

ГИДРАВЛИКА

Б. Л. БУНИАТЯН

О СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ОТСАСЫВАЮЩИХ ТРУБАХ

Неустановившееся движение в отсасывающих трубах гидротурбины относится к числу тех задач гидромеханики, которые мало изучены. Некоторые исследователи полагают, что все сечение трубы заполнено водой, благодаря чему скорость распространения волны давления гидравлического удара a в трубе получается порядка 1000—1200 м/сек. Вследствие этого фаза колебаний давления ρ будет пренебрежительно мала по сравнению с временем неустановившегося режима, и удар в отсасывающей трубе получается жестким.

Такое предположение противоречит действительности, ибо практика показала, что при любом режиме работы турбины, в отсасывающей трубе имеется так называемый „вихревой шнур“, состоящий из аэрированных струй воды и воздушной струи.

Наличие воздуха может в несколько раз уменьшить значение a и увеличить ρ , в связи с чем нельзя упругий удар заменить жестким.

Вопрос определения значений a в случае прокладывания по длине трубопровода резинового шланга, наполненного воздухом или наличия в трубопроводе определенной воздушной струи, рассмотрен в работах [1, 2], в которых приводится следующая формула:

$$a = \frac{1435}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon}{E} \frac{D}{\delta} + \frac{\omega}{(F - \omega)} \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_b}}}, \quad (1)$$

где ϵ и E — модули упругости воды и материала трубы,

D — диаметр, δ — толщина стенки трубопровода, F и ω поперечные сечения трубы и воздушной струи, ϵ_b — модуль упругости воздуха.

Полученные по формуле (1) результаты расходятся с экспериментальными данными всего на 5—7%. Однако определить по ней значение a для отсасывающей трубы не представляется возможным, так как величина ω не известна. Чтобы иметь возможность определить a в случае отсасывающей трубы, ниже предлагается приближенный метод расчета сечения воздушной струи ω . Известно, что вода способна растворять некоторое количество воздуха. Объем этого возду-

ха W_a при атмосферном давлении P_a и температура 20°C составляет $2\frac{0}{10}$ от объема воды W_b [3], т. е.

$$W_a = 0,02 W_b.$$

При данной температуре количество поглощенного воздуха пропорционально давлению [3]. Следовательно, в случае уменьшения давления, некоторая часть растворенного воздуха из потока выделится.

Если давление воды уменьшилось до $P_b < P_a$, то выделенный объем воздуха будет равен:

$$\Delta W_a = \frac{0,02 W_b P_b}{P_a}. \quad (2)$$

Следовательно, вода в напорной камере ГЭС, находящаяся под давлением P_a , входя в напорный трубопровод введет с собой воздух в объеме W_a . Несмотря на то, что внутреннее давление в трубопроводе $P > P_a$ и изменяется по его длине, количество воздуха не может измениться, поскольку дополнительного поступления воздуха в трубопровод нет.

Водяной поток, выходя из рабочего колеса в отсасывающую трубу, где имеется вакуум в среднем $P_b = \gamma h_s - \gamma h_d$, где h_s — геометрическая высота отсасывания, h_d — динамическое разрежение, вызванное конусностью трубы, на единице ее длины должен выделять воздух в объеме:

$$\Delta \omega = \frac{0,02 F P_b}{P_a}. \quad (3)$$

Отметим, что вакуум под рабочим колесом в центре трубы заметно больше, чем на периферии. Поэтому выделение воздуха может быть даже при $-h_s$, если $P_b \neq 0$.

Так как вакуум в отсасывающей трубе распределяется по ее длине по закону гидростатики, то для выходного сечения, где $P_b = 0$, получим $\Delta \omega = 0$. Следовательно, в отсасывающей трубе по ее длине будет существовать коническая воздушная струя с площадью основания $\Delta \omega$. Выделенный во входном сечении воздух $\Delta \omega$, по мере уменьшения P_b будет снова растворяться в воде.

Если отсасывающая труба коническая и изогнута, то вид указанной воздушной струи изменится в соответствии с увеличением F и уменьшением P_b .

