

2/9

IZVESTIJA
VSESOJUZNOGO NAUČNO-ISSLEDOVATEL'SKOGO INSTITUTA
GIDROTEHNIKI IMENI B.E. VEDENEJEVA

Bd 78 (1965), 304-317

Rozanov, N.P., Prof., Dr. d. techn. Wiss., K.K. Šal'nev, Dr. d. techn. Wiss., P.P. Mojs, Doz., Kand. d. techn. Wiss., N.N. Paškov, Kand. d. techn. Wiss., G.A. Vorob'ev, Ing.:

Moskovskij inženerno-stroitel'nyj institut imeni V.V. Kujbyševa
(Moskauer Kujbyšev-Institut für Bauingenieure)

VORAUSSAGE DES KAVITATIONSBEGINNS AN BETONBEREICHEN UNEBENHEITEN

Das Problem der Kavitation von Oberflächenunebenheiten bei Entlastungsanlagen ergab sich im Zusammenhang mit Kavitationsschäden, die an einer Reihe von Hochdruckwasserbaukomplexen beobachtet wurden [L. 1, 2, 3 u.a.]. Die durch Kavitationserosion verursachten lokalen Schäden erschweren den normalen Betriebsablauf von Entlastungsanlagen [L. 3 u.a.] und machen die Anlage bisweilen betriebsunfähig.

Eine der Hauptursachen für das Auftreten von Betonoberflächenunebenheiten bei Entlastungsanlagen sind Mängel in der Arbeitsausführung: Stufen bei den Verschalungsstoßabschnitten, Abweichungen der Verschalung von der Projektierungslinie, aus dem Beton herausragende Bewehrungsstäbe, Spalten, Schlaglöcher usw. Die Praxis des Wasserbaus hat gezeigt, daß die genannten Ausführungsmängel bei Hochdruckentlastungsanlagen unzulässig sind, da gerade diese Mängel häufig die Grundursache für die Erscheinung der Kavitationserosion von Beton sind.

Eine andere Ursache für das Entstehen der Kavitation ist die natürliche körnige Unebenheit der Betonoberfläche. Sie ist eine Folge der Zementausspülung und der teilweisen Freilegung des Zuschlagstoffes. Schließlich kann man auch einzelne Konstruktionselemente von Entlastungsanlagen, wie Konstruktionsfugen, Plattenschalungsstöße, Stufen in der Umgebung der Luteneinlege-teile usw. zur Gruppe der Oberflächenunebenheiten (konstruktive Unebenheiten) zählen, die Kavitation und Kavitationserosion hervorrufen können.

Uns ist eine relativ kleine Anzahl von Arbeiten bekannt, die sich speziell mit diesem Problem befaßt. Eine Reihe von Veröffentlichungen von K.K. Šal'nev [L. 4, 5] untersucht die Kavitation einzelner zweidimensionaler Vorsprünge an einer glatten Oberfläche. Holl stellte sich in seiner Arbeit [L. 6] die gleiche Aufgabe und setzte die kritische

Kavitationsgröße eines einzelnen Vorsprungs mit den Größen der Grenzschicht, in der dieser Vorsprung liegt, in Beziehung. Colgate setzte in seiner Arbeit [L. 7] die kritische Größe des Druckes über dem Versuchsmodell, bei dem die Kavitation an einer natürlichen körnigen Unebenheit der Betonoberfläche beginnt, mit der Reibungsgeschwindigkeit

in Beziehung. Diese Arbeit kann für praktische Berechnungen benutzt werden, jedoch haben die in ihr zugrunde gelegten Werte leider keinen allgemeinen Charakter. In der UdSSR wurde in den letzten Jahren im Zusammenhang mit dem Bau einer Reihe von Hochdruckwasserbaukomplexen das Problem der Kavitationsentstehung an Unebenheiten der Betonoberfläche von Entlastungsanlagen am Institut "Gidroproekt" imeni S. Ja. Žuka (Žuk-Institut "Hydroprojekt") und im Moskovskij inženernostroitel'nyj institut (MISI) imeni V. V. Kujbyševa am Lehrstuhl für Wasserbauanlagen in Zusammenarbeit mit dem Institut mechaniki (IMECH) der Akademie der Wissenschaften der UdSSR experimentell untersucht. Diese Arbeiten wurden nach einem koordinierten Programm durchgeführt, und einige der im MISI und IMECH gewonnenen Resultate werden im folgenden untersucht. I

Infolge der ungenügenden Erforschung der Kavitationserscheinungen bemühen sich die Hydrotechniker, das Entstehen der Kavitation bei Wasserbauanlagen zu vermeiden. Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Voraussetzungen für das Entstehen der Kavitation an Oberflächenunebenheiten von Entlastungsanlagen zu untersuchen. Das bedeutet, daß eine einfache Berechnungsmethode gefunden werden muß, die es ermöglicht, den Kavitationsbeginn bei gegebener Form der Unebenheit und bestimmten hydraulischen Strömungsparametern zu bestimmen. Oft erweist es sich auch als notwendig, die zulässigen Größen für Oberflächenunebenheiten bei vorgegebenen hydraulischen Parametern zu bestimmen. Prinzipiell kann man die Oberfläche einer Entlastungsanlage ziemlich glatt machen, und das sollte man auch im allgemeinen anstreben. Eine wesentliche Verbesserung der Qualität der Oberflächenbearbeitung ist aber mit zusätzlichen Aufwendungen verbunden. Deshalb ist die Aufgabe, die zulässigen Größen der Mängel bei der Arbeitsausführung zu bestimmen, sehr wichtig.

Erosionsprobleme, der Einfluß der beigemischten Luft und des Maßstabeffektes auf die Kavitation werden hier nicht erörtert, obgleich die Autoren sich über die Wichtigkeit dieser Probleme im klaren sind.

Das jeweilige Kavitationsstadium wird durch die sogenannte Kavita-

tionsgröße in Form der dimensionslosen Euler-Zahl charakterisiert. In dem hier untersuchten Fall ist es zweckmäßig, die Kavitationsgröße folgendermaßen darzustellen:

(1)

wobei folgende Bezeichnungen gelten:

$H_{\text{ol-p}}$ ist der über die Zeit gemittelte absolute Druck in der den Flüssigkeitsbereich umschließenden Strömung in der Nähe der Unebenheit (ohne Berücksichtigung der Erregungen durch die Unebenheit);

H_k ist der absolute Druck im Strom, bei dem die Kavitation entsteht;

v_{Kav} ist die Geschwindigkeit, mit der der Strom auf die Unebenheit auftrifft, die entsprechend der schematischen Darstellung auf Abbildung 1 unter Berücksichtigung der realen Geschwindigkeitsverteilungslinie in dem Bereich berechnet wird. Es ist nicht schwer zu beweisen, daß der Kavitationsparameter

$$K = \dots ; \quad (2)$$

hierbei gilt

(3a)

K = der Koeffizient der Senkung des minimalen Druckes bei einem gegebenen Kavitationsstadium infolge der Wirkung der Zentrifugalkräfte, die in der Strömung in der Nähe der umströmten Unebenheit durch die Strahlbiegung entstehen. Analog ist:

(3b)

(3c)

(3d)

usw.

