

Vorob'ev, G.A., Ing.:

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

UNTERSUCHUNG DES KAVITATIONSBEGINNS AN EINER  
NATÜRLICHEN KÖRNIGEN BETONOBERFLÄCHENRAUHIGKEIT

Ein aktuelles Problem des heutigen Wasserbaus ist die Bestimmung der Bedingungen für die Kavitationsentstehung an Oberflächenunebenheiten im Wasserbett von Hochdruckentlastungsanlagen. Die Bedingungen für die Kavitationsentstehung an einzelnen Betonoberflächenunebenheiten, die in erster Linie eine Folge von Mängeln in der Arbeitsausführung sind, wurden in [L. 1] dargelegt und werden hier nicht erörtert. In dieser Arbeit wird das Problem der Entstehung des Kavitationseinsetzes an der natürlichen körnigen Betonoberflächenrauhigkeit von Entlastungsanlagen analysiert. Diese Art Unebenheit entsteht inrolge der Ausspülung des Bindemittels in der Betonoberflächenschicht und der teilweisen Freilegung des Füllstoffes. In Veröffentlichung [L. 2] beschrieb Colgate den Fall der Kavitationsentstehung an der körnigen Oberflächenrauhigkeit eines Wasserüberfalls. Ein anderer Fall wurde in Veröffentlichung [L. 3] erörtert, wo lokale Kavitationsschäden hinter dem Verbindungsstück zwischen einer glatten Metallverkleidung und der rauheren Betonoberfläche entstanden. Analoge lokale Schäden werden auch von anderen Autoren behandelt. In [L. 2] bringt Colgate Kurven, die den Zustand der körnigen Rauhigkeit mit und ohne Kavitation abgrenzen. Die Kurven verlaufen analog den auf Abbildung 4 dargestellten Kurven. Der Autor stellte eine Abhängigkeit zwischen der Größe des Druckes über dem Versuchsmodell H und der sogenannten Reibungsgeschwindigkeit her, bei deren Koordinierung die Kavitation entsteht. Man kann jedoch beweisen, daß dafür, daß die in Veröffentlichung [L. 2] gewonnenen Kurven, die die Strömungsverhältnisse bei Kavitation abgrenzen, sowohl für den Fall der natürlichen Strömung

als auch für den Modellfall identisch sind, allein die Gleichheit der Rauheitsgrößen in der Natur und im Modellfall nicht ausreicht, wie das in [L. 2] angenommen wird. Es ist außerdem notwendig, daß die Geschwindigkeitsverteilungslinie im Modellfall und in der Natur zumindest in einer gewissen Höhe von der Vorsprungsspitze gleich ist. Das ist nur dann möglich, wenn abgesehen von der Gleichheit der Rauheitswerte auch die hydraulischen Strömungscharakteristiken (und insbesondere der hydraulische Radius) gleich sind und die Bodenschicht in der Natur und am Modell den gleichen Entwicklungsgrad erfährt. Praktisch ist es niemals möglich, die aufgezählten Bedingungen zu erfüllen. Deshalb ruft sowohl die Methode selbst als auch die Möglichkeit einer unmittelbaren Anwendung der in [L. 2] aufgeführten Werte für Kavitationsberechnungen Widerspruch hervor.

Die in dieser Arbeit gestellte Aufgabe besteht in dem Versuch, eine Formel allgemeinerer Art für das Kriterium der Kavitationsentstehung an einer körnigen Betonoberflächenrauigkeit zu finden. Die Versuche wurden in einem geschlossenen Kavitationswasserrohr durchgeführt. Ein Elektromotorantrieb ermöglichte die Regelung von Pumpendurchfluß und -druckhöhe. Dabei konnte man den Pumpendurchfluß von 0 bis 6 l/sec verändern, die Druckhöhe von 0 bis 40 m. Der Arbeitsquerschnitt der Kammer betrug 25 X 25 mm und weniger. Die mittleren Geschwindigkeiten veränderten sich im Arbeitsquerschnitt von 0 bis 25 m/sec. Der Druck im Wasserrohr wurde mit Hilfe zweier Systeme geregelt: durch ein Vakuumsystem (Verdünnung bis zu 7 m Vakuum) und durch ein Drucksystem (Druckgefällesystem) (Druckgefälle bis zu 50 m Überdruck). Eine gleichmäßige Rauigkeit wurde dadurch erzielt, daß man den Zuschlagstoff mit vorgegebener Fraktion auf eine Fläche klebte. Der Zuschlagstoff ragte dabei durchschnittlich um die Höhe  $(0,25 - 0,5) d_{cp}$  aus der stacheligen Masse heraus, wobei  $d_{cp}$  der mittlere Durchmesser des Zuschlagstoffes war. Die Modelle hatten eine Strömungslänge von 150 - 200 mm. Das Zuströmungsfeld und die drei anderen Wände bestanden aus organischem Glas und verfügten praktisch über die ideale Glätte und Durchsichtigkeit. Im ganzen wurden zwei Typen von Rauig-