Из гидравлики известно, что при уменьшении давления в жидкости от P_a до P_b происходит увеличение объема и наблюдается явление парообразования. Выделившиеся пары заполняют увеличенный объем, величина которого на единицу длины выразится согласно законам механики через:

$$\Delta \omega_a = \frac{F P_b}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Этот выделившийся пар вследствие уменьшения давления по длине трубы не может превратиться в зоду, так как температурных изменений нет. Он будет уноситься водою к выходу. Следовательно, в каком-то сечении трубы F_i , находящемся на расстоянии l_i от входного сечения отсасывающей трубы, объем выделенного пара будет:

$$\Delta\omega_{ai} = \frac{F_1 P_{b1}}{\varepsilon} + \frac{F_i P_{b1}}{\varepsilon} + \left[\frac{F_1 + F_i}{2} \cdot \frac{P_{b1} + P_{b1}}{2} \right] \frac{l_i}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Таким образом этот объем будет по длине трубы увеличиваться и у выхода из отсасывающей трубы будет равен:

$$\Delta\omega_3 = \frac{F_1 P_{b1}}{\varepsilon} + \frac{F_3 P_{b3}}{\varepsilon} + \left[\frac{F_1 + F_3}{2} \cdot \frac{P_{b1} + P_{b3}}{2} \right] \frac{(l_1 + l_2)}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где $P_{b3} = 0$, так как у выхода $P_b = 0$ (индекс 1 относится к входным сечениям, а индекс 3 — выходным).

В соответствии с этим объем выделившегося воздуха и пара в заданном створе — i отсасывающей трубы будет:

$$\omega_i = \Delta\omega_i + \Delta\omega_{ai}. \quad (7)$$

Определяя таким образом значения ω , по формуле (1) легко подсчитать скорости распространения волны давления гидравлического удара в отсасывающей трубе.

Для проверки предлагаемого способа определение a , в Институте энергетике и гидравлики АН Армянской ССР были проведены опыты и произведена запись диаграмм давления гидравлического удара в отсасывающей трубе (рис. 1) гидротурбины модельной установки. Опытная труба имела следующие характеристики: $F_1 = 706 \text{ см}^2$, $F_2 = 706 \text{ см}^2$, $F_3 = 3850 \text{ см}^2$, $l_1 = 1,25 \text{ м}$, $l_2 = 2,95 \text{ м}$, $\delta = 4 \text{ мм}$, $P_{b1} = 0,325 \text{ кг/см}^2$, $P_{b2} = 0,217 \text{ кг/см}^2$, $P_{b3} = 0$. Для этих характеристик по формулам (3)–(7) при $E = 20700 \text{ кг/см}^2$, получим: $\omega_1 = 4,13 \text{ см}^2$, $\omega_2 = 4,17 \text{ см}^2$, $\omega_3 = 2,2 \text{ см}^2$. По формуле (1) при $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ соответственно получим $a_1 = 182 \text{ м/сек}$, $a_2 = 178 \text{ м/сек}$ и $a_3 = 248 \text{ м/сек}$.

Расчетные фазы гидравлического удара будут равны: $\mu_1 = 0,0139 \text{ сек}$, $\mu_2 = 0,0274 \text{ сек}$. Следовательно, средняя скорость распространения ударной волны будет равна:

$$a_{\text{ср}} = \frac{2(l_1 + l_2)}{\mu_1 + \mu_2} = 198 \text{ м/сек}.$$

Если не считаться с влиянием воздуха и полагать $\omega = 0$, то получим $a_{\text{ср}} = 930 \text{ м/сек}$.

В опытах автора полученное значение a колебалось в пределах $180 \div 210 \text{ м/сек}$. Например, осциллограмма, приведенная на рис. 2 показывает, что $\mu = 0,0455 \text{ сек}$, $a_{\text{ср}} = 202 \text{ м/сек}$.

По визуальным наблюдениям установлено, что заполненная воздухом и паром воды полость вихревого шнура при неустановившемся режиме деформируется в соответствии с колебанием давления в отса-

сывающей трубе. Однако, от этого количества воздуха и пара в ней не изменяются, так как фаза колебания не изменяется, что видно из приведенной осциллограммы.

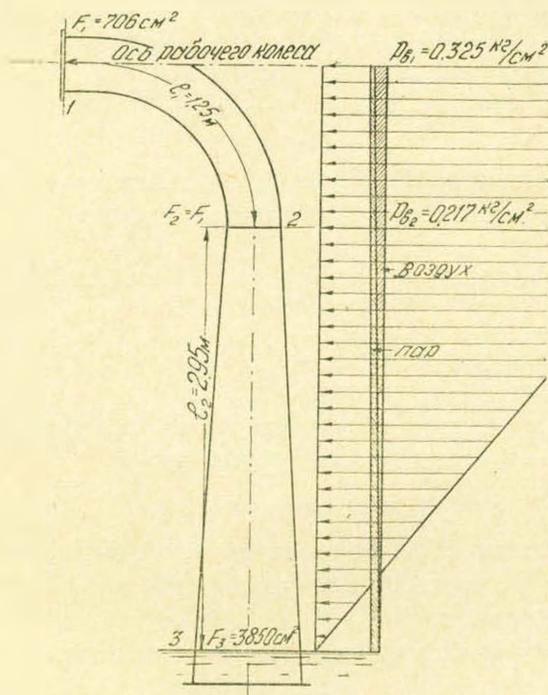


Рис. 1. Схема отсасывающей трубы и эпюра давления.