In den Formeln (3a), (3b), (3c), (3d) sind die Drucksenkungen in dem jeweiligen Kavitationsstadium, die durch Zentrifugal-, Wirbel-, Turbulenz-, hydroelastische u.a. sich in der Umgebung der umströmten Unebenheit infolge der Felderregung des Ursprungsstroms entwickelnde Kräfte bedingt sind. Im Stadium der Kavitationsentstehung nimmt die Gleichung (1) folgende Form an:

(4)

wobei K_{kp} die kritische Kavitationsgröße ist. Die Größe der Gesamtverdünnung bei der Unebenheit kann nach der Formel

(5)

berechnet werden.

Die Bedingung für das Nichtvorhandensein der Kavitation sieht hierbei folgendermaßen aus:

(6)

oder

(6a)

Für den Fall, der auf Abbildung 1a dargestellt ist, ist die Größe $H_{okp} = H_r + H_a$, wobei H_r die Tiefe des druckfreien Stroms über der jeweiligen Unebenheit und $H_a \approx 10$ der Atmosphärendruck ist. Die Größe v_{hes} wird hierbei unter Berücksichtigung der realen Geschwindigkeitsverteilungslinie am Zustrom zur Unebenheit angenommen. Sie hängt von den hydraulischen Strömungsparametern und von der Oberflächenrauigkeit im Zustrombereich ab. Wir halten es eventuell für empfehlenswert, sie nach der von I.K. Nikitin in seiner Arbeit [L. 9] beschriebenen Methode zu bestimmen. Für den auf Abbildung 1b dargestellten Fall ist H_{okp} gleich dem absoluten Wert des Druckes im Transitstrahl im komprimierten Schnitt, d. h. im ^{Quer-}Schnitt 2 - 2 anzunehmen. Die Aufströmungsgeschwindigkeit v_{hes} wird nach der realen Geschwindigkeitsverteilungslinie im Zustrombereich bestimmt. Die theoretische und experimentelle Analyse bewies, daß wenn die Größe einer einzelnen Unebenheit die Höhe $h_b > 2-3$ mm hat, d. h. wenn die Unebenheit nicht zu tief in die Bodenschicht eingelassen ist und wenn die Strömungstiefe über der Unebenheit (H_r) entsprechend der Abbildungen 1a und 1b um 1,5 - 2-mal und mehr größer ist als die Höhe der Unebenheit, der kritische Kavitationsparameter in Form von Gleichung (4) bei $Re = 10^4$ nur von der Form der Unebenheit und nicht von der Reynoldszahl abhängt. Er ist für Strömungsverhältnisse mit und ohne Druck identisch. So läßt sich die Aufgabe der Bestimmung der Bedingungen für die Kavitationsentstehung an einzelnen Betonoberflächenunebenheiten nach Gleichung (6a) äußerst einfach lösen, wenn genügend Material über die Größen der kritischen Kavitationsparameter K_{kp} für die verschiedenen Typen von Unebenheiten vorliegt. Wir haben die auf Tabelle 1 aufgeführten einzelnen Oberflächenunebenheiten untersucht.

(11)

Die Untersuchungen wurden im Kavitationslaboratorium des Institut Mechaniki der Akademie der Wissenschaften der UdSSR in zwei geschlossenen Wasserrohren durchgeführt. Die Arbeitskammern hatten einen rechtwinkligen Querschnitt von 25 X 25 mm und 25 X 100 mm. Die Strömung des Wassers in der Kammer erfolgte unter Druck. Ein Elektromotorantrieb nach dem Ward-

Leonard-System ermöglichte eine stufenlose Regelung der Drehzahl des Motors (und folglich auch des Druckes und des Pumpendurchflusses). Die Geschwindigkeit im Arbeitsabschnitt veränderte sich dabei in den Grenzen von 4 - 30 m/sec. Die Druckregelung in der Arbeitskammer erfolgte durch Verdichtung der Luft über der freien Wasseroberfläche in einem mittels eines Hochdrucksystems ($H_{\text{Waldschick}}$) von der Atmosphäre ^{IV} isolierten Behälter. Das Versuchsmodell wurde an einer Kammerwand (gewöhnlich am Boden) befestigt. Das durchsichtige Glas der Kammer ermöglichte visuelle Beobachtungen. Die Geschwindigkeit wurde in dem jeweiligen Punkt mit Hilfe eines Pitotrohrs spezieller Bauart gemessen, das durch eine Packungsstopfbuchse in die Kammer eingeführt war. Das Pitotrohr und die Piezometerausleitungen, die an den Wänden in der Nähe des Arbeitsquerschnittes angebracht waren, wurden mit den Manometern und Vakuummetern des Modells verbunden. Als Unebenheitsgrößen wurden bei den Versuchen Werte angenommen, die ungefähr gleich den Unebenheitsgrößen sind, die in der Praxis des Wasserbaus vorkommen ($h_{\text{B}} = 2 - 10 \text{ mm}$). Die Strömungstiefe über dem Vorsprung war ungefähr 2 bis 3mal größer als die Höhe des Vorsprungs h_{B} . Im Gegensatz dazu konnten die Größen K_{kp} bei der Strömung im Labor im Vergleich zur natürlichen Strömung wegen der Verringerung der Zentrifugalkräfte, die sich im komprimierten Querschnitt des Transitstrahls infolge der Biegung des Stromfadens entwickeln, verringert werden. Durch Regelung von Geschwindigkeit und Druck wurden die Bedingungen im Arbeitsquerschnitt so gewählt, daß in der Umgebung der Unebenheit ein intermittierendes Kavitationsstadium entstand, dessen zeitlicher Einsatz visuell und akustisch zu bestimmen war. Dann wurde eine graphische Darstellung der Abhängigkeit des Druckes in dem Transitstrahl H_{okp} von der Aufströmungsgeschwindigkeit v_{HAB} angefertigt, bei deren Koordinierung die Kavitation entsteht. Das Ergebnis war für jede Unebenheit eine der auf Abbildung 2 dargestellten analoge Kurve. Der Bereich der graphischen Darstellung, der unterhalb der experimentellen Kurve liegt, ist die Kavitationszone. Die Kurve, die die Umströmung der Unebenheit bei Eintritt und Wachteintritt der Kavitation abgrenzt, stellt folgende Parabel dar:

(P)

Den analogen graphischen Darstellungen für die verschiedenen Typen von Unebenheiten entsprechend wurden die auf Tabelle 1 aufgeführ-

ten experimentellen Werte der kritischen Kavitationsgrößen K_{kp} bestimmt.