keit untersucht. Im ersten Fall wurde die Rauhmigkeit durch zerkleinerten Bruchschotter erzeugt. Auf jedes Modell wurde Schotter einer bestimmten Fraktion geklebt. Diese Fraktionen hatten folgende Durchmesser (in mm): 1,0 + 1,25; 1,25 + 2,5; 2,5 + 5,0; 5,0 + 10,0; 10,0 + 15,0; 15,0 + 20,0. Im zweiten Fall wurde die Rauhmigkeit durch gut abgerundete Fraktionen mit einem Durchmesser (in mm) von: 2,5 + 5,0; 5,0 + 10,0; 15,0 + 20,0 erzeugt. Durch Regelung des Druckes wurden die Bedingungen in dem System so gewählt, daß bei gegebenen Geschwindigkeiten an den einzelnen Vorsprüngen eine Wechselkavitation entstand, die sich visuell und akustisch fixieren ließ. Dabei wurden im Arbeitsquerschnitt der Versuchsmodellzone Messungen der piezometrischen Drucke durchgeführt und die Linien der über die Zeit gemittelten Geschwindigkeiten mit Hilfe eines Pitotrohrs spezieller Konstruktion gemessen. Auf Abbildung 1 ist der Querschnitt eines untersuchten Modells in der der Strömungsachse parallelen Ebene schematisch dargestellt. Die maximale Höhe des Vorsprungs ist  $\delta = (0,25 - 0,5) d_{cp}$ , wobei  $d_{cp}$  der mittlere Fraktionsdurchmesser ist. Unter diesen Bedingungen fallen Vorsprünge mit der Höhe  $\delta$  und mit kleinerer Höhe in die Schnittebene, wobei der Abstand zwischen den höchsten Vorsprüngen - L - in den Grenzen  $L = (2 - 4) d_{cp}$  liegen wird.

Aus [L. 1] ist bekannt, daß der Kavitationsparameter K einer einzelnen Unebenheit zweckmäßigerweise folgendermaßen ausgedrückt wird:

$$K = \dots \quad (1)$$

In der Formel (1) ist  $H_{okp}$  der gemittelte absolute Druck über der Unebenheit. Für den Fall der druckfreien Strömung gilt  $H_{okp} = (H_r + H)$ , wobei  $H_r$  die Tiefe der druckfreien Strömung über dem Vorsprung und H der Atmosphärendruck ist.

Für den Fall der Druckströmung ist  $H_{okp} = (H_{piez} + H)$ , wobei  $H_{piez}$  der piezometrische Druck über dem Vorsprung,  $H_k$  der kritische Flüssigkeitssiededruck,  $v_{nos}$  die Aufströmungsgeschwindigkeit auf den Vorsprung ist.

