

Л. Б. ВУНЯТЯН

ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ ВОЗДУШНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА РАБОТУ НАПОРНЫХ ВОДОВОДОВ

Как показывает опыт эксплуатации напорных водоводов, часто, вследствие неправильной эксплуатации или в результате неправильного проектирования, вместе с водой в них транспортируется некоторое количество воздуха. Условия проникновения воздуха в напорные водоводы многообразны и зависят от типа сооружения и характера его работы. Попадание и дальнейшее транспортирование воздушных масс в напорные водоводы в ряде случаев их эксплуатации может вызывать уменьшение пропускной способности водовода, толчки давления и в некоторых случаях аварии [1]. Автором статьи исследование по этому вопросу были предприняты в связи с наблюдавшимися ненормальными явлениями на дюкере Котайкской оросительной системы.

Оросительная система вводилась в эксплуатацию частями, по мере готовности. В первый период при пропуске через дюкер расходов до $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ нарушений эксплуатации оросительной системы не было. В последующем, при увеличении расхода до $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$, было обнаружено, что из горловины шахты периодически выбрасывается фонтан воды (рис. 1). Это обстоятельство нарушало нормальную эксплуатацию дюкера, а изливавшаяся через горловину шахты вода грозила размывом полотну железной дороги. Визуально в шахте наблюдалось следующее явление. Горизонт воды в шахте в течение 7—10 минут начинал постепенно подниматься и достигал не-



Рис. 1

которого стабильного положения. Далее через каждые 2—3 минуты наблюдались подъем и опускание горизонта воды в шахте. Со временем высота подъема воды в шахте увеличивалась.

Примерно за 5—7 минут до выброса горизонт воды в шахте поднимался настолько, что создавал подпор в подводящем канале. При опускании горизонта, вода с большой силой устремлялась в шахту. После 6—7-кратного повторения колебаний воды в шахте, происходил выброс воды из горловины в виде фонтана. В момент выброса вода в дюкере двигалась в обратном направлении и выходное сечение дюкера обнажалось. В последующем описанное явление повторялось.

Анализ явления привел к выводу, что причиной образования фонтанов является воздух, захватываемый падающей струей и увлекаемый потоком в глубь шахты. При расходах, меньших $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$, захваченный в шахту воздух останавливается на некотором уровне. В этом случае происходит постоянное замещение ранее завлеченного воздуха новыми порциями, т. е. происходит естественная деаэрация. При расходе $1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$ и выше происходит транзитное влечение воздушных пузырьков, которые, достигнув дна шахты, попадают в тоннель, выделяются из потока и скапливаются у верхней шельги тоннеля, образуя постепенно увеличивающийся в объеме воздушный мешок. Увеличение объема пузырей приводит к тому, что их подъемная сила превышает гидродинамическую силу и воздушный мешок вырывается в ствол шахты, занимая большую часть его сечения и начинает двигаться вверх, сильно сокращая пропускную способность. Горизонт в шахте постепенно повышается и поднимает воду в подводящем канале. Объем движущейся воздушной массы в результате понижения давления нарастает и к моменту прорыва воздуха в атмосферу достигает значительной величины. Однако не это является причиной образования фонтана воды. В момент прорыва воздушного мешка в атмосферу в потоке образуется воздушная полость, в которой давление равно атмосферному. В эту полость врывается заторможенный поток из подводящего канала, вследствие чего получается явление, аналогичное разбитой волне при ее соударении со стенкой.

Качественно описанное явление полностью подтвердилось на модели дюкера в масштабе 1 : 20, построенной в гидротехнической лаборатории Арм. НИИГМ.

Ниже автором делается попытка определить теоретически расход воздуха, увлекаемого и транспортируемого потоком, и его накопление в отдельные мешки в зависимости от определенных факторов.

Механизм захвата воздуха падающей струей представляется в следующем виде. Падающая струя, в месте проникновения ее в водное пространство, создает вокруг себя кольцевой валец, вращающийся в направлении скорости струи. В месте проникновения струи в водное пространство образуется подобие роторного насоса, в резуль-

тате воздух защемляется в точке А (рис. 2) по периметру струи и увлекается в глубь потока.

Опытами установлено, что воздух, захваченный потоком, дробится на отдельные пузырьки диаметром 5—7 мм [2].

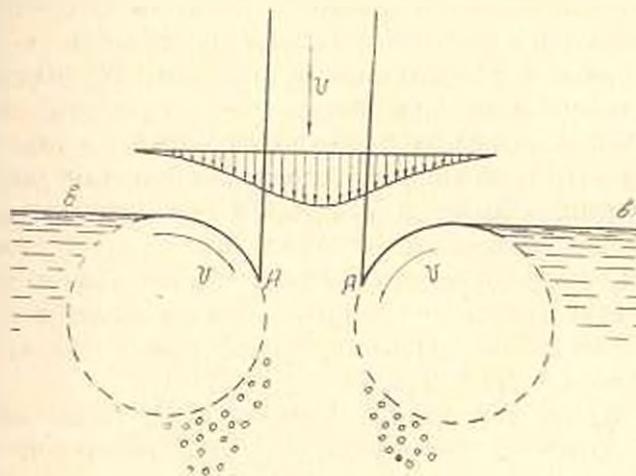


Рис. 2.