Die Nummern 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8 von Tabelle 1 sind schematische Darstellungen von aus dem Beton herausragenden Bewehrungsstäben, Stützen, Bolzen u.a. Elementen, die - wie die Praxis lehrt - leider häufig ungeglättet bleiben. Die Berechnungen zeigten, daß bei nichteintretender Vibration (d. h. bei Nichtvorhandensein der Hydroelastizitätskräfte) bei einer Tiefe der druckfreien Strömung von 1 - 2 m die Kavitation bei einer Geschwindigkeit von $v_{Hed} = 7$ m/sec im Falle eines dreieckigen Stabes ($K_{kp} = 4,5$) und bei einer Geschwindigkeit von $v_{Hed} = 12$ m/sec im Falle der kreisförmigen Bewehrung ($K_{kp} = 1,5$) entsteht. Bei Vibrationen der Bewehrung in der Strömung, was offensichtlich praktisch fast immer der Fall ist, kann die Geschwindigkeit, bei der unter den gleichen Bedingungen die Kavitation am Bewehrungsstab entsteht, bedeutend niedriger sein. Deshalb sind die Vorsprünge 1 - 8 entsprechend den Kavitationsbedingungen sogar in Entlastungsanlagen mit mittlerem Druck unzulässig. Der kritische Kavitationsparameter für Unebenheiten in Form einer Einbuchtung (umgekehrten Stufe) oder einer Bruchstelle (Nr 10, 17, 18 und 19) ist ungefähr halb so groß wie der kritische Kavitationsparameter einer Unebenheit in Form einer direkten Stufe (12, 13, 14, 15 und 16). Das ist damit zu erklären, daß eine Stromfadenbiegung des Transitstrahls über der nach der Einbuchtung entstehenden toten Zone praktisch nicht stattfindet, während bei einer direkten Stufe (gemeint ist wohl "Stufe nach oben") diese Biegung äußerst stark ist. Deshalb sind im Falle einer Einbuchtung die zentrifugalen Kräfte gering: $\Delta H_{Zent} \approx 0$, $K_{Zent} \approx 0$. Eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Größe des kritischen Parameters K_{kp} spielen in diesem Falle die Wirbelkräfte, insbesondere für die Einbuchtung mit $K_{kp} = 1,05$ (Nr 17). Eine von G.A. Vorob'ev durchgeführte ausführliche Analyse dieses Falles der Umströmung bewies, daß der Koeffizient der Druckminderung infolge der Wirbelkräfte hierbei durch folgende Formel ausgedrückt wird:

(7)

wobei $sh = \frac{v_{Hed}}{g d_0} = 0,11$ die Struchal-Zahl,
 n die Wirbelfrequenz im jeweiligen Querschnitt und
 d_0 der Wirbeldurchmesser ist.

Es gilt also: $K_{kp} \approx K_{wirbel} + 0,25$, wobei 0,25 die Größe ist, die auf die übrigen Kräfte ausschließlich der Wirbelkräfte entfällt. Die Möglichkeit

der Zerlegung des gesamten kritischen Kavitationskoeffizienten in eine Reihe von Komponenten erlaubt es, wie bereits erwähnt wurde, die Aufgabe der Kavitationsumströmung von Unebenheiten genauer zu analysieren.

In Nr 9 von Tabelle 1 wird der kritische Kavitationsparameter K_{kp} für die Bedingungen der nichtabreißenden Umströmung eines widerstandsarmen ("weichen", stoßfreien) Vorsprungs durch eine tiefe Strömung als

$$K_{kp} = \dots \quad (8)$$

dargestellt.

Durch Untersuchung der potentiellen Strömung mit Hilfe der konformen Abbildungen erhielt G.A. Vorob'ev für den vorliegenden Fall den theoretischen Wert für die Größe $K = 4,0$. Wenn man berücksichtigt, daß hier $K_{\text{Vorb.}} \approx 0$ und $K_{\text{Turb.}} \approx 0$, ist $K_{\text{theor.}} \approx K_{kp}$, und es besteht eine befriedigende Kongruenz der experimentellen Werte von K_{kp} und der theoretischen Werte von $K_{\text{theor.}}$. Hierbei gilt $\dots = 1,05$. Die Untersuchungen

der Versuchsmodelle von Nr 2 hatten methodische Bedeutung. Insbesondere nach diesen Werten wurde eine Analyse der Bedeutung der Wirbel- und Zentrifugalkräfte durchgeführt. Bei geringer Strömungstiefe über dem Vorsprung (bei $\dots = 4$, siehe Nr 2 von Tabelle 1) werden die Zentrifugalkräfte eine geringe Rolle spielen, und die Größe K_{kp} wird fast völlig durch die Größe $K_{\text{Vorb.}}$ bestimmt. Im Falle $\frac{h_s}{H_r} = 7$ ist $K_{kp} \approx K_{\text{Vorb.}} \approx 0,8$.

Nr 20 von Tabelle 1 behandelt schließlich die Kavitationseigenschaften einer Spalte, eines Schlaglochs, einer Konstruktionsfuge. Bei der Berechnung der kritischen Kavitationsparameter für eine Unebenheit, wie sie in Nr 20 dargestellt ist, wurde als charakteristische Geschwindigkeit die Geschwindigkeit in Höhe der Bodenschicht vor der oberen Rippe - v_s - genommen. Die Kavitation entsteht hier hinter der unteren Rippe des Spaltes. Die untere Rippe liegt dabei in der Strömung des von der oberen Rippe kommenden Wirbelschleiers. Die Aufströmungsgeschwindigkeit dieser Strömung sowie die Turbulenzcharakteristiken hängen von der Größe der Spaltöffnung b ab. Bei wachsender Spaltbreite von 1,5 bis 60 mm wird K_{kp} bei den Versuchen entsprechend größer und wächst von 0,5 bis 2,4. Bei einer weiteren Vergrößerung der Öffnung b ändert sich K_{kp} praktisch nicht und bleibt ungefähr gleich der Größe von K_{kp} für die Stufe (nach oben). Der theoretisch maximal mögliche Wert für K_{kp} beträgt für eine solche Spalte offensichtlich 2,8 - 3,0 und gilt für eine Spaltöffnung von $b = (50 - 150 \text{ mm})$.

Außer den Untersuchungen der Bedingungen für die Kavitationsentstehung an einzelnen Oberflächenunebenheiten wurden Untersuchungen der Be-

dingungen für die Kavitationsentstehung an der natürlichen körnigen Betonoberflächenrauigkeit durchgeführt. Ausführlich erörtert werden diese Ergebnisse in [L. 10], weshalb wir hier nur eine kurze Beschreibung geben.

Die Bedingung für den Nichteintritt der Kavitation an der natürlichen körnigen Betonoberflächenrauigkeit sieht folgendermaßen aus:

(8)

In Formel (8) ist K_{kp} der kritische Kavitationsparameter eines einzelnen, an einer glatten Fläche gelegenen Zuschlagsteins. Er hängt nicht von der Größe des Zuschlagstoffes ab und wird nur durch die Form des letzteren bestimmt. Für Zuschlagstoff in Form von gut abgerundetem Kiesel oder Kies ist $K_{kp} = 1,4 - 1,6$, für Bruchschotter ist $K_{kp} = 3,8 - 4$; τ ist der Korrekturfaktor, der den Abschirmungseffekt des jeweiligen Zuschlagsteins durch die vorgelagerten Zuschlagsteine berücksichtigt, wenn man den betreffenden Stein zwischen gleichartige Steine setzt, d. h. wenn die Bedingung der realen körnigen Rauigkeit gegeben ist. Dieser Faktor hängt nur von dem mittlerem Durchmesser des Zuschlagsstoffes ab und verändert sich im Bereich von 0,2 - 1 (Zeichnung 3) bei einer entsprechenden Veränderung von d_{cp} von 1 bis 25 mm; bei einer weiteren Zunahme des Wertes d_{cp} gilt $\tau = 1$, v_s ist die Geschwindigkeit in Höhe der untersuchten Rauigkeit. Sie läßt sich nach der realen Geschwindigkeitsverteilungslinie bestimmen. Im übrigen gelten in Formel (8) die früheren Bezeichnungen.

