

CALCULO DE LA CAVITACION EN ELEMENTOS DE OBRAS HIDROTECNICAS VERTEDORAS Y DE EVACUACION (II)

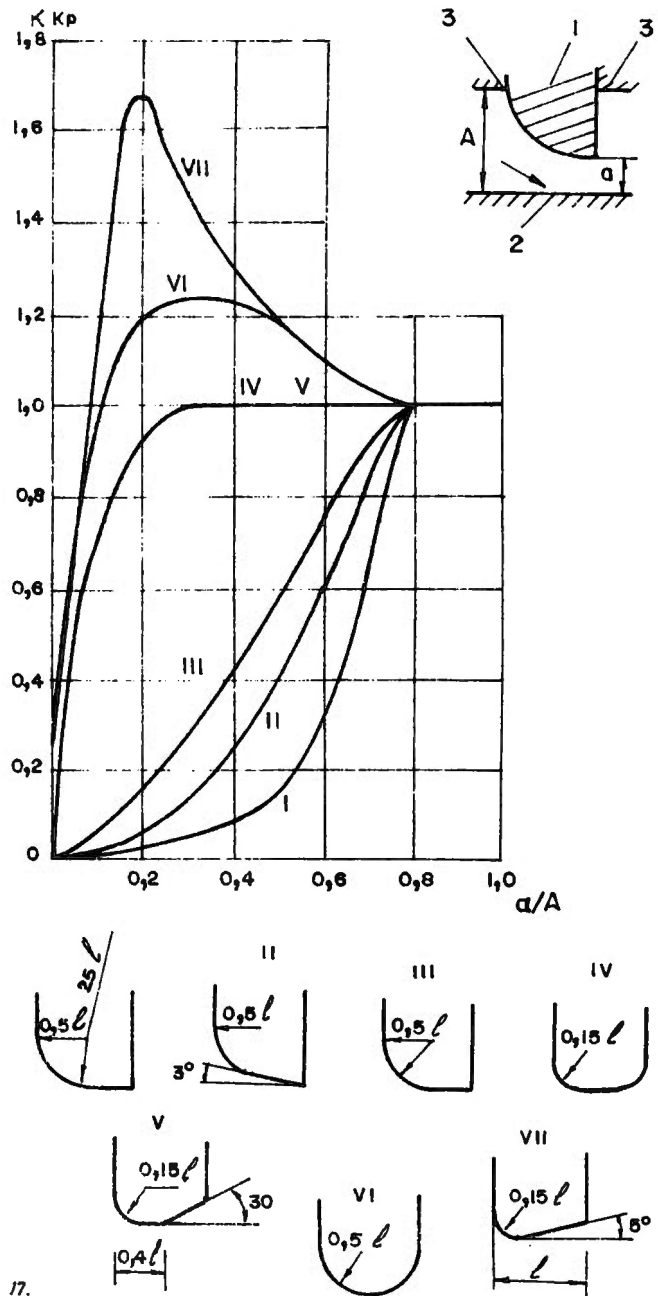
ING. ANATOLI KA/ESHNIKOV-ING. EDUARDO VAZQUEZ

III. Cavitación por grietas en las juntas de las compuertas

Las fugas a través de las juntas de las compuertas con cargas de más de 10-12 m, como regla, provocan la cavitación por grietas. Su aparición depende sustancialmente, de la forma del cabezal de la junta y de las dimensiones de la grieta entre la junta y las superficies que se sellan. La interacción de esta cavitación en la construcción de la compuerta y de las piezas embebidas, prácticamente siempre será inevitable, si no se les da la debida forma. En el caso de que existan grietas bastante pequeñas. las fugas a través de la junta, pueden considerarse no peligrosas desde el punto de vista de la cavitación.

En el dib. 17, para las diferentes formas de cabezales están representados parámetros críticos de la cavitación, que responden a las condiciones de surgimiento de la misma, directamente por debajo del cabezal de la junta. Los valores K_{cr} se han obtenido de forma experimental, de acuerdo con el modelo 1,3 con H_{car} y V_{car} , que se refiere a la sección de salida del objetivo (como para las compuertas parcialmente abiertas). Los datos que se anotan se refieren a las condiciones del inicio de la cavitación por debajo del cabezal de la junta; lo que también está relacionado con la cavitación que tiene lugar por detrás del cabezal (en el chorro que fluye desde la parte inferior de la junta), lo que indican los ensayos, es que prácticamente siempre tiene lugar con cargas de más de 12-15 m, aún en objetivos con un ancho de algunos milímetros.

IV. Métodos para prevenir el peligro de la cavitación por erosión de los elementos



de obras evacuadoras, que funcionan en condiciones de surgimiento probable del fenómeno de la cavitación

Como se indica anteriormente, en varios casos es posible admitir la cavitación en formas que no ofrecen peligro y que son prácticamente aceptables, sin embargo, en el proyecto deben tomarse medidas especiales, a las que podemos hacer referencias.

1. Garantizar tales regímenes de trabajo de la obra en los que la cavitación tenga lugar solamente en la etapa inicial o en la etapa de supercavitación, cuando la intensidad de la erosión por cavitación no resulte grande. En este caso, debemos considerar la necesidad de realizar trabajos de reparación periódicos, así como garantizar la posibilidad de su cumplimiento.