При некоторой средней скорости потока в вертикальной трубе, независимо от высоты падения струи и других факторов, воздух, захваченный при образовании скачка, целиком уносится потоком. При скоростях, меньших этой, воздух целиком выделяется из потока, т. е. происходит естественная деаэрация. Средняя скорость потока, при которой происходит сквозное влечение пузырьков воздуха, называется критической скоростью влечения. Критическая скорость влечения по опытам Маркенэ [2] для трубы диаметром 150 мм равна 13 см/сек. Отметим, что полученную опытную зависимость Маркенэ не считал возможным распространить на другие диаметры трубы. Покажем, что данные в отношении критической скорости влечения, полученные на модели, могут быть сопоставлены с натурой с использованием масштабного коэффициента.

При моделировании по Фруду

$$v_k = \sqrt{\lambda} v_{k0} \quad (1)$$

где v_k — критическая скорость влечения на модели; λ — масштабный коэффициент; v_{k0} — критическая скорость влечения в натуре.

Диаметр шахты Котайского дюкера равен $D=1800$ мм, поэтому, приняв данные Маркенэ за модельные, получим

$$\lambda = \frac{1800}{150} = 12.$$

Подставляя это значение в (1), получим,

$$v_k = 45 \text{ см/сек.}$$

чему соответствует расход воды

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v_n = 1,15 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

При длительной работе шахты с расходом $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ явление выброса из шахты не наблюдалось, поэтому скорость в шахте была меньше критической. Однако следует отметить, что измерение расхода в подводящем канале проводилось по рейке при значительных скоростях воды и волнистой поверхности потока, поэтому неизбежны были погрешности в измерении расхода. По опытным данным Маркне при скоростях, близких к критической, при небольшом изменении скорости глубина проникновения пузырьков в глубь потока резко возрастает. В натуре точно установить с какого именно расхода начинается явление выброса из шахты, не представлялось возможным, поэтому без большой погрешности, с нашей точки зрения, можно принять его близким к $1,3 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Полученная по формуле (1) критическая скорость влечения для Котайкского дюкера достаточно близка к натурной, поэтому для определения критической скорости можно воспользоваться формулой (1), представив ее в следующем виде:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{D}{0,15}} \cdot 0,13 = 0,335 \sqrt{D} \quad (2)$$

где D — в метрах, а $v_{кр}$ — в м/сек.

Если принять, что начало транзитного влечения для Котайкского дюкера начинается с расхода $Q = 1,3 \text{ м}^3/\text{сек}$, то критическая скорость будет равна:

$$v_{кр} = \frac{4 \cdot 1,3}{\pi \cdot 1,8^2} = 0,51 \text{ м/сек.}$$

Принимая критическое значение скорости средним между подсчитанным по критерию Фруда и $0,51 \text{ м/сек}$, получим.

$$v_{кр} = \frac{0,45 + 0,51}{2} = 0,48 \text{ м/сек.}$$

тогда (2) примет вид:

$$v_{кр} = 0,360 \sqrt{D} \quad (3)$$

Для того, чтобы деаэрация происходила в пределах ствола шахты необходимо, чтобы скорость воды в ней v_m была бы меньше критической, т. е.

$$v_m < v_{кр} \quad (4)$$

или

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v_m < \frac{\pi D^2}{4} v_{кр} = 0,280 D^2, \quad (5)$$

откуда

$$D > 1,66 \cdot Q^{0,5}, \quad (6)$$

При достаточной высоте шахты, когда гашение энергии падающего в шахту потока происходит не достигая дна шахты, назначение диаметра шахты по условию (6) обеспечит деаэрацию потока в стволе шахты и явление выброса не будет иметь места.

Опытами АрмНИИГиМ [2] на модели дюкера и опытами других авторов [3] установлено, что при скоростях воды больше критической в шахте наступает режим транзитного влечения всех захваченных пузырьков, скорость смеси получается равномерной с равномерным распределением пузырьков по объему. Преобладающий диаметр пузырьков равен 5—7 мм. Эти размеры сохраняются независимо от скорости потока. В опытах ТНИСГЭИ [3] скорости воды достигали 3,5 м/сек.

Исходя из изложенного, нам представляется возможным расход завлеченного в поток воздуха определить по формуле:

$$Q_a = Pd (v - v_{кр}), \quad (7)$$

где d — толщина воздушной пленки; P — периметр падающей струи; v — скорость падающей струи; $v_{кр}$ — критическая скорость транзитного влечения воздушных пузырьков.