Auf Grund der hier aufgeführten Werte wurden Berechnungen für die Bedingungen der Kavitationsentstehung an verschiedenen Betonoberflächenunebenheiten der Entlastungsanlagen des projektierten Wasserbaukomplexes von Kampyr-Ravat durchgeführt. Einige dieser Berechnungsergebnisse für einen Typ von Entlastungsanlagen werden auf Tabelle 2 aufgeführt.

Aus der Tabelle geht hervor, daß für die Bedingungen dieser Art Entlastungsanlage schwerzumströmende Vorsprünge, wie herausragende Bewehrungsstäbe, Stufen, Bruchstellen der Betonoberfläche (Nr 1, 2, 3) unzulässig sind.

Unebenheiten in Form einer Spalte oder einer Konstruktionsfuge sind zulässig unter der Voraussetzung, daß die Spaltengröße $b \leq 10$ mm (Nr 4).

Vorsprünge mit widerstandsarmer (<"weicher", stoßfreier) Umströmung sind zulässig bei folgendem Verhältnis der Vorsprunshöhe h_B zur Sehnen-

länge l : $\langle 0,14$ (Nr 5). Die natürliche körnige Betonoberflächenrauigkeit (Nr 6, 7) ist zulässig, wenn die mittlere Vorsprungsgröße $\Delta \ll 5$ mm ist. Verschiedene schwerzuumströmende Unebenheiten mit einer Höhe von $h_B \ll 3$ mm, die sich von der natürlichen körnigen Rauigkeit von $\Delta = 5$ mm abheben, sind ebenfalls zulässig. vii

KURZE SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Unter Anwendung der in dieser Arbeit erörterten Methode lassen sich Näherungsberechnungen zur Bestimmung des Kavitationsbeginns an verschiedenen Betonoberflächenunebenheiten durchführen. Im Moment ist es noch zweckmäßig, bei den Ergebnissen dieser Berechnungen einige Reserven einzusetzen, da die gewonnenen Werte für K_{kp} Näherungswerte sind und unter Berücksichtigung des Einflusses des Maßstabeffektes und anderer Faktoren noch näher präzisiert werden müssen; nicht zu vermeiden sind auch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von $v_{H_{0k}}$.

2. Die Zerlegung des Kavitationsparameters in eine Reihe von Drucksenkungskomponenten ermöglicht die Analyse des Einflusses verschiedener Faktoren auf den Kavitationsbeginn (Wirbel, Zentrifugalkräfte usw.).

3. In einigen einfacheren Fällen wird die Größe des kritischen Kavitationsparameters hauptsächlich durch den Einfluß eines Faktors oder zweier Faktoren bestimmt, wobei bisweilen der Einfluß mehrerer Faktoren berechnet wird.

Abbildung 1. Schematische Darstellungen zur Analyse des kritischen Kavitationsparameters einer Unebenheit
a) für druckfreie Strömung; b) für Druckströmung.

Abbildung 2. Experimentelle Abhängigkeit zwischen dem Druck H_{0k} und der Geschwindigkeit $v_{H_{0k}}$, bei deren Koordinierung an der Unebenheit in Form einer Stufe (Stufe nach oben) die Kavitation entsteht.

Abbildung 3. Graphische Darstellung der Abschirmungsfunktion.

L I T E R A T U R

1. s. Orig.
2. Rozanov, N.P.: Voprosy proektirovanija vodopronusknych sooruzenij, rabotajuščich v uslovijach vakuuma i pri bol'sich skorostjach potoka. Gosenergoizdat, 1959.
3. s. Orig.
4. Šal'nev, K.K.: Kavitacija nerovnostej poverchnosti i vyzyvaemaja eju erozija, DAN, XXVIII (1951) vyp. 1.
5. Šal'nev, K.K.: Kavitacija nerovnostej poverchnosti, Žurnal tehničeskoj fiziki, XXI (1962) vyp. 3.
6. s. Orig.
7. s. Orig.
8. Rozanov, N.P., F.P. Mojs, N.N. Paškov, G.A. Vorob'ev: Issledovanie vakuumnyh i kavitacionnyh charakteristik elementov vodosbrosnyh gidrotehničeskich sooruzenij, Doklad na XI kongress MAGI, L., 1965.
9. Nikitin, I.K.: Turbulentnyj ruslovoj potok i processy v pridonnoj oblasti. Gosenergoizdat, 1963.
10. Vorob'ev, G.A.: Issledovanija načala kavitacii, vznikajuščej na estestvennoj zernistoj šerochovatosti betonnoj poverchnosti, "Izvestija VNIIG", t. 78 (1965)

Eingegangen am 25. Februar 1965.

Anmerkung des Übersetzers

Bei den Worten in <> handelt es sich entweder um eine Erläuterung des Übersetzers oder um eine Übersetzungsvariante, wobei in <> die örtliche Übersetzung gegeben ist.

21. XI. 66

Gemberg-Wesike

Проф., докт. т. н. Н. П. Розанов, докт. т. н. К. К. Шальнев,
доц., канд. т. н. П. П. Мойс, канд. т. н. Н. Н. Пашков,
инж. Г. А. Воробьев

Московский инженерно-строительный институт
имени В. В. Куйбышева

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАЧАЛА КАВИТАЦИИ НА НЕРОВНОСТЯХ БЕТОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе дается метод инженерного расчета условий возникновения кавитации на различных неровностях бетонной поверхности, являющихся следствием конструктивных особенностей отдельных элементов водосбросов, дефектов производства работ или вымыва вяжущего и частичного обнажения заполнителя.

Показывается, что критический параметр кавитации равен сумме коэффициентов понижения давления и зависит от ряда факторов: турбулентности набегающего потока, возмущенный потока, вызываемых данной неровностью и др. Расчленение критического параметра кавитации на ряд составляющих, учитывающих отдельные факторы, позволило провести теоретический и экспериментальный анализ влияния некоторых из этих факторов на начало кавитации. В отдельных, наиболее простых случаях оказалось возможным вычислить величины критических параметров кавитации теоретическим путем. В работе приводятся справочные таблицы и простые расчетные зависимости, позволяющие производить кавитационные расчеты различных неровностей бетонной поверхности.

Проблема кавитации неровностей поверхности водосбросов возникла в связи с кавитационными повреждениями, обнаруженными на ряде высоконапорных гидроузлов [Л. 1, 2, 3 и др.]. Местные повреждения от кавитационной эрозии затрудняют нормальную эксплуатацию водосбросов [Л. 3 и др.], а иногда приводят сооружение в аварийное состояние.

Одной из основных причин появления неровностей бетонной поверхности водосбросов являются дефекты производства работ: уступы на стыке опалубочных секций, отклонение опалубки от проектной линии, торчащие из бетона арматурные стержни, трещины, выбоины и т. д. Практика гидротехнического строительства показала, что указанные дефекты производства работ являются недопустимыми в высоконапорных водосбросах, так как именно эти дефекты являются часто первопричиной появления кавитационной эрозии бетона.