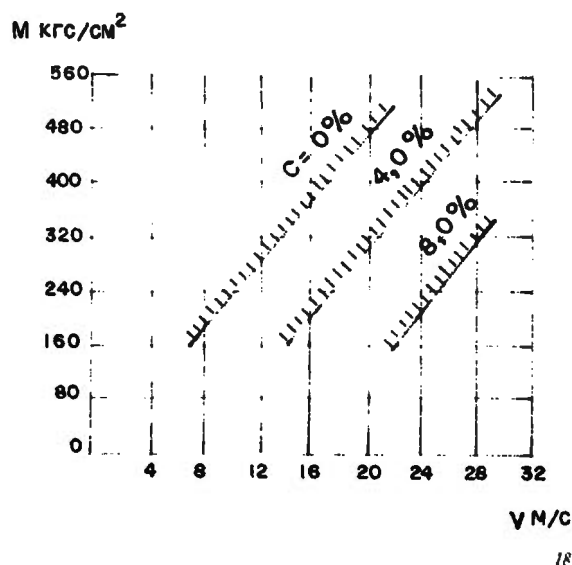
Teniendo en cuenta que en la etapa inicial la cavitación es paralizada, la cavitación por erosión es considerablemente menor que en la etapa de desarrollo y no siempre es peligrosa para elementos de obras de evacuación, tanto temporales, como permanentes, pero que funcionan un tiempo indeterminado, se puede tomar en lugar de la condición (1.4), la siguiente:

$$K \geq K_{cr \text{ er}} \quad 4.1$$

Se recomienda, por lo general, que se tome el valor $K_{cr \text{ er}}$ de una forma aproximada igual a $0,85 K_{cr}$. En algunos casos, los más importantes, $K_{cr \text{ er}}$ pueden ser determinados si se realizan ensayos especiales, en los cuales se determina la situación de la zona de cavitación referida a la superficie de la obra.

Empleo de hormigones con una estabilidad Cavitacional elevada o de revestimientos especiales resistentes a la cavitación (de acero, polímeros, etc.)

En algunos casos, puede evitarse la destrucción por cavitación de las superficies de hormigón, mediante una correcta selección de la calidad del mismo.



En el dib. 18 aparecen los valores aproximados de las velocidades de umbral para las diferentes calidades de hormigón.

Como velocidad de umbral de la calidad dada de hormigón, se toma la velocidad del flujo con la que es posible que surja la cavitación, pero se excluye la erosión por cavitación. Como perspectivas, según la resistencia cavitacional, también deben considerarse los hormigones polímeros y morteros polímeros. A veces, hay que emplear revestimientos de acero, como protección contra la cavitación.

Durante la proyección y ejecución de los revestimientos de polímeros se debe guiar por el punto [9].

3. Conducción del aire o del agua a la zona del vacío

a) Conducción del aire a la región de las presiones disminuidas

Al conducir el aire a las zonas de cavitación, la erosión por cavitación puede disminuirse bruscamente o eliminarse por completo. Se aumentan sustancialmente los valores de las velocidades de umbral para el hormigón.

Durante la conducción del aire a las cámaras de las compuertas, por lo general, se persiguen dos objetivos:

— garantizar un régimen estable sin carga del curso del flujo en el cauce de derivación por detrás de la compuerta;

— combatir la cavitación y las erosiones por cavitación.

El lugar para la conductora de aire y la cantidad necesaria del mismo, se determinan fundamentalmente, según los regímenes hidráulicos en la conductora de derivación y se establecen sobre la base de los cálculos hidráulicos correspondientes que no se exponen en el presente trabajo.

Con una conducción suficiente de aire a la cámara de la compuerta y diámetros correspondientes indicados de las conductoras de aire en el espacio, sobre el chorro se establece un vacío promedio bastante pequeño, de un orden de 0,3-0,5 m de agua. Para combatir la cavitación y la erosión por cavitación, es necesario, que de una forma simple se lleve el aire por detrás de la compuerta o que se garantice su difusión a todas las zonas donde la cavitación puede ser peligrosa. (En los lugares de separación del flujo desde la compuerta, las ranuras o semi-ranuras, los umbrales de fondo, escalones, etc.), (dib. 19). Para aberturas parciales de la compuerta próximo a su parte móvil, como es conocido, tiene lugar una brusca ampliación del flujo. Por esta razón, la parte superior de la zona de separación disminuye en dimensiones y se llena con chorros de agua que se reflejan desde las paredes. Debido a esto, para una aereación segura de estas zonas, es necesario que se creen modelos especiales de ranuras de compuertas planas con la ampliación de las conductoras (aunque sean locales) por detrás de su borde inferior.

La aereación de las zonas de separación del flujo desde las semi-ranuras laterales de las compuertas de segmento con una profundidad de la semi-ranura de 0,05-0,08 de la luz de la compuerta, se realiza desde el espacio por sobre el chorro sin medidas complementarias.

Con vistas a eliminar el peligro indicado, es conveniente que en el cierre de los bordes inferiores de las ranuras de las compuertas planas y por la línea de intersección con el fondo de las semi-ranuras laterales —al lado de las de segmento—, se hagan en el fondo de la conductora escalones (umbrales) con aereación forzada de la zona de separación del flujo, desde los mis-

a— ranuras de compuertas planas con juntas en las partes superiores; a 50°, aereación a través de la ranura desde la región sobre el chorro;

b— ranuras de las compuertas de segmento.

c, d— ranuras de compuertas planas con juntas inferiores;

e— umbral de fondo (escalón) con aereación de la zona a través de la conductora del aire por el espacio que está sobre el chorro;