Принимая толщину воздушной пленки равной среднему диаметру пузырьков, наблюдаемых в установившемся потоке смеси, т. е. $d = 6$ мм, выражение (7) можно переписать в виде:

$$Q = 0,006P (v - v_{кр}). \quad (8)$$

Примем, что падающая струя имеет круглую форму, тогда можно написать, что

$$P = \sqrt{\frac{4\pi Q}{v}}. \quad (9)$$

Здесь Q — расход воды в м³/сек; $v = \sqrt{2gH_n}$; скорость падения струи; H_n — высота падения струи. (10)

Вследствие сопротивлений аэрации, скорость падения с некоторого значения H_n , можно принимать постоянной. Подставляя (9) в (8), получим:

$$Q_a = 0,0213 \sqrt{\frac{Q}{v}} (v - v_{кр}). \quad (11)$$

Высота падения потока при разных расходах для дюкера может быть определена по формуле:

$$H_n = H_0 - 0,161Q^2. \quad (12)$$

При внедрении пузырьков в глубь потока их объем будет уменьшаться в зависимости от давления, поэтому объемный расход воздуха будет уменьшаться. Примем, что процесс изотермический, тогда

$$p_0 Q_a = p_x Q_{ax} = \text{const}. \quad (13)$$

Учитывая, что $p_x = p_0 \cdot \gamma H_x$, где H_x высота столба воды, из (13) можно написать:

$$Q_{21} = \frac{Q_2}{1 + \frac{\gamma H}{p_0}} \quad (14)$$

Значения H и Q_{21} , вычисленные по формулам (11) и (13), показывают, что скорость движения воды в шахте, начиная со значения $Q = 1,5 \text{ м}^3/\text{сек}$, больше критической скорости влечения, поэтому, начиная с этого расхода происходит транзитное влечение воздуха.

Средняя скорость движения воздушных пузырьков в шахте составляет:

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{ш}} - v_{\text{кр}} \quad (15)$$

Время, которое необходимо для того, чтобы пузырьки достигли дна шахты, считая от начала процесса, будет:

$$T = \frac{H}{v_{\text{ш}} - v_{\text{кр}}}, \quad (16)$$

где H — высота шахты.

Средний объемный расход воздуха по всей высоте шахты определяется из интеграла

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{H} \int_0^H Q_{21} dH = \frac{p_0}{\gamma H} Q_2 \ln \left(1 + \frac{\gamma H}{p_0} \right). \quad (17)$$

Таким образом за время продвижения пузырьков до дна шахты в нем накопится объем воздуха, равный:

$$W = Q_{\text{ср}} T = \frac{p_0}{\gamma} \cdot \frac{Q_2 \ln \left(1 + \frac{\gamma H}{p_0} \right)}{v_{\text{ш}} - v_{\text{кр}}}, \quad (18)$$

из-за чего горизонт в шахте поднимается на величину:

$$\Delta H = \frac{W}{\Omega}, \quad (19)$$

где Ω — площадь сечения шахты.

Коэффициент аэрации в шахте вычисляется по формуле

$$k_2 = \frac{\Delta H}{H + \Delta H}. \quad (20)$$

Теперь перейдем к рассмотрению вопроса накопления воздушного мешка в тоннеле у примыкания с вертикальной шахтой, определению его объема, дополнительных потерь, создаваемых им в системе и условию прорыва его в шахту и движению по стволу шахты.

Для простоты будем принимать сечение воздушного включения по всей его длине постоянным, тогда длина воздушного включения будет:

$$l = \frac{W}{\omega}, \quad (21)$$

где W — объем воздушного включения; ω — площадь его сечения.

Рассмотрим движение воздушного включения в наклонной трубе при наличии в трубопроводе течения воды со скоростью v_0 (рис. 3). Под воздушным мешком, движущимся со скоростью v_1 , скорость течения воды пусть будет v_2 . При движении воздушного мешка со

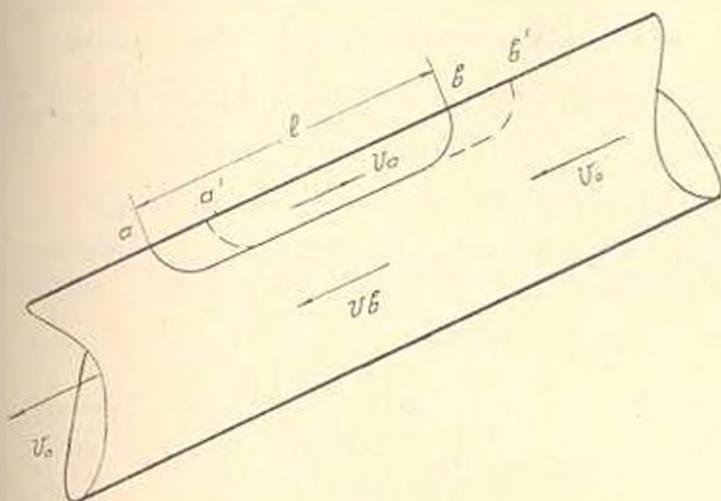


Рис. 3.