Другой причиной возникновения кавитации является естественная зернистая шероховатость бетонной поверхности. Она появляется вследствие вымывания цемента и частичного обнажения заполнителя. И, наконец, отдельные конструктивные элементы водосбросов, такие как конструктивные швы, стыки плит-оболочек, уступы в районе закладных частей пазов и т. д. также можно отнести к разряду неровностей поверхности (конструктивные неровности), могущих вызвать кавитацию и кавитационную эрозию.

Нам известно сравнительно небольшое количество работ, посвященных специально рассматриваемой проблеме. Ряд опубликованных работ К. К. Шальнева [Л. 4, 5] посвящен исследованию кавитации одиночных двухмерных выступов, расположенных на гладкой плоскости. Холл в своей работе [Л. 6], рассматривая ту же задачу, связал критический параметр кавитации одиночного выступа с параметрами пограничного слоя, в который погружен этот выступ. Колгейт в работе [Л. 7] связал критическую величину давления над образцом, при котором возникает кавитация на естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности, со скоростью трения $\frac{\tau}{\rho_0}$. Эта работа может быть использована для

практических расчетов, но, к сожалению, приводимые в ней данные носят частный характер. В последние годы в СССР в связи со строительством ряда высоконапорных гидрозлов проблема возникновения кавитации на неровностях бетонной поверхности водосбросов экспериментально изучалась в институте «Гидропроект» имени С. Я. Жука и в Московском инженерно-строительном институте (МИСИ) имени В. В. Куйбышева на кафедре гидросооружений в содружестве с Институтом механики (ИМЕМ) Академии Наук СССР. Эти работы выполнялись по согласованной программе и некоторые их результаты, полученные в МИСИ и ИМЕМ, рассмотрены ниже.

Вследствие недостаточной изученности явлений кавитации гидротехники стараются не допускать возникновения кавитации в сооружениях. Задачей данной работы является рассмотрение условий возникновения кавитации на неровностях поверхности водосбросов. Это означает, что необходимо дать простой метод расчета, позволяющий определять начало кавитации при заданной форме неровности и определенных гидравлических параметрах потока. С другой стороны часто бывает необходимо определить допустимые величины неровностей поверхности при заданных гидравлических параметрах. В принципе поверхность водосброса можно сделать весьма гладкой и к этому вообще следовало бы стремиться. Однако существенное улучшение качества отделки поверхности связано с дополнительными затратами. Поэтому задача о допустимых величинах дефектов производства работ является очень важной.

Вопросы эрозии, влияние на кавитацию примешенного воздуха и масштабного эффекта здесь не рассматриваются, хотя авторы и отдают себе отчет о важности этих проблем.

Данная стадия кавитации характеризуется так называемым параметром кавитации, записываемым в форме безразмерного числа Эйлера. В рассматриваемом здесь случае параметр кавитации удобно записывать в следующей форме:

$$K = \frac{H_{\text{окр}} - H_{\text{к}}}{\frac{v_{\text{наб}}^2}{2g}}, \quad (1)$$

где $H_{\text{окр}}$ — осредненное во времени абсолютное давление в потоке, окружающем область жидкости, вблизи неровности (без учета возмущений от неровности);

$H_{\text{к}}$ — абсолютное давление в потоке, при котором возникает кавитация;

$v_{\text{наб}}$ — скорость набегания потока на неровность, вычисляемая с учетом реальной эпюры распределения скоростей на подходе к участку в соответствии со схемой рис. 1. Легко показать, что параметр кавитации K равен

$$K = K_{\text{цб}} + K_{\text{выр}} + K_{\text{турб}} + K_{\text{гидроупр}} + \dots, \quad (2)$$

здесь

$$K_{ц.б.} = \frac{\Delta H_{ц.б.}}{\frac{v_{наб}^2}{2g}}, \quad (3a)$$

K — коэффициент понижения минимального давления при данной стадии кавитации от действия центробежных сил, возникающих в потоке вблизи обтекаемой неровности вследствие искривления струй. Аналогично:

$$K_{вихр.} = \frac{\Delta H_{вихр.}}{\frac{v_{наб}^2}{2g}}; \quad (3б)$$

$$K_{турб.} = \frac{\Delta H_{турб.}}{\frac{v_{наб}^2}{2g}}; \quad (3в)$$

$$K_{гидроупр.} = \frac{\Delta H_{гидроупр.}}{\frac{v_{наб}^2}{2g}} \quad (3г)$$

и т. д.

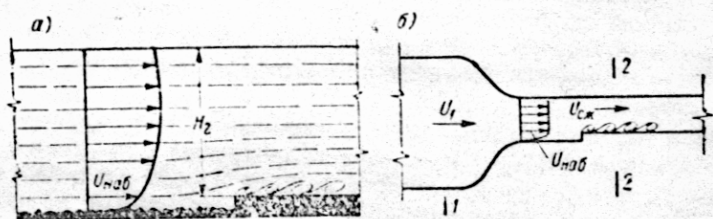


Рис. 1. Схемы к анализу критического параметра кавитации неровности a — для безнапорного потока; $б$ — для напорного потока.

В формулах (3а), (3б), (3в), (3г) $\Delta H_{ц.б.}$, $\Delta H_{вихр.}$, $\Delta H_{турб.}$, $\Delta H_{гидроупр.}$ — понижения давления при данной стадии кавитации, обусловленные центробежными, вихревыми, турбулентными, гидроупругими и другими силами, развивающимися в окрестности обтекаемой неровности из-за возмущения поля начального потока. В стадии зарождающейся кавитации уравнение (1) принимает вид:

$$K_{кр.} = \frac{H_{окр.} - H_k}{\frac{v_{наб}^2}{2g}}, \quad (4)$$

где $K_{кр.}$ — критический параметр кавитации. Величина суммарного разрежения у неровности может быть подсчитана по формуле

$$\Sigma \Delta H_{возмущений} = K_{кр.} \frac{v_{наб}^2}{2g} \text{ (м. в. ст. абс.)} \quad (5)$$

Условие отсутствия кавитации при этом имеет вид:

$$\Sigma \Delta H_{возмущений} < H_{окр.} - H_k \quad (6)$$

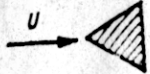
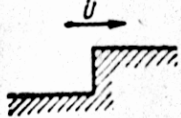
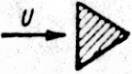
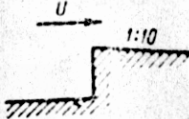
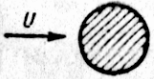
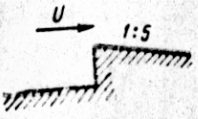

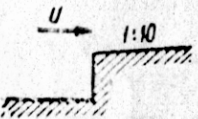
$$K_{кр} \frac{v_{наб}^2}{2g} < H_{окр} - H_к. \quad (6a)$$

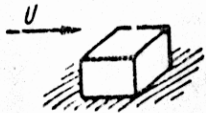
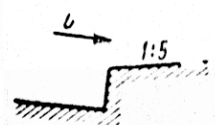