1— límite del chorro del tránsito

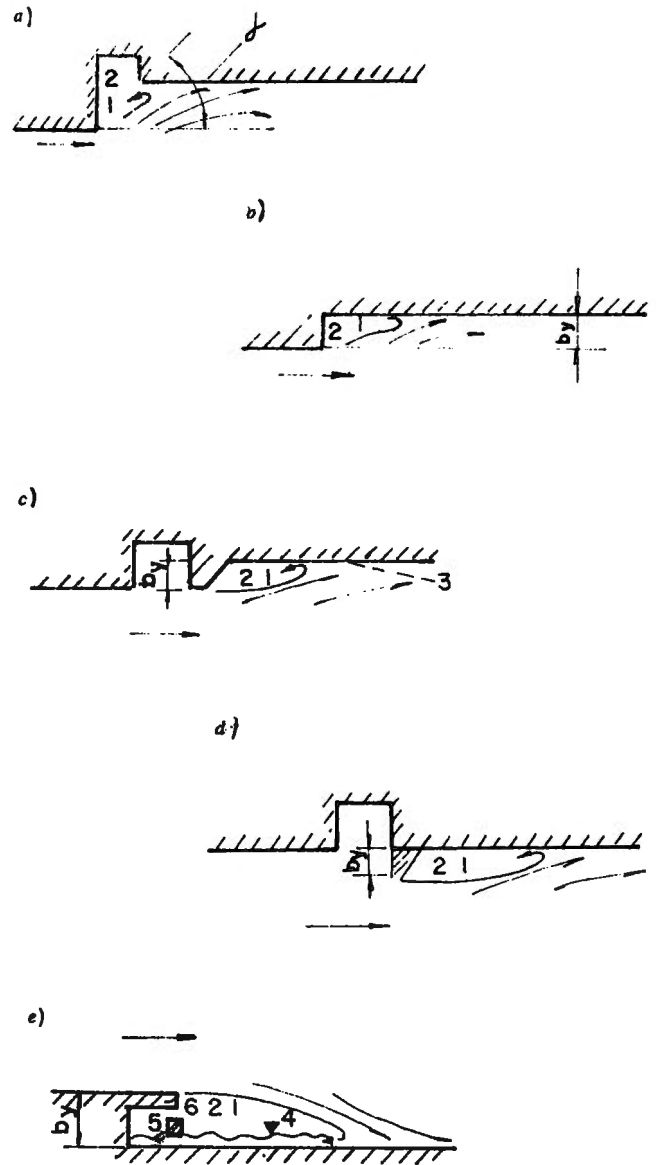
2— zona de aereación

3— contornos posibles de las paredes de la conductora de agua con el restablecimiento del ancho de la luz por abajo de la ranura;

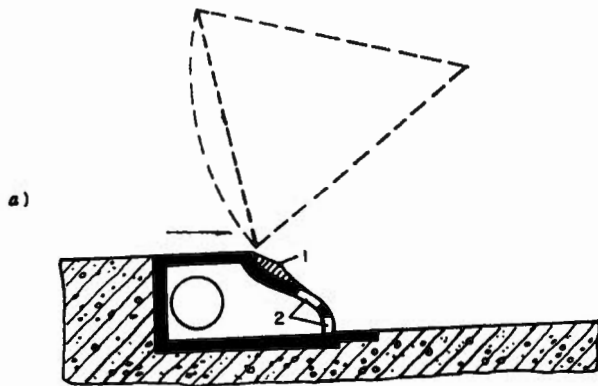
4— capa de agua formada por el flujo inverso producto del golpe del chorro de tránsito sobre el fondo;

5— conductora de aire;

6— orificio para la entrega del aire.



19: Esquemas de la construcción de ranuras y umbrales para la aereación de zonas locales de la separación del flujo en las cámaras de las compuertas.



ductora de aire. En casos de importancia, la selección de las construcciones de la conductora de aire debe realizarse de forma experimental. Un ejemplo de investigaciones realizadas en la construcción de este género se da en el dibujo 20.

El consumo de aire Q_a abarcado en la zona de separación del flujo por detrás del umbral, ranura o escalón, puede evaluarse con la reserva de acuerdo con la fórmula:

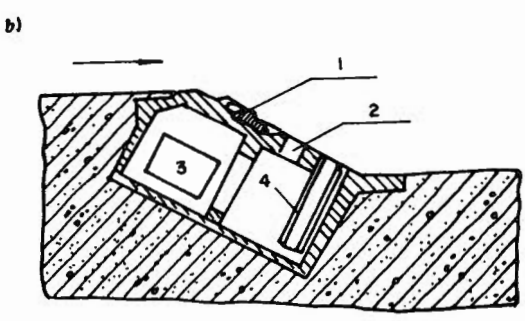
$$Q_a = 0,1 \text{ } h_y \text{ } l_y \text{ } V_{prom} \quad (4.2)$$

donde:

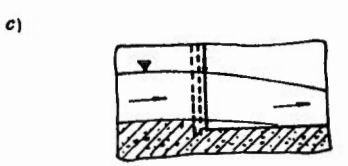
h_y — es la altura del escalón, umbral

l_y — es la longitud del escalón, ranura, umbral

V_{prom} — velocidad promedio del flujo delante de la zona de separación.



La fórmula (4.2) da resultados más auténticos con $0,05 \leq h_y/h \leq 0,15$, donde: h — es la profundidad del flujo de tránsito (altura de la conductora de agua) delante del escalón. Esto responde prácticamente a todas las alturas empleadas de los escalones. La velocidad del aire en las conductoras no debe sobrepasar de 60 m./seg.



Planta

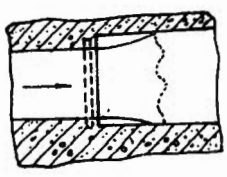


FIG. 20

20: Ejemplo de soluciones constructivas referentes a la conducción del aire en las cámaras de las compuertas, a y b— son los umbrales de las compuertas de segmentos; c— cambio del fondo y de las paredes de la conductora por detrás de la compuerta con escalones y umbrales.

mos, a través de las conductoras de aire. Los dispositivos que conducen aire, en estos casos, deben estar equipados con orificios especiales o tubos para el desagüe del agua desde la con-

En las cámaras de las compuertas de carga elevada, frecuentemente se deben eliminar roturas en el plano de las paredes o en el fondo para la transición desde el lugar de instalación de la compuerta hasta el tramo de derivación de la conductora. Con velocidades elevadas del flujo, estas roturas son fuente de peligro de cavitación. Debido a esto, además de estas roturas, aún bajo ángulos pequeños se recomienda realizar la conjugación de un plano con otro, también con la ayuda del escalón, un escalón análogo por debajo de la compuerta, con aereación de las zonas de separación del flujo.