скоростью v_1 за ним освободится объем, равный $\omega v_1 \Delta t$. Этот объем должен дополниться объемом воды, вытесненным из верхнего участка трубы оголовком пузыря. Уравнение баланса будет:

$$\omega v_1 + \Omega v_0 = (\Omega - \omega) v_2 \quad (22)$$

откуда

$$v_2 = \frac{\omega v_1 + \Omega v_0}{\Omega - \omega} \quad (23)$$

Перемещение воздушного включения будем рассматривать как явление обтекания со скоростью v_b . Для больших воздушных включений преобладающее значение имеют силы взвешивания $\gamma W l$ и сопротивления обтеканию

$$k \gamma = \frac{v_b^2}{2g}$$

Приравняв их, получим:

$$k \omega \frac{v_b^2}{2g} = W l, \quad (24)$$

где k — коэффициент обтекания воздушного мешка; l — уклон водовода.

Наличие воздушного включения вызовет в водоводе дополнительное сопротивление, равное

$$h_w = k \frac{v_b^2}{2g} + \frac{lv^2}{C^2 R} \quad (25)$$

где C -- коэффициент Шези, принимаемый нами по Маннингу; R -- гидравлический радиус потока под пузырьем.

В дальнейшем рассмотрим следующие два самостоятельных случая.

1. Случай неподвижного воздушного мешка

В рассматриваемом случае необходимо положить $v_2 = 0$, тогда (23) примет вид $v_1 = \frac{Q}{\Omega - \omega}$, где Q расход водовода.

В силу (24) и (21), (25) можно представить в виде:

$$h_w = \frac{Wl}{\omega} + \frac{Wv_1^2}{\omega C^2 R} \quad (26)$$

Подставляя в (26) значения:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/3}, \quad R = \frac{\Omega - \omega}{\gamma}$$

и v_1 по формуле (23), получим

$$h_w = Wl \left[\frac{1}{\omega} + \frac{n^2 \varphi^{1/3} (\omega v_1 + \Omega v_2)}{i \omega (\Omega - \omega)^{5/3}} \right] \quad (27)$$

Имея в виду, что

$$\chi = \frac{\pi D \tau}{360} \quad \text{и обозначив } \omega = \Omega \eta, \quad \text{где } \eta \text{ -- величина, меньшая единицы}$$

и являющаяся функцией от φ , где φ центральный угол, опирающийся на хорду раздела фаз, получим:

$$h_w = \frac{Wl}{\Omega} \left[\frac{1}{\eta} + \frac{n^2 Q^2}{i \Omega^2 (0,25D)^{5/3}} \cdot \frac{\left(\frac{\varphi}{360}\right)^{1/3}}{\eta(1-\eta)^{5/3}} \right] \quad (28)$$

Здесь

$$Q = \omega v_1 \quad (29)$$

Из-за подвижности границы раздела между воздухом и водой, можно допустить, что воздушное включение будет принимать такую форму, при которой потери h_w будут иметь минимальное значение. Как видно из (28), относительное сечение η , при котором h_w будет минимум при неподвижном воздушном мешке, зависит от шероховатости трубы, его диаметра, уклона и расхода воды, проходящего под воздушным включением.

Обозначим значение скобки в правой части выражения (28) через

$$f_{\text{min}}(\eta) = \frac{1}{\eta} + A \frac{\left(\frac{\varphi}{360}\right)^{1/3}}{\eta(1-\eta)^{5/3}} \quad (30)$$

где

$$A = \frac{n^2 Q^2}{i \Omega (0,25D)^{5/3}} \quad (31)$$

выражение (28) можно переписать в следующем виде:

$$h_{\alpha} = \frac{W\tau}{\Omega} f_{\text{мин.}}(\tau). \quad (32)$$

Так как значение $\tau < 1$, поэтому $f_{\text{мин.}}(\tau)$ — всегда больше единицы.

Г. А. Гигиберия [3] предлагает для дополнительной потери в воловоде при наличии воздушного включения следующую формулу:

$$\Delta h_{\alpha} = \frac{W\tau}{\Omega}. \quad (33)$$

Сравнивая формулы (32) и (33) видим, что потери, вычисленные по Гигиберия, меньше фактических. Задав различные значения