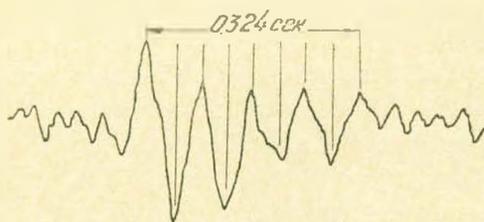


Рис. 2. Осциллограмма колебания давления в отсасывающей трубе.

Таким образом появление в отсасывающей трубе воздушной струи резко снижает значение α и предлагаемый метод расчета скорости распространения волны давления гидравлического удара в отсасывающей трубе дает результаты, достаточно близкие к действительности.

Բ. Լ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ

ԾՅՈՂ ԽՈՂՈՎԱԿՆԵՐՈՒՄ ՀԻԳՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐՎԱԾԻ ԱԼԻԲԻ
ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Չհաստատված շարժումը ծծող խողովակներում պատկանում է հիդրոմեխանիկայի այն խնդիրների թվին, որոնք գետ քիչ են ուսումնասիրված: Գրականութունում եղած մտաւոր լուծումներում ընդունում են, որ խողովակի ամբողջ կտրվածքը լցված է ջրով և այդ պատճառով հիդրավիկական հարվածի ալիքի տարածման արագութիւնը նրանում ստացվում է շատ մեծ, իսկ հարվածը ոչ-առաձգական:

Այդ ընդունելութիւնը հակասում է իրականութիւնը, քանի որ ուսումնասիրութիւնները ցույց են տալի, որ խողովակի մեջ գոլորթիւն ունի օդի անջատված մի հոծ շիթ, որը և կարող է ալիքի տարածման արագութիւնը շատ խիստ փոքրացնել:

Ալիքի տարածման արագութիւնը շրատար խողովակում օդի շիթի առկայութեան դեպքում որոշվում է (1) բանաձևով, որից օգտօնօր համար անհրաժեշտ է գիտենալ այդ օդի քանակը:

Հայտնի է, որ մթնոլորտային ճնշման տակ եղած ջուրը պարունակում է իր մեջ իր ծավալի 2 տոկոսի չափ օդ, հետևաբար հիդրոկալանի ճնշման ավազանում եղած ջուրը, որը գտնվում է մթնոլորտային ճնշման տակ, խողովակաշար մասնելով իր հետ տանում է որոշակի քանակի օդ:

Չնայած նրան, որ խողովակաշարում ջրի ճնշումը մեծ է մթնոլորտայինից, այնտեղ եղած օդի քանակը չի փոխվի, քանի որ լրացուցիչ օդ չի կարող ներս մտնել:

Սողովակաշարով հոսող ջուրը սուրբինից անցնելիս և ծծող խողովակ մտնելիս (ուր ճնշումը փոքր է մթնոլորտայինից), ջրից կանջատվի օդի մի ծավալ, որը համապատասխանում է (2) բանաձևին: Բայցի այդ, ճնշման նվազումից ջրի ծավալը կընդարձակվի և այդ լրացուցիչ ծավալը, որը որոշվում է (4) բանաձևով, կլցվի գոլորշիներով:

Արժարժված (3)—(7) բանաձևերով կարելի է հաշվել օդի և ջրի գոլորշիների ծավալի փոփոխութիւնները ըստ խողովակի երկարութեան և այնուհետև (1) բանաձևով հաշվել ալիքի տարածման արագութիւնը ծծող խողովակում:

Հիշելով բանաձևից ստացված արդիւնքների ճշտութիւնը ստուգվել և հաստատվել են լաբորատոր փորձերով, ուստի և նրանք կարող են առաջադրվել ինժեներական հաշվումներ կատարելու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Буниatian Б. Л. и Зорян З. А., Искусственное уменьшение скорости распространения волны давления гидравлического удара в целях его моделирования. Известия ОН АрмССР, № 4, 1956.
2. Зорян З. А., Физическое моделирование гидравлического удара НДВШ. „Энергетика“, № 1.
3. Гибсон А., Гидравлика и ее приложения. Госэнергоиздат, 1934.