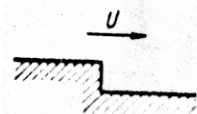

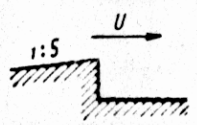


Для случая, изображенного на рис. 1, а, величина $H_{окр} = H_r + H_a$, где H_r — глубина безнапорного потока над рассматриваемой неровностью, а $H_a \approx 10$ м. в. ст. — атмосферное давление. Величина $v_{наб}$ при этом принимается с учетом реальной эпюры распределения скоростей на подходе к неровности. Она зависит от гидравлических параметров потока и шероховатости поверхности на подходе к участку. Считаем возможным рекомендовать определять ее по методике, описанной И. К. Никитиным в его работе [Л. 9]. Для случая, изображенного на рис. 1 б, $H_{окр}$ следует принимать равным абсолютному значению напора в транзитной струе в сжатом сечении, т. е. в сечении 2—2. Скорость избегания $v_{наб}$ определяется по реальной эпюре распределения скоростей на подходе к участку. Теоретический и экспериментальный анализ показал, что если размер одиночной неровности имеет высоту $h_b > 2 \div 3$ м. в. ст., т. е. если неровность не слишком глубоко утоплена в придонный слой и если глубина потока над неровностью (H_r) по рис. 1, а, 1, б, в 1,5—2 и более раз превышает высоту неровности, то критический параметр кавитации, в виде уравнения (4) зависит только от формы неровности и не зависит от числа Рейнольдса при $Re = \frac{v_{наб} H_r}{\nu} > 10^4$. Он одинаков как для напорного, так и для безнапорного режимов обтекания. Таким образом, задача определения условий возникновения кавитации на отдельных неровностях бетонной поверхности весьма просто решается по уравнению (6а), если будет иметься необходимый справочный материал по величинам критических параметров кавитации $K_{кр}$ для различных типов неровностей. Нами были испытаны одиночные неровности поверхности, представленные в табл. 1.

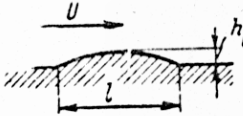
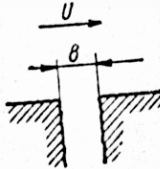
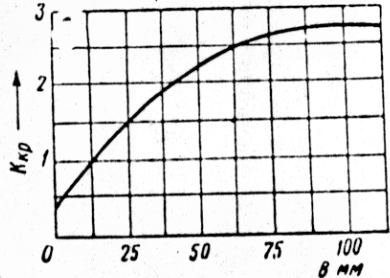
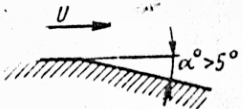
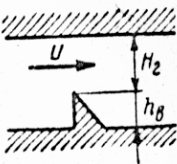
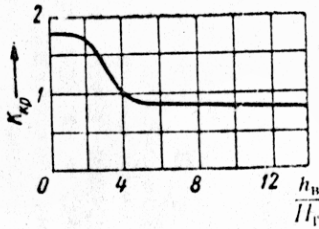
Исследования проводились в кавитационной лаборатории Института Механики АН СССР в двух гидротрубах замкнутого типа. Рабочие камеры имели прямоугольные сечения 25×25 мм и 25×100 мм. Движение воды в камере — напорное. Электромоторный привод, построенный по системе Вард-Леонардо, позволял осуществлять бесступенчатое регулирование числа оборотов двигателя (а следовательно, напора и расхода насоса). При этом скорость в рабочем сечении изменялась в пределах $4 \div 30$ м/сек. Регулирование давления в рабочей камере осуществлялось нагнетанием воздуха над свободной поверхностью воды в изолированном от атмосферы резервуаре посредством системы высокого давления ($H_{избыточное} \leq 70$ м. в. ст.). Образец крепился на одной из стенок камеры (обычно на дне). Прозрачные стекла камеры позволяли вести визуальные наблюдения. Измерение скорости в заданной точке осуществлялось с помощью трубки Пито специальной конструкции, вводимой в камеру через сальниковое уплотнение. Трубка Пито и выводы пьезометров, установленных на стенках вблизи рабочего сечения, присоединялись к образцовым манометрам и вакуумметрам. Размеры неровностей в опытах принимались примерно равными размерам неровностей, встречающихся в практике гидротехнического строительства ($h_b = 2 \div 10$ мм). Глубина потока над выступом в два-три раза превышала высоту выступа h_b . В противном случае величины $K_{кр}$ в лабораторном потоке по сравнению с натурой могли быть занижены из-за уменьшения центробежных сил, развивающихся в сжатом сечении транзитной струи вследствие искривления струек. Путем регулирования скорости и давления подбирались такие условия в рабочем сечении, чтобы в окрестности неровности возникла перемещающаяся стадия

ТАБЛИЦА 1

Испытанные одиночные неровности и их критические параметры кавитации

№ пп.	Эскиз образца	Краткая характеристика образца	$K_{кр}$	№ пп.	Эскиз образца	Краткая характеристика образца	$K_{кр}$
1		Одиночный стержень в двумерном потоке	4,5	12		Прямой уступ в глубоком двумерном потоке	2,2
2		То же	4,0	13		Уступ с обратным уклоном	2,3
3			1,5	14			2,0
4			2,75	15		Уступ с прямым уклоном	2,0

№ пп.	Эскиз образца	Краткая характеристика образца	$K_{кр}$	№ пп.	Эскиз образца	Краткая характеристика образца	$K_{кр}$
5		Параллелепипед на плоскости	3,2	16		Уступ с прямым уклоном	1,8
6		Полусфера на плоскости	1,2	17		Обратный уступ в двумерном потоке	1,05
7		Конус на плоскости	1,5	18		То же	1,10
8		Срывное обтекание полуцилиндра	1,5	19			0,95

№ п.п.	Эскиз образца	Краткая характеристика образца	$K_{кр}$	№ п.п.	Эскиз образца	Краткая характеристика образца	$K_{кр}$			
9		Плавный выступ в двумерном потоке	$4,2 \frac{h_B}{l}$	20						
10		Излом поверхности	1,05							
11										

кавитации, момент возникновения которой определялся визуально и по шуму. Затем строился график зависимости давления в транзитной струе $H_{окр}$ от скорости набегания $v_{наб}$, при сочетании которых возникает кавитация. В результате такой обработки для каждой неровности была получена кривая, аналогичная приводимой на рис. 2. Область графика, расположенная ниже экспериментальной кривой, является кавитационной зоной. Кривая, разграничивающая кавитационный и безкавитационный режимы обтекания неровности, представляет собой параболу вида

$$H_{окр} - H_k = K_{кр} \frac{v_{наб}^2}{2g}$$

По аналогичным графикам для различных типов неровностей определялись средние экспериментальные значения критических параметров кавитации $K_{кр}$, которые приведены в табл. 1.

Пункты 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 табл. 1 относятся к схемам, соответствующим торчащим из бетона арматурным стержням, стойкам, штырям и другим элементам, которые, как показывает практика, иногда к сожалению, остаются несурбленными. Расчеты показали, что при отсутствии вибрации этих элементов (т. е. при отсутствии сил гидроупругости) при глубине безнапорного потока (1 ÷ 2 м) кавитация возникает

при скоростях: $v_{наб} = 7$ м/сек при треугольном стержне ($K_{кр} = 4,5$) и $v_{наб} \approx 12$ м/сек при круглой арматуре ($K_{кр} = 1,5$).