Asimismo, este escalón utilizado como medio de protección por erosión producto de la cavitación debe ser eliminado por todo el perímetro mojado de la sección, tanto en el fondo como en las paredes, independientemente de la ubicación

de la rotura en el fondo o en las paredes del tramo. Cuando la salida del flujo se realice por debajo de la compuerta, tiene lugar en una conductora sin carga cerrada, comparativamente corta (de no más de 30-50 de profundidad del flujo), el gasto sumario del aire que se incorpora a la zona de separación por detrás de todas las ranuras, semi-ranuras y escalones en la cámara de las compuertas y directamente por detrás de ella, que se evalúa de acuerdo con la fórmula (4.2); debe ser considerada al calcular las dimensiones de la conductora principal del aire que llega a la cámara de la compuerta, o sea, adicionando al gasto del aire necesario para la autoaereación del flujo y la ventilación del espacio sumergido.

Durante la salida a las conductoras muy largas y cerradas sin carga (con una longitud de más de 100 profundidades del flujo), con un cálculo de las principales conductoras de aire (pozos aereados), deben considerarse, además, gastos por ventilación en el espacio por encima del agua, bien el gasto sumario del aire en la cámara de la compuerta o el gasto por autoaereación, en dependencia de cuál de estos gastos sea el mayor.

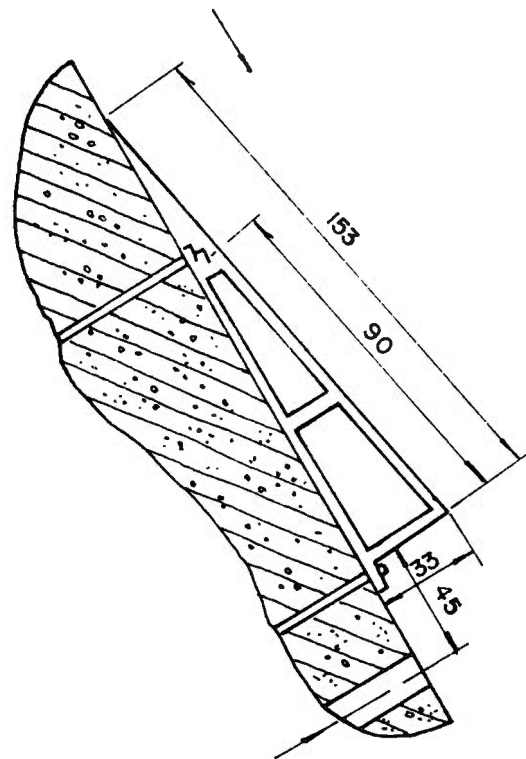
Capa próxima a la pared de los vertedores (de los aliviaderos)

El Departamento Científico Investigativo del Guidroproekt ha elaborado la construcción de un aliviadero que no contempla el fenómeno de la cavitación, con el borde del vertedor escalonado, en el cual se sitúan pequeños umbrales de desviación del chorro del tránsito.

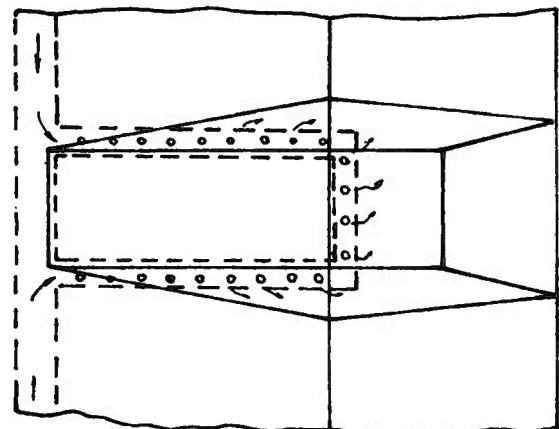
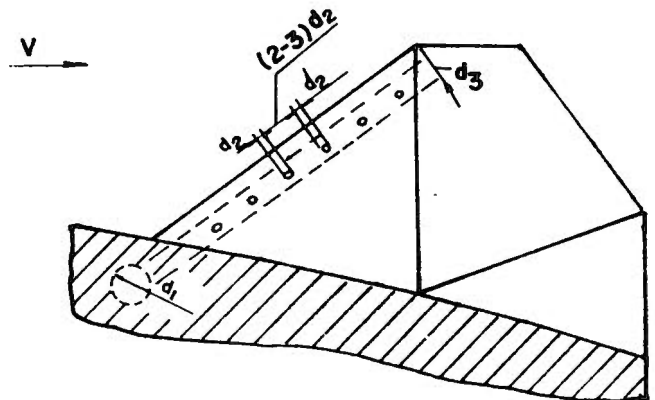
Por detrás de los umbrales pequeños se forman zonas del vacío, en las que entra el aire desde la atmósfera (por gravedad).

Las dimensiones de los umbrales pequeños y conductoras de aire del sistema, así como también la distancia entre los umbrales pequeños, se seleccionan mediante investigaciones experimentales (en modelos de escalas suficientemente grandes), por el cálculo se garantiza el contenido de aire en la capa, en la pared de no menos de 7-8 %, que según los datos existentes por las investigaciones excluye la posibilidad de que se produzca la erosión por cavitación.

Esta construcción fue realizada en la CHE de Kureksk.

