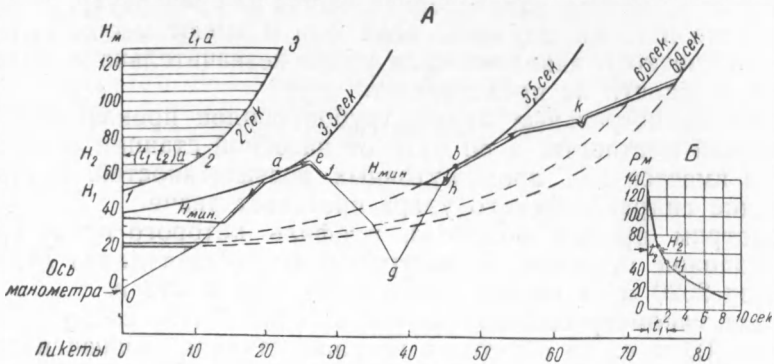


Рис. 2

На рис. 2 нанесены кривые, соответствующие распространению ударной волны через 2; 3,3; 5,5; 6,6 и 6,9 сек. Очевидно, точка  $a$  касания одной из этих кривых к профилю водовода дает точку, в которой давление упадет до нуля раньше всех.

От точки  $a$  зона нулевого давления начнет распространяться как вверх, к точке  $e$ , так и вниз — к точке  $0$ . В результате на первой возвышенности окажется зона одинаковых, т. е. нулевых давлений. Вследствие этого вышележащие слои воды начнут оказывать все возрастающее давление на нижележащие, и вследствие сжатия воды

и расширения труб начнется обратное движение воды от вершины возвышенности к началу водовода. Таким образом, когда основная волна пройдет возвышенность  $e$ , то вследствие того, что давление за возвышенностью не может упасть больше чем на 10 м ниже чем на вершине возвышенности, дальше будет двигаться только верхняя часть волны, показанная на рис. 2 сплошными линиями.

В то же время от возвышенности  $e$  начнется движение воды в обратном направлении. Это обратное движение, встретив возле насосной станции закрытый обратный клапан, вызовет некоторый подъем давления. Если этот подъем давления произойдет раньше, чем давление насоса упадет на величину  $\frac{av}{g}$ , т. е. если возвышенность находится близко к насосной станции и насос имеет большую инерцию, то полная величина  $\frac{av}{g}$  может не реализоваться, и величина падения давления окажется меньше  $\frac{av}{g}$ , а значит и величина гидравлического удара окажется меньше расчетной.

Основная волна пониженного давления, пройдя возвышенность  $e$ , снизит давление в водоводе за ней до отрицательной величины. Ниже этой величины давление упасть не может, и за возвышенностью минимальные давления расположатся по линии  $f-h$ , параллельной линии рабочего давления, т. е. в пониженных участках трубопровода, возле точки  $g$ , останутся положительные давления.

Таким образом, возвышенность как бы дает за собой тень, защищая дальнейшие пониженные участки водовода от сильного падения давления, а следовательно и от последующего большого подъема его. При этом, чем выше возвышенность, тем больше она срезает за собой величину гидравлического удара. Если вершина возвышенности имеет ту же отметку, что и конечная точка водовода, то гидравлический удар за нее не переходит вовсе.

Вверх и вниз от точки  $b$  распространится зона отрицательных давлений, в результате чего начнется обратное движение жидкости, которое и создает основное повышение давления возле насосной станции, т. е. гидравлический удар.

С другой стороны, вследствие того, что от вершины возвышенности в точке  $e$  происходит движение воды как обратно к насосной станции, так и в прямом направлении — к точке  $g$ , очевидно, на вершине  $e$  должен произойти разрыв сплошности потока и образование пустоты в водоводе. Это и подтвердилось при записи изменения давления в точке  $e$ . В дальнейшем соединении этих столбов жидкости вызывает повышение ударного давления в точке  $e$  выше расчетного. Таким образом, в переломных точках водовода может иметь место разрыв сплошности потока, который ведет к образованию пустот. Заполнение этих пустот вызывает дополнительное повышение ударного напора.