При наличии вибраций арматуры в потоке практически, видимо, почти всегда имеющей место, скорость, при которой в тех же условиях возникает кавитация на арматурном стержне, может существенно снижаться. Поэтому выступы типа 1—8 недопустимы по условиям кавитации даже в водосбросах среднего напора. Критический параметр кавитации неровностей типа обратного уступа или излома поверхности (пункты 10,

17, 18 и 19) примерно в два раза меньше критического параметра кавитации неровности типа прямого уступа (пункты 12, 13, 14, 15 и 16). Объясняется это тем, что искривление струек транзитной струи над мертвой зоной, возникающей за обратным уступом, практически отсутствует, а при прямом уступе это искривление весьма велико. Поэтому центробежные силы в случае обратного уступа малы: $\Delta H_{ц.б} \approx 0$. $K_{ц.б} \approx 0$. Основную роль в величине критического параметра $K_{кр}$ в этом случае играют вихревые силы, в частности, для обратного уступа $K_{кр} = 1,05$ (пункт 17). Подробный анализ этого случая обтекания, выполненный инж. Воробьевым Г. А., показал, что коэффициент понижения давления от вихревых сил здесь имеет выражение:

$$K_{вихр} \approx \frac{0,1}{\pi^2 sh^2} \approx 0,8, \quad (7)$$

где $sh = \frac{nd_v}{v_{наб}} = 0,11$ — число Струхалия;

n — вихревая частота в данном створе;

d_v — диаметр вихря.

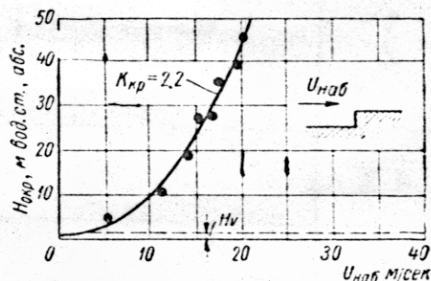


Рис. 2. Экспериментальная зависимость между давлением $H_{ок}$ и скоростью $v_{наб}$, при сочетании которых на неровности в виде прямого уступа возникает кавитация.

Таким образом $K_{кр} \approx K_{вихр} + 0,25$, где 0,25 — величина, приходящаяся на все прочие силы, за исключением вихревых. Возможность расчленения суммарного критического коэффициента кавитации на ряд составляющих, как уже отмечалось выше, позволяет более подробно проанализировать задачу кавитационного обтекания неровностей.

В пункте 9 табл. 1 представлен критический параметр кавитации $K_{кр}$ для условий безотрывного обтекания плавного выступа глубоким потоком:

$$K_{кр} = 4,2 \frac{h_a}{l}. \quad (8)$$

Из рассмотрения потенциального потока методом конформных отображений Воробьевым Г. А. для данного случая было получено теоретическое значение величины $K_{ц.б.} = 4,0 \frac{h_a}{l}$. Учитывая, что здесь

$K_{вихр} \approx 0$ и $K_{турб.} \approx 0$, $K_{ц.б.} \approx K_{кр}$ и получилось удовлетворительное совпадение опытных значений $K_{кр}$ и теоретических значений $K_{ц.б.}$ При этом $\xi = \frac{K_{кр.оп}}{K_{ц.б.теор}} \approx 1,05$. Испытания образцов пункта II имело методическое значение. В частности по этим данным проводился анализ роли вихревых и центробежных сил. При малой глубине потока над выступом (при $\frac{h_a}{H_r} < 4$ — смотри пункт II, таблицы I) центробежные силы начинают играть небольшую роль и величина $K_{кр}$ почти целиком определяется величиной $K_{вихр.}$ В частности при $\frac{h_a}{H_r} = 7$ $K_{кр} \approx K_{вихр} \approx 0,8$.

И наконец, пункт 20 табл. I освещает кавитационные свойства трещины, выбоины, конструктивного шва. При вычислении критических параметров кавитации для неровности, приводимой в пункте 20, в качестве характерной скорости принималась скорость на высоте придонного слоя перед верхним ребром v_6 . Кавитация здесь возникает за низовым ребром щели. Низовое ребро при этом оказывается в потоке вихревой пелены, набегающей со стороны верхового ребра. Скорость набегания этого потока, а также турбулентные характеристики зависят от величины раскрытия щели b . В опытах при возрастании ширины щели от 1,5 до 60 мм $K_{кр}$ увеличивается соответственно от 0,5 до 2,4. При дальнейшем увеличении раскрытия b $K_{кр}$ практически не меняется и становится примерно равным величине $K_{кр}$ для прямого уступа. Теоретически возможная максимальная величина $K_{кр}$ для такой трещины, по-видимому, равна 2,8 ÷ 3,0 и имеет место при раскрытии трещины $b = (50 \div 150 \text{ мм})$.


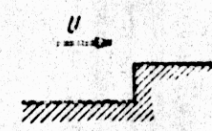
Помимо исследований условий возникновения кавитации на одиночных неровностях поверхности были выполнены исследования условий возникновения кавитации на естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности. Подробно эти результаты освещены в работе [Л. 10], поэтому приводим лишь их краткое описание.

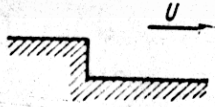
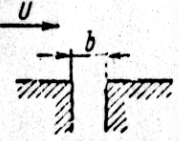
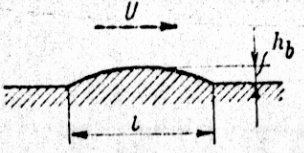
Условие отсутствия кавитации на зернистой естественной шероховатости бетонной поверхности записывается в виде

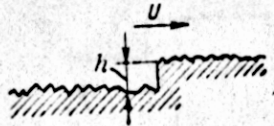
$$K_{кр} = \frac{v_6^2}{2g} > H_{окр} - H_{к.} \quad (8)$$

В формуле (8) $K_{кр}$ — критический параметр кавитации одиночного камня-заполнителя, расположенного на гладкой плоскости. Он не зависит от размера заполнителя и определяется только формой последнего. В частности для заполнителя типа хорошо окатанного гравия,

ТАБЛИЦА 2

№ пп.	Элемент, для которого делается прогноз возникновения кавитации	$K_{кр}$	Верхний ярус водобросов				Нижний ярус водобросов			
			Абсолютный напор над элементом $H, м. в. ст$	$v_{наб.}, м. сек$	$K_{кр} \frac{v_{наб.}^2}{2g}$	Будет ли иметь место кавитация	Абсолютный напор над элементом $H, м. в. ст$	$v_{наб.}, м. сек$	$K_{кр} \frac{v_{наб.}^2}{2g}$	Будет ли иметь место кавитация
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	 <p>Цилиндрический арматурный стержень . . .</p>	1,5	13,0	13,4	13,8	Да	35	34,4	90,6	Да
2	 <p>Прямой уступ в месте стыкования оналубки, плит-оболочек, дошного уплотнения узла затворов и др.</p>	2,2	13,0	13,1	20,2	Да	35	34,1	133	Да