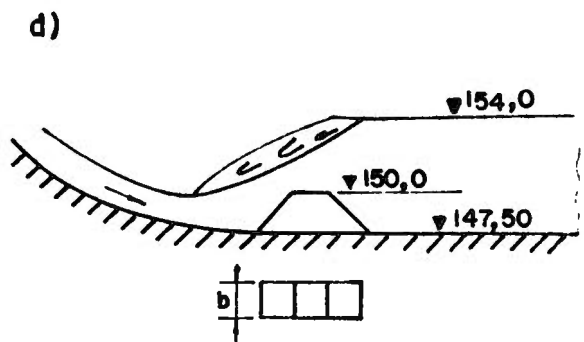
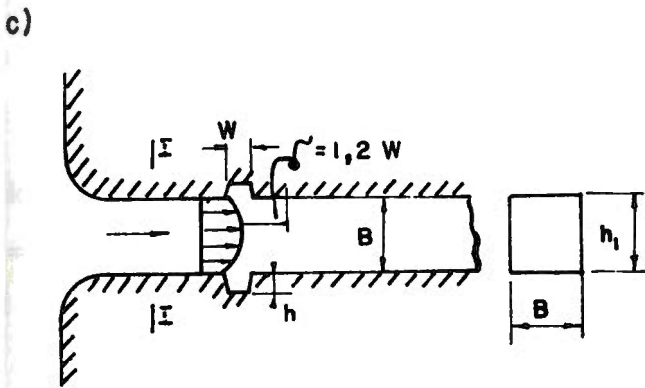
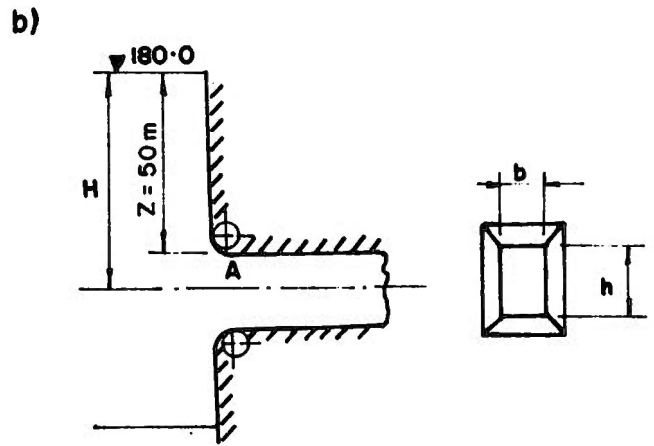
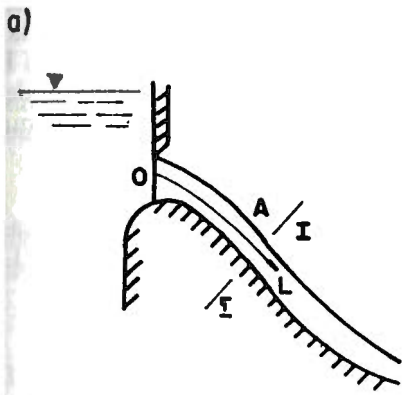


21: Trampolines-aereadores instalados en el vertedor de la CHE de Brotsk. Las dimensiones se dan en cm.



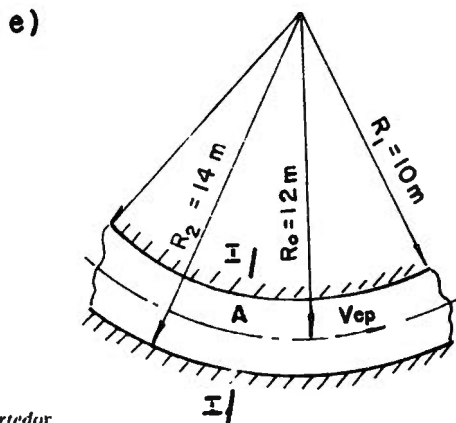
22: Esquema de los muros amortiguadores del conjunto hidráulico de Charvausk conduciendo el aire a la región del vacío.

$d_1 = 0,35 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$, $d_3 = 0,18 \text{ m}$



$B = 5 \text{ m} ; W = 0,6 \text{ m} ; h = 0,4 \text{ m}$

23: Esquemas para el cálculo de la cavitación



a) en el vertedor

b) en los aliviaderos de fondo

c) en ranuras de compuertas planas

d) en disipadores de energía

e) en superficies curvilíneas

h) gráfico de dependencia de los parámetros críticos de los disipadores por el radio de curvatura de los bordes de la parte superior y distancias entre ellos

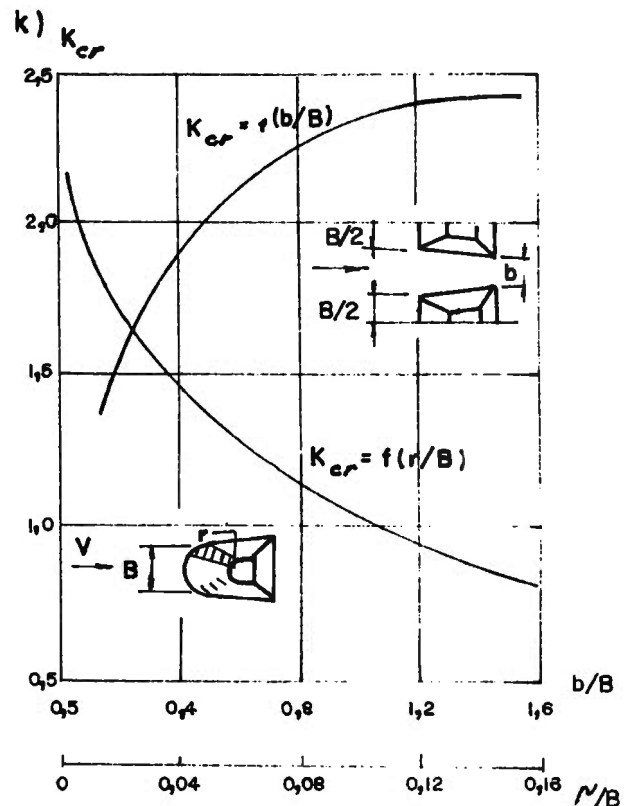
h — distancia entre los disipadores

r — radio de curvatura de los bordes delanteros

B — ancho del disipador

K_{cr} — parámetros críticos de la cavitación

parámetros críticos de la cavitación



Los trampolines-aeradores con tubos pequeños conductores de aire pueden instalarse en las presas vertedoras para prevenir la erosión por cavitación, relacionada con el flujo currentilíneo de las irregularidades en sus bordes. Estos aeradores han sido instalados y ensayados en la presa de la CHE Brorsk (dib. 21) y dieron resultados positivos (10).