Die physikalische Bedeutung der Größe K besteht darin,

daß sie gleich der Summe der Koeffizienten der Minimaldruckminderung im jeweiligen Kavitationsstadium ist; diese Koeffizienten der Minimaldruckminderung werden durch die verschiedenen in der Umgebung der Unebenheit - infolge der Erregung des aufströmenden Stroms durch die Unebenheit und infolge der Turbulenz des austromenden Stroms - auftretenden Kräfte bedingt. Zu diesen Kräften gehören die Zentrifugalkräfte, die durch die Biegung des Strömungsstrahls in der Umgebung des umströmten Körpers, durch die Verdünnung in den diskreten Wirbeln, die von der Unebenheit her kommen und sich an der Grenze zwischen toter Zone und Transitstrahl bewegen, entstehen; die Turbulenzpulsationen im Transitstrahl und in der toten Zone usw. Der Kavitationsparameter eines einzelnen Zuschlagsteins an einer glatten Fläche wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$K = \quad , \quad (2)$$

wobei  $v_s$  die nach der Geschwindigkeitskurve im Zustrombereich bestimmbare Geschwindigkeit in der Höhe des Vorsprungs ist (Abbildung 1). Untersuchen wir, wie sich die schematische Darstellung der Umströmung ändert, wenn sich der Zuschlagstein in einer Gruppe gleichartiger Zuschlagsteine befindet (Abbildung 1, Nr 2). In diesem Falle vollziehen sich hinsichtlich der Umströmung folgende Veränderungen: Die Geschwindigkeitskurve erfährt im Zustrombereich eine Transformation, und die Geschwindigkeit  $v_s$  wird infolge der Bodenschichtentwicklung radikal verringert. Die Größe  $v_s$  ist bei gegebener Größe der Vorsprünge  $d_{cp}$  und bei gegebenen hydraulischen Parametern leicht zu bestimmen. Einfache Berechnungsabhängigkeiten zur Bestimmung der Geschwindigkeit  $v_s$  werden in [L. 4] behandelt. Eine andere Veränderung wird darin bestehen, daß Vorsprung 2 sozusagen im Schatten von Vorsprung 1 (genauer gesagt, im Satellitenstrahl von Vorsprung 1) liegt. Die von Stein 1 auf Stein 2 aufströmende Wirbelung erhöht die Verdünnung, die durch die Erregungen in der Zone von Stein 2 entsteht (die Turbulenzkomponente wird größer). Die Intensität der Verwirbelung im Wirbelschleier, der auf Stein 2 strömt, wird mit Vergrößerung des Abstands  $L$  ein wenig geringer. Eine von uns durchgeführte spezielle Ver-

suchsreihe zur Untersuchung der Wirbelstruktur der Strömung hinter schwerzumströmenden Körpern zeigte, daß in der Nähe des Ablösungspunktes die Wirbelmassen eine fortschreitende Strömungsgeschwindigkeit von  $v \approx 0,25 v_s$  haben. Die weitere Strömung der Wirbelmassenschwerpunkte erfolgt in einem gewissen Bereich mit konstanter Beschleunigung, die von der Größe  $v_s$  abhängt. So hängt die tatsächliche Aufströmungsgeschwindigkeit auf Vorsprung 2 nicht nur von  $v_s$  ab, sondern auch von der Entfernung L. Infolgedessen kann man die durch die Strömungserregungen in der Zone von Stein 2 bedingten Verdünnungen nach folgender Formel bestimmen:

(3)

wobei  $K_{kp}$  der kritische Kavitationsparameter eines einzelnen Zuschlagsteins an einer glatten Fläche;  $\alpha$  der Korrekturfaktor des kritischen Kavitationsparameters für die Erhöhung der Strömungsturbulenz  $m$  des Wirbelschleiers, der von Vorsprung 1 kommt und auf Vorsprung 2 aufströmt;  $\beta$  die Korrektur zur Geschwindigkeit  $v_s$ , die die Tatsache berücksichtigt, daß Vorsprung 2 in den Satellitenstrahl von Vorsprung 1 fällt und deshalb die tatsächliche Aufströmungsgeschwindigkeit  $v_k$  auf Vorsprung 2 geringer ist als die Geschwindigkeit  $v_s$ , wobei die Geschwindigkeit  $v_k$  um so kleiner ist, je kleiner der Abstand L ist. Formel (3) kann man auch folgendermaßen darstellen:

(3a)

wobei  $\tau^{(L)} = \alpha\beta^2 = f(L)$  der Gesamtkorrekturfaktor für die Abschirmung von Vorsprung 2 durch den vorgelagerten Vorsprung 1 ist bei einem Abstand L zwischen den beiden Vorsprüngen.