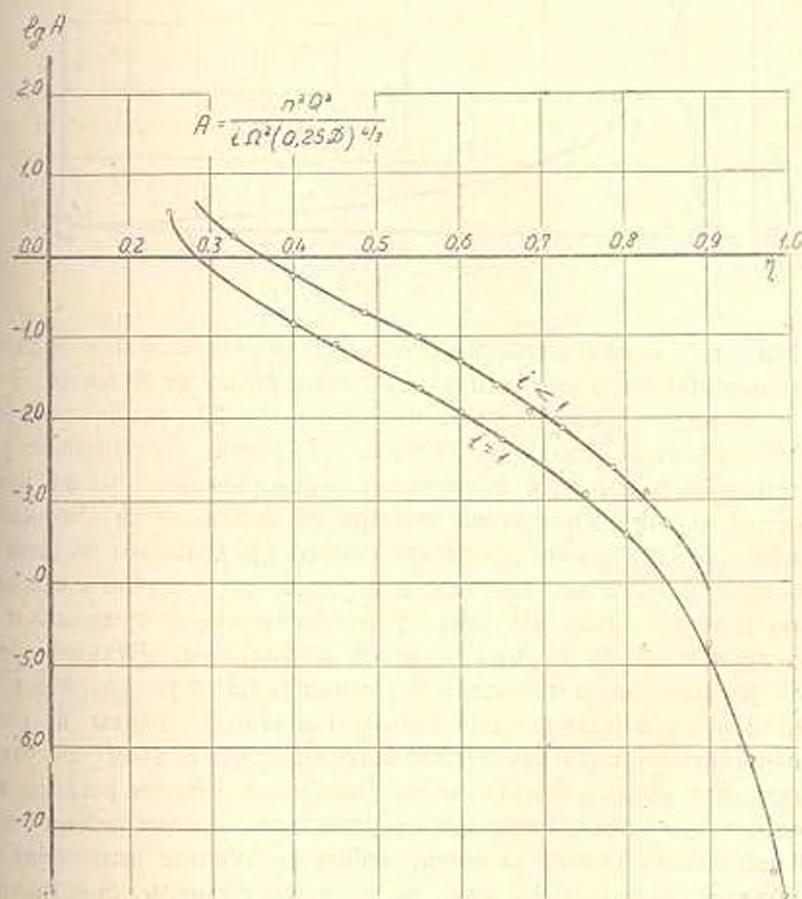


Рис. 4.

ми A по формуле (30) графически определены значения $f_{\text{мин.}}(\tau)$ и соответствующие им значения τ . На рис. 4 приведена зависимость $\tau = \tau(\lg A)$, которая дает возможность по заданному значению A определить значение τ . По полученному из рис. 4 значению τ по (рис. 5) можно определить значение $f_{\text{мин.}}(\tau)$. Из рис. 5, видно, что $f_{\text{мин.}}(\tau)$

может быть во много раз больше единицы, поэтому потери, создаваемые воздушным включением, могут превышать величины, подсчитанные по формуле (33).

Опыты автора на прозрачной модели дюкера показывают следующее. При расходе воды 1,15 л/сек в шахте наступает транзитное влечение воздушных пузырьков, которые выделяются сразу же при повороте в нижнюю ветвь дюкера и скапливаются у стыка с шахтой.

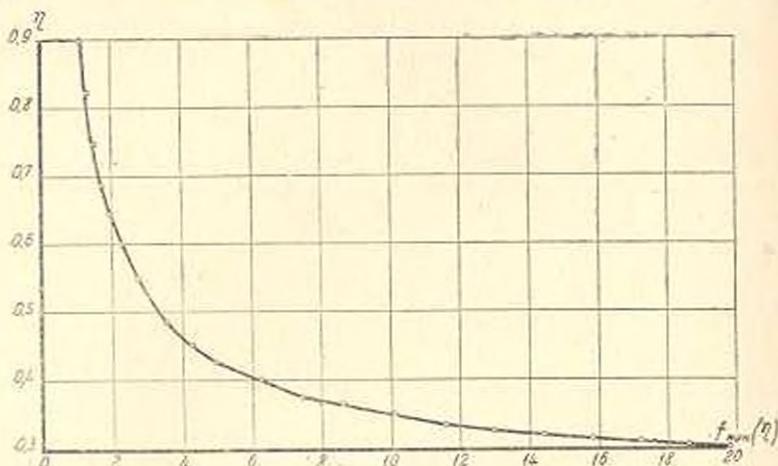


Рис. 5.

При достижении некоторого объема, образовавшийся воздушный пузырь вырывается в ствол шахты и движется по нему вверх. Это явление повторяется непрерывно с периодом 15—20 сек. Явление всплывания наблюдается вплоть до расхода 1,7 л/сек. Дальнейшее увеличение расхода воды, хотя и приводит к увеличению объема воздушного мешка, однако всплывания пузыря не наблюдается. По-видимому в этом случае пузырь не достигает своего предельного объема из-за отрыва воздуха от хвостовой части и уноса его потоком к выходному сечению. В этом случае наступает равновесие между притоком и оттоком воздуха и объем пузыря остается стабильным. Дальнейшее увеличение расхода воды приводит к уменьшению перепада между горизонтами воды в подводящем канале и в стволе шахты, а поэтому к уменьшению расхода захватываемого воздуха. В этом случае приток воздуха к воздушному пузырю становится меньше расхода из него, поэтому его объем начинает сокращаться. За все время опытов мы не наблюдали такого явления, чтобы воздушное включение большого объема сносилось бы вниз по течению целиком, оно значительно сокращается и только в конце небольшой объем воздушных включений сносится потоком вниз по течению.