Disipadores de energía y muros amortiguadores

Mediante la conductora del aire a las zonas del vacío, en los disipadores de energía, puede eliminarse completamente el peligro de la erosión por cavitación (2.8). La entrega del aire en este caso tiene lugar automáticamente a través de la conductora de aire, comunicada con la atmósfera y que posee en los disipadores ramificaciones con orificios en los bordes de los mismos en los lugares de formación del vacío. El empleo de este método está indicado en el ejemplo de los muros amortiguadores en el aliviadero del conjunto hidráulico de Charkavsk (dib. 22). La entrega de 5-7 % del aire (relativo al gasto condicional calculado de acuerdo con la velocidad promedio y del área de la sección de los disipadores) a la zona del vacío, elimina completamente la erosión por cavitación. Este método puede emplearse para disipadores de otros tipos.

Empleo de disipadores "no erosionados", muros amortiguadores y deflectores

Los disipadores en perspectiva son los "no erosionados" (de supercavitación), deflectores y muros amortiguadores que funcionan cuando existe cavitación con torbellinos que no se enclavan en las paredes duras que excluyen el fenómeno de la erosión en las mismas, por ejemplo, disipadores y muros amortiguadores que se dan en el dibujo 13 (8).

V Ejemplos de cálculo para el pronóstico del inicio de la cavitación en elementos de los aliviaderos

Ejemplo 1:

Revisar el surgimiento de la cavitación en la superficie con una altura de 3 mm, situada en el vertedor (dib. 23a, sección I-I), si la profundidad del flujo en esta sección es igual a 5 m, la rugosidad de la superficie del hormigón del

vertedor $\Delta = 1$ mm, la longitud del tramo de desarrollo de la capa límite OA = 5,0 m, la velocidad promedio del flujo en la sección I-I igual a 24,9 m/s, la temperatura del agua de 15 °C, y la cota sobre el nivel del mar es de 120 m.

El parámetro crítico de la cavitación del saliente ($\alpha = 90^\circ$), de acuerdo con el dibujo 11, es igual a:

$$K_{cr} = 0,466 \sqrt[3]{3 \alpha^\circ} = 2,1$$

$$H_{car} = H_{atm} + h = 10,2 + 5 = 15,2 \text{ m}$$

donde:

$$\begin{aligned} H_{atm} &= 10,33 \text{ m} - \frac{\text{cota}}{900} = 10,33 - \frac{120}{900} = \\ &= 10,2 \text{ m} \end{aligned}$$

con $t = 15^\circ$, $H_{cr} = 0,17$ m (tabla 2)

De acuerdo con la condición de ausencia de cavitación (1.3)

$$K = \frac{H_{car} - H_{cr}}{V^2 \text{ car}/2g} \geq 2,1 \text{ o sea}$$

$$\frac{V_{car}^2}{2g} \cdot 2,1 \leq H_{car} - H_{cr}$$

$$V_{car} \leq \sqrt{\frac{19,62}{2,1} (15,2 - 0,17)} = 11,8 \text{ m/s}$$

Por consiguiente, de acuerdo con la condición de que no haya cavitación, la velocidad del tre-

pado de la ola en el saliente de 3 mm de altura en la sección I-I no debe sobrepasar de 11,8 m/s.

Para determinar la velocidad del flujo o la altura de la irregularidad (V_{car}) empleamos el dibujo 16 y la fórmula 2,7.

En el dibujo 23a L es la longitud del incremento de la capa límite, el punto 0 es el inicio condicional del cálculo.

El valor de la velocidad V_y a una distancia de 3 mm desde la superficie del vertedor se determina por la fórmula 2,7.

$$V_y = \frac{V_{prom}}{1,1} \sqrt{\xi_1 \xi_2}$$

donde:

ξ_1 y ξ_2 — se hallan correspondientemente en dependencia del valor δ/Δ y Y/Δ según los gráficos del dib. 10.

La altura de la irregularidad $Z_H = 3$ mm

$$y = \tau_H + \Delta = 3 + 1 = 4 \text{ mm}$$

$$\frac{y}{\Delta} = \frac{4}{1} = 4,0; \xi_1 = 1,2 \cdot 10^2, \text{ ya que la}$$

irregularidad se halla a una distancia $L = 5,0$ m (desde el punto 0, dib. 10), entonces, con

$$\frac{L}{\Delta} = 5,10^3, \xi/\Delta = 9,10, \xi_2 = 2,2 \cdot 10^{-3},$$

$$V_y = \frac{24,9}{1,1} \sqrt{1,2 \cdot 10^2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3}} = 11,63 \text{ m/seg}$$

El parámetro crítico de la cavitación será igual a:

$$K = \frac{10,2 + 5,0 - 0,17}{\frac{11,62}{19,62}} = 2,18 > K_{cr} = 2,1$$

En esta irregularidad no surgirá la cavitación. En el caso de que el parámetro real de la cavitación fuera menor que el crítico, sería necesario atenuar las irregularidades con vistas a disminuir el parámetro crítico de la cavitación.