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	 <p>Обратный уступ</p>	1,1	25	26,5	39,6	Да	35	34,4	66,5	Да
4	 <p>Конструктивный шов, трещина, выбоина и др.</p>	$f(b)$	25	26,5	$[b_{\text{дон}}] = 12 \text{ мм}$	35	34,4	$[b_{\text{дон}}] = 11 \text{ мм}$		
5	 <p>Плавный выступ</p>	$4,2 \frac{h_b}{l}$	25	26,5	$\left[\frac{h_b}{l} \right]_{\text{дон}} = 0,17$	35	34,4	$\left[\frac{h_b}{l} \right]_{\text{дон}} = 0,14$		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	Естественная зернистая шероховатость бетонной поверхности, $d_{cp}=5$ мм	$K_{кр} \times f(d_{cp})$	25	12	10,8	Нет	35	34,4	15	Нет
7	То же, $d_{cp}=10$ мм	$K_{кр} \times f(d_{cp})$	25	17	27	Да	35	20,4	45	Да
8	 <p>Отдельный уступ $h=3$ мм, возвышающийся на фоне равномерной зернистой шероховатости, $\Delta=5$ мм.</p>	2,2	25	10	11,2	Нет	35	15	25	Нет

гальки $K_{кр} = 1,4 : 1,6$, для рваного щебня $K_{кр} = 3,8 : 4,0$; τ — поправочный коэффициент, учитывающий эффект затенения данного камня-заполнителя впереди расположенными камнями-заполнителями, если рассматриваемый камень поместить среди ему подобных камней, т. е. в условия реальной зернистой шероховатости. Этот коэффициент зависит только от среднего диаметра заполнителя и изменяется в пределах $0,2 : 1$ (рис. 3) при изменении $d_{ср}$ соответственно от 1 до 25 мм; при дальнейшем увеличении величины $d_{ср}$ $\tau = 1$, v_0 — скорость на высоте рассматриваемой шероховатости. Она определяется по реальной эпюре распределения скоростей. Остальные обозначения в формуле (8) прежние.

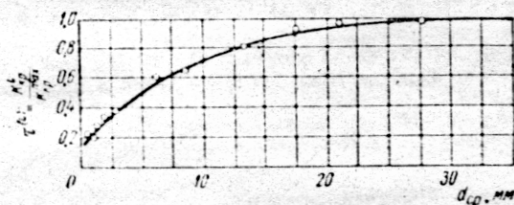


Рис. 3. График функции затенения.

На основе приводимых здесь данных были выполнены расчеты условий возникновения кавитации на различных неровностях бетонной поверхности водосбросов проектируемого Кампыр-Раватского гидроузла. Некоторые из результатов этих расчетов для одного из вариантов водосбросов приводятся в табл. 2.

Из приводимой таблицы следует, что для условий данного варианта водосброса плохообтекаемые выступы типа торчащих арматурных стержней, уступов, изломов бетонной поверхности (пункты 1, 2, 3) являются недопустимыми.

Неровности типа трещины, конструктивного шва допустимы при условии, что величина раскрытия $b < 10 \text{ мм}$ (пункт 4).

Плавнообтекаемые выступы допустимы при отношении высоты выступа h_n к длине хорды $l \left[\frac{h_n}{l} \right]_{\text{доп}} \approx < 0,14$ (пункт 5). Естественная зернистая шероховатость бетонной поверхности (пункты 6, 7) допустима, если средний размер выступа $\Delta < 5 \text{ мм}$. Различные плохообтекаемые неровности высотой $h_n < 3 \text{ мм}$, возвышающиеся на фоне естественной зернистой шероховатости $\Delta = 5 \text{ мм}$, также допустимы.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Используя методику, приводимую в данной работе, возможно производить приближенные расчеты по определению начала кавитации на различных неровностях бетонной поверхности. В результаты этих расчетов в настоящее время целесообразно вводить некоторые запасы, поскольку полученные значения $K_{кр}$ являются приближенными и подлежат дальнейшему уточнению с учетом влияния масштабного эффекта и других факторов; неизбежны неточности и в определении $v_{н\text{об}}$.

2. Расчленение параметра кавитации на ряд составляющих коэффициентов понижения давления позволяет проводить анализ влияния различных факторов на начало кавитации (вихрей, центробежных сил и т. д.).

3. В отдельных, наиболее простых случаях величина критического параметра кавитации определяется влиянием преимущественно одного или двух факторов. Причем иногда влияние некоторых факторов поддается расчету.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. C. Galbraith and R. R. Clark, Bonneville Dam concrete after Six Years. Eng. News—Rec., 1945.
2. Н. П. Розанов, Вопросы проектирования водопропускных сооружений, работающих в условиях вакуума и при больших скоростях потока. Госэнергоиздат, 1959.
3. I. Brown, Cavitation in Hydraulic Structures. Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, vol. 89, № HY 9, January 1963, pt 1, p. 99—114.
4. К. К. Шальнев, Кавитация неровностей поверхности и вызываемая ею эрозия. ДАН, т. XXVIII, вып. 1, 1951.
5. К. К. Шальнев, Кавитация неровностей поверхности, Журнал технической физики, т. XXI, вып. 3, 1962.
6. I. W. Holl, The Inception of Cavitation on Isolated Surface Irregularities. Journal of Basic Eng., March, 1960, Transactions of the ASME, vol. 82, series D, number 1.
7. D. Colgate, Cavitation Damage of Roughened Concrete Surfaces. Proc. ASCE, 1959, vol. 85, n HY 11.
8. Н. П. Розанов, П. П. Мойс, Н. Н. Пашков, Г. А. Воробьев, Исследование вакуумных и кавитационных характеристик элементов водобросных гидротехнических сооружений. Доклад на XI конгрессе МАПИ, Л., 1965.
9. И. К. Шикитин, Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Госстройиздат, 1963.
10. Г. А. Воробьев, Исследования начала кавитации, возникающей на естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности, «Известия ВНИИГ», т. 78, 1965.

Поступила 25 февраля 1965 года.

PREDICTION OF CAVITATION INCEPTION ON CONCRETE SURFACE

By *Rosanov N. P.*, D. Sc. (Eng.), Prof.,
K. K. Chalnev, D. Sc. (Eng.),
Moïs P. P., M. Sc. (Eng.), Doctant,
Pashkov N. I., M. Sc. (Eng.),
Vorobiev G. A., Eng.

A calculation method is presented for the conditions of cavitation onset for different irregularities of a concrete surface which are due either to constructive features of individual spillway elements and construction methods defects or to washing out of a binder and partial aggregate exposal.

The critical cavitation parameter is equal to the sum of the coefficients of pressure reduction induced by a number of factors: turbulence of a run up flow, flow disturbances caused by a given irregularity. Dismemberment of the critical cavitation parameter into a series of components taking into account individual factors allowed to theoretically and experimentally analyse the influence of some of the factors on cavitation inception. In certain of the most simple cases a theoretical calculation of values of critical cavitation parameters proved to be possible. Reference tables and simple relations are given for calculating cavitation occurring on the irregularities hnesses frequently found on a concrete surface.

PRÉVISION DU DÉBUT DE LA CAVITATION À LA SURFACE DE BETON

Par *N. P. Rosanov*, professeur, docteur ès sciences techniques,
K. K. Chalnev, docteur ès sciences techniques,
P. P. Moïs, candidat ès sciences techniques, chargé de cours,
N. I. Pashkov, candidat ès sciences techniques,
G. A. Vorobiev, ingénieur

Le présent article traite la méthode du calcul technique des conditions de l'apparition de la cavitation sur les différentes rugosités d'une