В результате произведенных нами выключений насосной станции при различной скорости движения воды в водоводе мы при помощи самопишущих манометров, подключенных возле насосной станции в точках 2,  $e$ ,  $g$ ,  $k$ ,  $i$  (рис. 1), получили записи изменения давления.

В результате оказалось, что графики, полученные при выключениях, при которых минимальное давление проходит над возвышенностью  $e$ , не касаясь или слегка касаясь ее (выключения №№ 6, 7 рис. 1), имеют вид, показанный на рис. 3 — с плоской нижней частью 1—2. Графики же, полученные при выключениях, при которых линия минимальных давлений проходит ниже возвышенности (выключения 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9), имеют вид, показанный на рис. 4, с выступом  $K-L-M$  и впадиной  $C-P-R$  в верхней части диаграммы. При этом чем больше скорость движения воды в водоводе, тем ниже минимальное

давление до возвышенности и тем больше величина выступа на диаграмме. Таким образом, выступ  $K-L-M$  представляет отражение ударной волны от возвышенности.

Замер величины падения давления показывает, что оно значительно меньше величины  $\frac{av}{g}$ , между тем как, по существующим воззрениям, давление должно было упасть на величину  $\frac{av}{g} + h_{тр}$ . Объясняется это тем, что отражение ударной волны от промежуточной возвышенности пришло к началу водовода раньше, чем давление насоса упало на величину  $\frac{av}{g}$ .

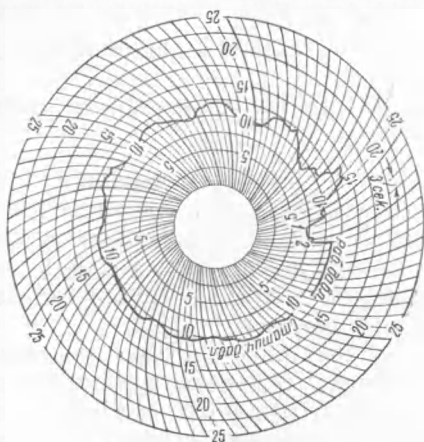


Рис. 3

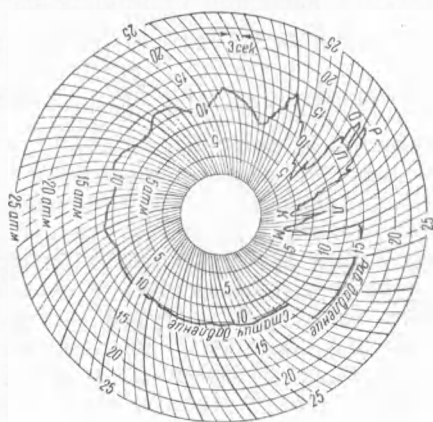


Рис. 4

Таким образом, при близком расположении промежуточной возвышенности от насосной станции, происходит частичное отражение ударной волны от нее, вследствие которого не только не успевает восстановиться потеря напора на трение, но не успевает даже реализоваться величина  $\frac{av}{g}$ . Вследствие этого падение давления получается меньше расчетного, а так как принимается, что колебания происходят около линии статического давления, т. е. на сколько давление упадет ниже линии статического давления, на столько оно и поднимется выше ее, то, следовательно, и максимальное давление при гидравлическом ударе возле насосной станции снижается\*.

Одновременно, так как давление за возвышенностью бывает не больше чем на 10 м ниже, чем на ее вершине, снижается и ударное давление за возвышенностью. Следовательно, максимальная величина гидравлического удара имеет место возле насосной станции.

Таким образом, очевидно, что при определении величины гидравлического удара необходимо учитывать профиль водовода.

Украинское отделение Всесоюзного института  
водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений  
и инженерной геологии

Поступило  
30 XII 1952

\* Это правильно при нормально работающем обратном клапане, который садится на седло в тот момент, когда скорость падает до нуля.

Однако отсюда не следует делать вывод, что при очень коротких водоводах с крутым подъемом гидравлический удар не опасен. Дело в том, что в этом случае колебания столба воды получаются столь быстрыми, что небольшая задержка с закрытием обратного клапана может повести к созданию обратной скорости движения воды, гашение которой при захлопывании обратного клапана может значительно усилить гидравлический удар.