Die direkte Bestimmung der Funktion  $\tau^{(L)}$  ist schwierig. Im übrigen zeigten unsere Versuche zur Untersuchung der Strömungswirbelstruktur hinter schwerumströmbareren Körpern, daß die Parameter des von verschiedenen schwerumströmbareren Körpern kommenden Wirbelschleiers in geringem Maße von der Form dieses Körpers abhängt und hauptsächlich durch die äußere Umströmungsgeschwindigkeit bestimmt wird. Auf Abbildung 1 und 2 sind die Wirbelstrukturen der Strömungen dargestellt, die auf die untere, im Strahl der oberen Rippe gelegene Spaltrippe

und auf den im Satellitenstrahl von Vorsprung 1 gelegenen Vorsprung 2 aufströmen. Der vom Körper her kommende Wirbelschleier zerfällt in eine Reihe diskreter Wirbel. Die Geschwindigkeit der Wirbelschwerpunkte wird nach unten zu mit der Strömung größer, und zwar von  $0,25 v_{\delta}$  im Punkt der Schleierablösung vom Körper bis zu  $v_{\delta}$  in einem gewissen Abstand vom Körper, wobei  $v_{\delta}$  die äußere Umströmungsgeschwindigkeit ist. Die tatsächliche Aufströmungsgeschwindigkeit auf die untere Spaltenkante und auf Vorsprung 2 wird also durch die gleiche Funktion ausgedrückt, die nur von der äußeren Umströmungsgeschwindigkeit  $v_{\delta}$  und von der Entfernung  $L$  abhängt. Die Verwirbelungszahl der diskreten Wirbel wird nach unten zu mit der Strömung kleiner und wird ebenfalls in beiden Fällen nur durch die Größen  $v_{\delta}$  und  $L$  bestimmt. Deshalb setzt man natürlicherweise voraus, daß die Größe des Korrekturfaktors  $\tau^{(L)}$  bei der Berechnung der Verdünnung (auch: Unterdruck) inolge des erregten Spaltes bei der unteren Rippe und bei Vorsprung 2 ungefähr gleich ist, d. h. daß sich für das Stadium der entstehenden Kavitation folgende Beziehung ergibt:

(4)

wobei  $H_{\text{okp}}^{(L)}$  der mittlere absolute Druck über der unteren Spalt-rippe ist, bei dem hinter dieser Rippe die Kavitation entsteht; die Spaltbreite ist in diesem Falle gleich  $L$ , die äußere Geschwindigkeit gleich  $v_{\delta}$  (Abbildung 2);  $K_{\text{krit}}^{\text{max}}$  ist die bei allen Spaltöffnungswerten maximal mögliche Größe des kritischen Kavitationsparameters;  $\tau_{\text{Spalt}}^{(L)}$  ist der für die jeweilige Spaltöffnung  $L$  (oder für den jeweiligen Abstand  $L$  von Vorsprung 1 zu Vorsprung 2) geltende Korrekturfaktor.

Aus dieser Bestimmung ergibt sich offensichtlich:

(5)

wobei  $K_{\text{krit}}^{(L)}$  der kritische Kavitationsparameter der unteren Spalt-rippe bei gegebener Spaltbreite  $L$  ist. Folglich ist

(6)

Die Aufgabe der Auffindung des Koeffizienten  $\tau^{(L)}$  kann also auf die Auffindung der kritischen Kavitationsparameter  $K_{krit}^{(L)}$  der unteren Spaltrippe bei verschiedenen Öffnungsgrößen  $L$  reduziert werden. Die Versuche mit dem Spalt lassen sich einwandfrei und mit höchster Präzision durchführen. Auf Abbildung 3 ist die Funktion  $\tau^{(L)}$ , wie sie sich aus den Ergebnissen der Auswertung unserer Versuche mit dem Spalt ergibt, dargestellt.