Предельное значение объема воздушного мешка, превышение которого приводит к всплыванию его против течения воды, будем называть объемом остановки включения при данной скорости течения воды в трубопроводе.

Для вертикальной трубы выражения (30), (31) и (32) соответственно примут вид:

$$f_{\text{мин.}}(\eta) = \frac{1}{\eta} + \frac{A}{\eta(1-\eta)^{1/2}} \quad (34)$$

$$A = \frac{n^2 Q^2}{\Omega^2 (0,25D)^{1/2}} \quad (35)$$

$$h_{\text{ост.}} = \frac{W}{\Omega} f_{\text{мин.}}(\eta) \quad (36)$$

Определив значение η по рис. 4, объем остановки включения можно определить на основании формулы (24):

$$W_0 = \frac{k_0}{i} \cdot \frac{Q_0^2}{2g} \quad (37)$$

В формуле (37) неясным остается вопрос величины коэффициента k . Будем считать, что он складывается из двух коэффициентов: коэффициента на внезапное сужение в начале воздушного меника и на внезапное расширение в его конце.

Данные Вейсбаха по коэффициентам при внезапном сужении дают возможность представить его в виде формулы:

$$\zeta_{\text{суж.}} = 0,5 (0,1 + \eta) \quad (38)$$

Коэффициент потерь при внезапном расширении по Борда выражается формулой

$$\zeta_{\text{расш.}} = \eta^2 \quad (39)$$

Для наклонных труб коэффициент сопротивления k можно принять равным

$$k_n = 0,05 - \eta^2 \quad (40)$$

Для вертикальных труб рекомендуется коэффициент потерь принять равным

$$k_v = 0,5 (0,1 + \eta) + \eta^2 \quad (41)$$

В силу (40) для наклонного трубопровода получим объем остановки включения равным

$$W_{\text{ост.}} = \frac{(0,05 + \eta^2) \eta}{(1 - \eta)^2} \cdot \frac{Q_0^2}{2g\Omega i} \quad (42)$$

Найдем по (42) объем остановки включения для нижней ветви Котайкского дюкера, у которого диаметр нижней ветви $D = 1,6$ м, площадь сечения $\Omega = 2$ м², уклон $l = 0,0025$, коэффициент шероховатости металлической облицовки $n = 0,012$.

По этим данным согласно (31):

$$A = 0,049Q^2 \quad (43)$$

Задаваясь различными значениями Q , по (43) определяем соответствующие значения A и $\lg A$, а по рис. 4 значения η . Этими дан-

ными по формуле (42) вычисляем объемы остановок воздушного включения при разных расходах.

Расчеты показывают, что сечение воздушного мешка по мере увеличения расхода уменьшается, при этом вначале с большей интенсивностью. С увеличением расхода сечение воздушного мешка асимптотически приближается к постоянной величине, равной $\tau = 0,3$. В этом случае рост объема остановки воздушного включения происходит за счет его длины.

Как отмечалось выше, с увеличением расхода, от воздушного мешка в его хвостовой части отрываются пузырьки воздуха и уносятся потоком. Расход воздуха, отрываемого от воздушного мешка и уносимого потоком, можно определить по эмпирической формуле Калинского и Робертсона [4],

$$Q_2 = 0,0066 (Fr - 1)^{0,7} Q_b, \quad (14)$$

где $Fr = \frac{v^3}{gR}$ — число Фруда, отнесенное к гидравлическому радиусу под воздушным мешком; Q_b — расход воды; $v = \frac{Q_b}{\Omega(1-\tau)^2}$ — скорость воды под воздушным мешком; R — гидравлический радиус потока под воздушным мешком.

Подсчеты по формуле (44) показывают, что унос воздуха из воздушного мешка для Котайкского дюзера начинается с расхода $2,5 \text{ м}^3/\text{сек}$. С увеличением расхода интенсивность уносимого воздуха возрастает. При расходе воды $Q = 4,6 \text{ м}^3/\text{сек}$ приток и отток воздуха к пузырю уравниваются, поэтому увеличение его объема не будет иметь места, а при больших расходах приток к пузырю меньше оттока из него, поэтому объем его будет уменьшаться и он рассосется. Дополнительные потери напора благодаря воздушному мешку, подсчитанные по формуле Гигиберия, получаются от 3 до 13 раз меньше, чем по нашей формуле.