Ejemplo 2:

Seleccionar el cabezal de entrada de la toma partiendo de la condición que no haya aparición de la cavitación en él, con las siguientes características hidráulicas (dib. 23b) $Z = 50$ m, sección del tubo $b \times h = 3 \times 5$ m, la temperatura del agua $t = 10^\circ$, la cota de la parte superior del tubo de 130 m y la velocidad promedio del agua en el tubo de 18,9 m/s.

$$K = \frac{H_{car} - H_{cr}}{V_{car}^2/2g} = \frac{H_{atm} + Z - H_{cr}}{V_T^2/2g}$$

Aquí se toma $V_{car} = V_T$ — velocidad promedio en el tubo con $t = 10^\circ$, $H_{cr} = 0,13$ m col. de agua (tabla 2)

$$H_{atm} = 10,33 \text{ m} - \frac{\text{cota}}{900} = 10,33 - \frac{180}{900} = 10,18 \text{ m}$$

$$K = \frac{10,18 + 50 - 0,13}{\frac{18,92}{19,62}} = 3,31$$

Si se da un cabezal circular, el radio trazado $r = 1$ m, entonces $r/h = 1/5 = 0,20$, según el dibujo 2, con $r/h = 0,20$, $C_p \text{ max} = 2,35$, y $\delta \text{ sup max} = 0,09$, entonces $\delta \text{ max} = \delta \text{ sup max}$, $K_v = 4,0, 0,9 = 0,36 C_p \text{ max} = C_p \text{ max} + \delta \text{ max} = 2,35 + 0,36 = 2,71$.

Por consiguiente, $K = 3,31 \geq C_p \max$; la cavitación en un cabezal semejante puede existir con un radio de la esfera adoptado es $r = 1,0$ m.

Ejemplo 3:

Comprobar la aparición de la cavitación en las ranuras de la compuerta plana (con una abertura total de la compuerta) de la conductora profunda, y seleccionar el modelo de ranura en el que no habrá cavitación si la velocidad promedio en la conductora es de 18 m/s la presión piezométrica de 5,05 m, la temperatura del agua de 10 °C y la cota sobre el nivel del mar de 120 m.

$$K = \frac{H_{car} - H_{cr}}{V_{car}^2 / 2g} = \frac{14 - 0,13}{\frac{18^2}{19,60}} = 0,84$$

donde:

$$H_{car} = H_a + H = 9,00 + 5,05 = 14,05 \text{ m}$$

$$H_{atm} = 10,33 - \frac{\Delta}{900} = 10,33 - \frac{1200}{900} = 1,33 \text{ m}$$

$$H_{cr} = 0,13 \text{ m con } t = 10^\circ \text{C}$$

Con las dimensiones dadas de las ranuras y de la conductora de agua (dib. 23c), de acuerdo con la fórmula (2,5), obtendremos:

para el borde superior de la ranura:

$$K_{cr, b} = K_{cr, v} \left[1 + 0,65 \left(\frac{W}{h} - 1 \right) \right] K_{db,}$$

de acuerdo con la tabla II, punto 2

con $Z_H = h = 0,4 \text{ M} < \delta = y, 2 \text{ W} = 0,72 \text{ m}$

$$K_{cr, v} = \left(\frac{Z_H}{\delta} \right)^{3/4} = \left(\frac{0,4}{0,72} \right)^{3/4} = 0,95$$

$$H_{db} = 0,55 \text{ con } \frac{W}{h} = 0$$

$$K_{cr, b} = 0,95 \left[1 + 0,65 \left(\frac{0,6}{0,4} - 1 \right) \right]$$

$$0,55 = 0,95 \cdot 1,325 \cdot 0,55 = 0,65$$

para el borde inferior según el punto (2,6):

$$K_{cr, a} = A_K \cdot K_b \left[1 + 0,65 \left(\frac{W}{h} - 1 \right) \right]$$

según el dibujo 7 $A = 1,2 \times$

$$\times \left(1 - 10 \frac{d}{W} \right) \text{ con } \frac{d}{W} = 0 \quad A =$$

$$= 1,2 \text{ con } \frac{W}{\delta} = 0,835, K_w =$$

$$= 0,35, \text{ y con } b/h = \frac{5}{0,4} = 12,5, K_b = 1,0$$

$$K_{cr} = 1,2 \cdot 0,35 \cdot 1,0 \left[1 + 0,65 \left(\frac{0,6}{0,4} - 1 \right) \right] = 0,42 \cdot 1,325 = 0,55$$

Ya que $K = 0,84 > K_{cr,b} = 0,65 > K_{cr,n} = 0,55$, evidentemente, con la compuerta totalmente abierta, no surgirá la cavitación.

Ejemplo 4:

Los disipadores de energía del tipo piramidal (dib. 23) funcionan en condiciones de salto hidráulico con una velocidad promedio en la sección comprimida de 16 m/s, la profundidad del agua sobre los disipadores es de $h = 4$ m, la temperatura del agua de 25 °C, y la cota de la parte superior del disipador sobre el nivel del mar de 150 m. Es necesario comprobar si surge el fenómeno de cavitación en ellos.

Calculamos el parámetro de la cavitación:

$$K = \frac{H_{car} - H_{cr}}{V_{car}^2/2g} = \frac{H_{atm} + h - H_{cr}}{V_{car}^2/2g} =$$

$$= \frac{10,16 + 4 - 0,32}{\frac{16^2}{19,62}} = 1,07$$

El parámetro crítico de cavitación del disipador de tipo piramidal (dib. 12,y) es igual a 2,1, ya que $K = 1,07 < K_{cr} = 2,1$; con las condiciones hidráulicas dadas en este tipo de disipador surge la cavitación.

Para su eliminación es necesario emplear otro tipo de disipador o redondear los bordes delanteros $r/b = 0,11$ (dib. 23k), donde: r – es el radio de redondeo; b – es el ancho del disipador.

Como resultado, el parámetro crítico de la cavitación de este disipador (dib. 23d) disminuye hasta $\approx 1,0$, entonces $K_{cr} = 1,0 < K = 1,07$, y no habrá cavitación.

Puede seleccionarse otro tipo de disipador para las condiciones hidráulicas dadas, admitiéndose la cavitación, pero empleando el disipador de "supercavitación" del tipo que se plantea en el dibujo 13.