Die Richtigkeit der oben behaupteten Zulassungen wurde folgendermaßen geprüft. Auf Abbildung 4 sind an der Abszissenachse die Geschwindigkeiten  $v_{\delta}$  und an der Ordinatenachse der Druck über der Unebenheit  $H_{okp}$  eingetragen, bei dem bei gegebener Geschwindigkeit  $v_{\delta}$  die Kavitation beginnt. Jede Kurve grenzt den Kavitationsbereich von dem kavitationsfreien Bereich einer gleichmäßigen, durch zerkleinerten Bruchschotter vorgegebener Fraktion erzeugten Rauigkeit ab (die Fraktionsdurchmesser sind in mm angegeben). Eine analoge Kurvenserie ergab sich auch für die Rauigkeit, die durch gut abgerundeten Zuschlagstoff (in der Art von Kiesel) mit verschiedenen Fraktionsgrößen erzeugt wurde. Die graphische Darstellung von Abbildung 4 zeigt, daß die Kavitationszone (die Zone, die unterhalb der entsprechenden Kurve liegt) mit wachsendem Durchmesser des Zuschlagstoffes vorgegebener Form bedeutend größer wird; d. h. je größer der Fraktionsdurchmesser bei ein und derselben Geschwindigkeit  $v_{\delta}$  ist, bei desto höherem Druck  $H_{okp}$  entsteht die Kavitation. Die Gleichungen der Kurven von Abbildung 4 lauten, wie bereits oben erwähnt, folgendermaßen:

$$H_{okp} =$$

Auf Abbildung 5 sind die gleichen Werte in die graphische Darstellung eingetragen; an der horizontalen Achse ist die Geschwindigkeit  $v_{\delta}$  abgetragen und an der vertikalen die Größe  $H_{okp}$ , wobei  $\tau^{(L)}$  für jede Fraktion nach der graphischen Darstellung von Abbildung 3 bestimmt wurde. Alle sechs Kurven von Zeichnung 4, die sich auf die Fraktionen von Bruchschotter beziehen, fielen unter eine Kurve, deren Gleichung lautet, wobei die Größe  $K_{kpl} = 0,8$  der kritische Kavitationsparameter (in Form von 1) für einen einzelnen, auf eine glatte

II

IV

V

Fläche geklebten Bruchstein ist. Die drei analogen Kurven für die Rauigkeit bei gut abgerundeten Fraktionen fielen unter eine andere Kurve, deren Gleichung (1) lautet, wobei  $K_{kp2} = 1,4$  der kritische Kavitationsparameter für einen einzelnen, auf eine glatte Fläche geklebten Stein mit gut abgerundeter Form ist. Die dichte Verteilung der Punkte um die für den jeweiligen Unebenheitstypus charakteristischen Kurven beweist, daß die der Analyse dieses Problems zugrunde gelegten Gedanken wahrscheinlich der Wirklichkeit sehr nahe kommen.

Von diesen Darlegungen ausgehend, besteht die Berechnung des Kavitationsbeginns einer natürlichen körnigen Betonoberflächenrauigkeit aus folgenden Berechnungsvorgängen:

1. Die reale Geschwindigkeitsverteilungskurve wird unter Berücksichtigung der Rauigkeit des Strömungsbettes und der hydraulischen Parameter bestimmt.

2. Entsprechend der gewonnenen Geschwindigkeitsverteilungskurve wird die Geschwindigkeitsgröße  $v_s$  in Höhe der Rauigkeitsvorsprünge bestimmt.

3. Nach Tabelle 2 wird entsprechend der Form des Zuschlagstoffes der kritische Kavitationsparameter  $K_{kp}$  für einen einzelnen Stein auf einer glatten Fläche bestimmt.

Die in Tabelle 2 aufgeführten Werte wurden von uns in einer speziellen Versuchsserie gewonnen.

4. Nach der graphischen Darstellung auf Abbildung 3 wird die Abschirmung  $\zeta^{(L)}$  bei  $L = 4 d_{op}$  bestimmt, wobei  $d_{op}$  der mittlere Durchmesser der freigelegten Fraktion des Zuschlagstoffes ist. Die Bedingung für nichtstattfindende Kavitation wird nach folgender Gleichung bestimmt:

(7)

wobei  $H_{okp}$  der absolute Druck in über der Rauigkeit ist.