С увеличением уклона уменьшается значение A и, как видно из графика рис. 4, увеличивается значение τ . Из рис. 5 видно, что при увеличении τ уменьшается значение $f_{\text{мин}}(\tau)$, поэтому при больших уклонах водовода разница между потерями, подсчитанными по нашей формуле и по формуле Гигиберия, будет уже не столь велика. Для примера рассмотрим водовод, имеющий параметры, аналогичные нижней ветви дюзера, кроме уклона, который в этом случае примем равным $i = 0,25$. В этом случае (43) примет вид:

$$A = 0,00049Q^2.$$

Для $Q = 2,0 \text{ м}^3/\text{сек}$, $A = 0,00196$ и $\lg A = -2,708$, чему по графику рис. 4 соответствует значение $\tau = 0,795$.

Объем остановки включения по формуле (41) будет равен

$$W_0 = 5,3 \text{ м}^3.$$

Значение $f_{\text{max}}(\tau)$ по рис. 3 будет равно $f_{\text{max}}(\tau) = 1,4$ и потери по нашей формуле будут:

$$h_{\text{с}} = \frac{5,3 \cdot 0,25}{2} \cdot 1,4 = 0,92 \text{ м.}$$

а по формуле Гигиберия [3].

$$h_{\text{с}} = \frac{5,3 \cdot 0,25}{2} = 0,66 \text{ м.}$$

Из приведенного примера видно, что с увеличением уклона в сто раз объем остановки включения уменьшается только в $\frac{20,9}{5,3} = 3,95$

раз, а потери возрастают в $\frac{0,925}{0,09} = 102$ раза. Потери, подсчитанные по нашей формуле, в первом случае превышают потери по формуле Гигиберия в 3 раза, а при увеличении уклона в 100 раз разница уже составляет 1,4 раза.

Рассмотрим теперь как будут влиять на объем остановки и на потери увеличение диаметра водовода. Положим, что диаметр водовода увеличен с 1,6 м до 2,25 м, чему соответствует увеличение площади сечения в 2 раза. В этом случае

$$A = 0,00865Q^2,$$

и при $Q = 2,0 \text{ м}^3/\text{сек}$, $A = 0,0346$, $\lg A = -1,462$, чему по рис. 4 соответствует $\tau = 0,63$.

Объем остановки включения

$$W_0 = \frac{(0,05 + 0,63^2) \cdot 0,63}{(1 - 0,63)^2} \cdot \frac{2^2}{19,62 \cdot 4 \cdot 0,0025} = 51,2 \text{ м}^3.$$

По рис. 5 $f_{\text{max}}(\tau) = 2$. Потери напора составят:

$$h_{\text{с}} = \frac{51,2 \cdot 0,0025}{4} \cdot 2 = 0,64 \text{ м.}$$

Из приведенного расчета видно, что увеличение площади сечения водовода в 2 раза при прочих равных условиях приводит к увеличению объема в 2,45 раза, при этом потери уменьшаются в 1,4 раза.

Как видно из приведенных примеров, влияние увеличения сечения водовода более существенно, чем влияние увеличения уклона.

2. Случай перемешающегося воздушного мешка

В рассмотренный выше случай дает возможность определить предельный объем воздушного мешка, при котором он находится в неподвижном состоянии. Небольшое превышение этого объема должно привести к перемещению воздушного мешка, поэтому нужно считать, что объем перемешающегося воздушного мешка известен. В этом

случае, определив из (24) значение η и подставив его в (25), получим:

$$h_w = \frac{Wl}{\Omega} \left[\frac{1}{\eta} + \frac{B \left(\frac{\varphi}{360} \right)^{1.5}}{\eta^2 (1-\eta)^2 k} \right], \quad (45)$$

где

$$B = \frac{2gn^2 W}{\Omega \left(\frac{D}{4} \right)^{1.5}}. \quad (46)$$

Таким образом в (45) переменным является только выражение, взятое в фигурные скобки, поэтому значение минимума h_w зависит от минимума этого выражения.

Для вертикальной трубы (45) примет вид

$$h_{wb} = \frac{W}{\Omega} \left\{ \frac{1}{\eta} + \frac{B}{\eta^2 (1-\eta)^2 k} \right\}. \quad (47)$$

Задавая различные значения для B , графически определяем η , соответствующие минимальным значениям h_w по (45) и (47), при этом для наклонной трубы принят коэффициент потерь при обтекании, как и в случае неподвижного пузыря,

$$k = 0,05 + \eta^2,$$

а для вертикальной трубы

$$k = 0,5 (0,1 + \eta) + \eta^2.$$

Результаты проведенных расчетов приводятся на графике (рис. 6).

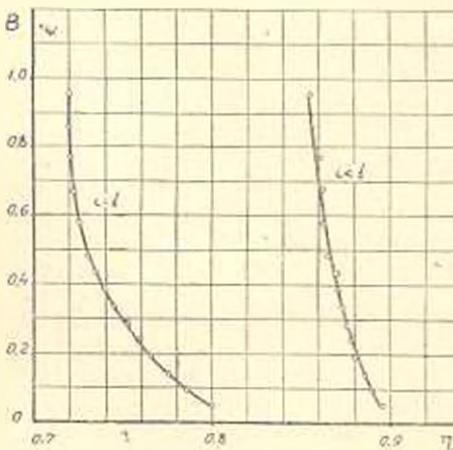


Рис. 6.