Ejemplo 5:

Se debe comprobar la posibilidad de que surja la cavitación en la superficie convexa de la conductora curvilínea (dib. 23e), si sobre ella hay una irregularidad en forma de escalón (punto A). La velocidad promedio en la conductora es de 18 m/s, la temperatura del agua de 10 °C, la cota sobre el nivel del mar de 100 m, y la presión piezométrica en la sección I-I ha sido calculada por la ecuación de Bernulli.

$$\frac{P}{\gamma} = 5 \text{ m}$$

La componente de la presión en el techo (dib. 23e), en el punto A de la sección I-I está condicionada por la aceleración de las aceleraciones normales y se determina por la relación 2.9.

$$\frac{P^*}{\gamma} = \frac{V^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{R_v}{R_v - y} \right)^2 \right] =$$

$$= \frac{18^2}{19,62} \left[1 - \left(\frac{2}{12,2} \right)^2 \right] =$$

$$= 7,2 \text{ m}$$

La presión excesiva en el punto A, teniendo en cuenta $\frac{P^*}{\gamma}$ y las pulsaciones de presión será según el punto 2,17:

$$\left(\frac{P}{\gamma} \right)_A =$$

$$= \left(\frac{P}{\gamma} \right)_{I-I} + \frac{P^*}{\gamma} - 3 \delta \max \frac{V^2}{2g} =$$

$$= 5,0 - 7,2 - 3 \cdot 0,018 \cdot 16,5 = 3,09 \text{ m}$$

asimismo, $\delta_{\text{máx}}$ ha sido determinado de acuerdo con el dibujo 16 con $R_0 = 12$ m, $h = 4$ m y $\beta = 60^\circ$ (β - ángulo de giro de la conductora).

De este modo, en el punto A hay un vacío $h_{\text{vac}} = 3,09$. De acuerdo con la condición (1.1) es admisible en caso que no haya irregularidades.

$$h_{\text{vac}} < H_a - H_{\text{cr}} = 10,23 - 0,13 = 10,1 \text{ m}$$

Para el cálculo del surgimiento de la cavitación en la irregularidad (escalón) en el punto A, consideramos el parámetro de la cavitación de acuerdo con la fórmula 2.20 como aproximadamente, tomado como $V_{\text{cr}} = \bar{U}_x$ - es la velocidad en la pared interior de acuerdo con la fórmula 2.11.

con $y = \left(-\frac{h}{2} + 3 \right)$ (irregularidad de una altura de 3 mm).

$$\bar{U}_x = \frac{V_0 R_0}{R_0 + y} C^B = \frac{18 \cdot 12}{12 - 1,997} \cdot$$

$$0,004^{0,8} = 16,3 \text{ m/s}$$

donde: según la tabla 6 $B = 0,051$ con

$$h/R_0 = \frac{4}{12} = 0,33 \text{ y } C = 0,004 \text{ con } y/\frac{h}{2} =$$

$$= 0,998$$

Finalmente obtendremos:

$$K = \frac{H_a - h_{\text{vac}} - H_{\text{cr}}}{\bar{U}_x^2 / 2g} = \frac{10,23 - 3,09 - 0,13}{\frac{16,3^2}{19,62}} =$$

$$= 0,51$$

Aquí:

$$H_{\text{atm}} = 10,33 - \frac{\text{cota}}{900} = 10,33 - \frac{100}{900} =$$

$$= 10,23 \text{ m}$$

De acuerdo con el dibujo 11, el parámetro crítico del escalón $K_{\text{cr}} = 1,0$ (con $Z_H \geq \delta$),

donde:

δ - es el espesor de la capa límite en la superficie convexa o

Ya que $K < K_{\text{cr}}$, en esta superficie no surge la cavitación.

BIBLIOGRAFIA

1. Rozanov, N.P.: Cuestiones relacionadas con la proyección de obras evacuadoras, que trabajan en condiciones de vacío y con grandes velocidades del flujo. Gosencogizdat, 1959.
2. Rozanov, N.P., Kaveshnikov, A.T. y Lisenko, P.E.: Recomendaciones sobre el control de la cavitación durante la proyección de aliviaderos de obras hidrotécnicas. II-38-75. Leningrado, 1976.
3. Galperin, R.S., Oskolkov, A.G., Semenkov, V.M. y Tzedrov, G.N.: Cavitación en las obras hidrotécnicas, Moscú, 1977.
4. Kaveshnikov, A.T.: Sobre la erosión por cavitación de disipadores y muros amortiguadores. Hidrotécnica y Mejoramiento, No. 9 de 1971.
5. Rozanov, N.P., Kaveshnikov, A.T.: Investigaciones sobre la erosión por cavitación del amortiguador y de los tramos de los pilares de la presa de la CHE Sajano-Shushinsk. Investigaciones Científicas sobre hidrotécnica en 1970. L. O. "Energuia" 1971.
6. Medidas para mejorar las características cavitaciones de los muros amortiguadores del flujo en un depósito de agua inclinado. Information Express "Cuestiones generales sobre Riego y Drenaje e Hidráulica". No. 4, 1971.
7. Kaveshnikov, A.T., Lentiayev, L.D. Investigaciones sobre la aereación del flujo en el aliviadero de explotación de la presa de la CHE. Sayano-Shushinsk. "Construcción Hidrotécnica", No. 1, 1978.
8. Kaveshnikov, A.T., Rozanov, N.P. Dispositivo de disipación del bief inferior. Certificación de autor No. 384966. Descubrimientos, invenciones, muestras industriales, marcas de mercancías, no. 75. 1973.
9. Recomendaciones metodológicas sobre la tecnología para la preparación del hormigón sometido a la acción de la cavitación y de revestimientos resistentes al desgaste de obras hidrotécnicas. 1758-72, Dpto. de Leningrado, "Energuia", 1972.
10. Semenkov, V.M.: Resultados de las observaciones referentes a la evacuación del gasto a través de la presa vertedora de la CHE de Bratsk. Reunión temática de coordinación sobre la hidráulica de aliviaderos de carga elevada BCC-68. Tesis de informes y comunicaciones. parte I. Dpto. de Leningrado, Energuia, 1968.