По рис. 6 по заданному значению B определяется значение η , при котором h_w становится минимальным. Далее по (24) определяется v_b , а по (22) скорость движения пузыря v_n .

Ниже подсчитана скорость всплывания воздушного пузыря по стволу шахты Котайкского джера. Диаметр ствола шахты $D = 1,8$ м, площадь его сечения $\Omega = 2,55$ м², коэффициент шероховатости бетонной стенки $n = 0,017$. Для рассматриваемого случая.

$$B = \frac{2gn^2 W}{\Omega \left(\frac{D}{4} \right)^{1.5}} = 0,00645 W.$$

Как видно из рис. 6, изменение сечения воздушного пузыря в зависимости от его объема незначительное. Для вертикальной трубы оно изменяется в пределах от $0,8\Omega$ до $0,72\Omega$, причем верхний пре-

дел соответствует меньшему объему; для наклонной трубы изменяется в пределах от 0,9Ω до 0,875Ω. Подсчеты показывают, что с увеличением объема воздушного пузыря его скорость возрастает, хотя и незначительно, а далее становится постоянной.

При экспериментах наблюдалось, что во время движения пузыря по стволу шахты имеет место отрыв обтекающим потоком части воздуха из объема пузыря, который в виде малых пузырьков опускается ниже хвостовой части, а затем опять присоединяется к общему объему. Это явление уменьшает скорость перемещения воздушного пузыря. Наличие воздушного пузыря в стволе шахты вызывает значительные потери, в результате вода в шахте быстро поднимается и начинает подпирать поток в канале. В результате увеличения потерь пропускная способность дюкера уменьшается и горизонт воды у выходного сечения начинает падать. В момент прорыва оголовка воздушного мешка в атмосферу его хвостовая часть находится еще достаточно глубоко в шахте. В этом случае между выходным сечением дюкера и горизонтом воды в шахте создается значительный перепад, в результате чего в дюкере происходит обратное течение воды и горизонт воды в выходной ветви сильно понижается. С прорывом воздуха в атмосферу в шахте образуется полость, в которой давление равно атмосферному, куда устремляется вода из подводящего канала. На некоторой глубине движущиеся навстречу два потока сталкиваются, в результате создается явление прямого гидравлического удара и значительного выброса воды из шахты в виде фонтана. Гидравлический удар несколько смягчается наличием заземленного воздуха между колоннами воды.

Приведенный нами анализ явления захвата воздуха в напорные водоводы и поведение больших воздушных мешков в них конечно не охватывает всего многообразия явления и не претендует на большую точность, однако полученные качественные и количественные результаты достаточно хорошо согласуются с наблюдениями в натуре и на модели дюкера.

АриНИИГАМ

Поступило 15.1.1964

Հ. Բ. ԲԻՆՅԱԼՅԱՆ

ՕՒՍՅՈՒՄ ՄԵՑ ԳԻՐՈՒՆԵԼՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳՅՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՃՆՇՈՒՄԱՅԻՆ ԶՐԱՏԱՐՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆԻՐ ԳՐԱ

Ա մ փ ո փ ո ռ մ

Հոդվածում քննարկվում են Կոտայքի ջրանցքի գրավերի աղբյուրի մասում առաջացող հիդրավիզիոնային անախորժ երևույթների առաջադրման պատճառները և միջոցառումները նրանց դեմ: Այդ գրավերի բարորատոր մոզերի և Սարկենևի փորձերի սպիտակների միջոցով հիմնավորվում է, որ այդ ներձման երևույթը կարելի է մղել, բարելավել ըստ միտադի և այդ հիման վրա:

ստանալ օդի առավելա համար հասանքի կրիտիկական արագությունը Այլ հզորակալով ուսումնասիրված է ներթափանցիկ օդի բաժնակալի ճարտքը և արված են հաշվային բանաձևեր:

Քննարկվում է նաև օդի առկայության պատճառով ջրասարներում հիդրավիկական զիջայրությունների մեծացման ճարտքը և հենվելով մինիմալ կոշտասների հրապիեղի դրա արվում են հաշվային բանաձևեր:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Бунянян Н. Б.* К вопросу о причине аварии аккерон. Тр АрмНИИЧМ, т. 1, Ереван, 1952.
2. *Чантшвиди А. Г.* Исследование некоторых схем подпитывания напорных дериваций ГЭС. Известия ТНКСГЭИ, т. 12 (46), Госэнергоиздат, 1960.
3. *Гизберия Г. М.* Исследования динамики воздушных включений в напорных гидротехнических сооружениях (автореферат). Тбилиси, 1956.
4. *Martins N.* Laboratorio Nacional de Engenharia Civil—Portugal International association for hydraulic Research, 8 th Congress-Montreal August 24 - 29, 1959.