In der Veröffentlichung [L. 3] werden Fälle für lokale Kavitationsschäden an einer Betonoberfläche erörtert, die entstehen, wenn sich letztere an eine glatte Metallverklei-



dung anschliesst. Die Berechnung dieses Falles geht folgendermaßen vor sich: 1. Es wird die reale Geschwindigkeitsverteilungskurve im glatteren Zustrombereich bestimmt. 2. Nach dieser Kurve wird die Größe  $v_{\delta}^{\text{II}}$  in Höhe des Vorsprungs der Rauigkeit des zweiten rauheren Bereichs bestimmt. 3. Nach Tabelle 2 wird bei gegebener Form des Zuschlagstoffes der rauheren Bereichs  $K_{\text{kp}}$  bestimmt. Da ja die Kavitation in diesem Falle hinter den 1. Vorsprüngen des rauheren Bereichs beginnt, ist kein Korrekturfaktor zur Abschirmung  $\tau^{(2)}$  einzuführen. Die Bedingung für die nichtstattfindende Kavitation lautet folgendermaßen:

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

wobei  $v_{\delta}^{\text{II}}$  die Aufströmungsgeschwindigkeit auf den zweiten rauheren Bereich ist.

Schließlich ist zu bemerken, daß die Berechnung des Kavitationsbeginns an einer natürlichen körnigen Oberflächenrauigkeit bedingt ist. Bei hohen Geschwindigkeiten in offenen Strömungen (z. B. bei Wasserüberfällen) spielt bei den Erosionsprozessen die dem Wasser beigemengte Luft eine wesentliche Rolle. Es erscheint begründet anzunehmen, daß der Verschleiß der Betonoberfläche infolge von der an einer natürlichen Rauigkeit entstehenden Kavitation ziemlich gleichmäßig verläuft. Dafür spricht die Erfahrung mit vielen Wasserüberfalloberflächen, die bei Strömungsgeschwindigkeiten von 25 - 30 m/sec und höher gut arbeiten. Deshalb kann man annehmen, daß wir die Kavitationsgefahr einer natürlichen Betonoberflächenrauigkeit ein wenig übertreiben. Einer sorgfältigen Untersuchung bedürfen noch die Erosionsprobleme, sie werden hier nicht erörtert.

#### L I T E R A T U R

1. Rozanov, N.F., P.P. Mojs, E.K. Paškov, G.A. Vorob'ev: Prognozirovanie načala kavitacii na nerovnostjach betonnoj poverchnosti, "Izvestija VNIIG", t. 78 (1965)
2. s. Orig.
3. s. Orig.
4. Nikitin, I.K.: Turbulentnyj ruslovoj potok i processy v prirodnoj oblasti, Isd-vo AN USSR, 1963.

Eingegangen am 25. Februar 1965.

Abbildung 1. Schematische Darstellung zur Analyse des physikalischen Bildes der Umströmung einer natürlichen körnigen Betonoberflächenrauigkeit.

Abbildung 2. Obere Struktur der Spur hinter der oberen Spaltrippe.

Abbildung 3. Graphische Darstellung der Abschirmungsfunktionen (die experimentellen Punkte sind den Versuchen mit dem Spalt entsprechend eingetragen).

Abbildung 4. Kurvenverbindungen zwischen  $H_{okp}$  und  $v_s$ , bei deren Koordinierung die Kavitation an einer körnigen, durch eine bestimmte Fraktion erzeugten Rauigkeit entsteht. Die Kurven gelten für Bruchschotter. Die Fraktionsgröße ist bei den Kurven in mm angegeben.

Abbildung 5. Universalkurven für die jeweilige Form des Zuschlagstoffes, wobei  $\frac{H_{okp}}{v_s^2}$  und  $v_s$ , bei deren Koordinierung die Kavitation an einer körnigen Rauigkeit entsteht, in Beziehung gesetzt werden. Die Kurve  $K_{kp} = 3,8$  charakterisiert die Kavitationseigenschaften der durch Bruchschotter erzeugten Rauigkeit. Die Kurve  $K_{kp} = 1,4$  charakterisiert die Kavitationseigenschaften der durch gut abgerundeten Kies oder Kiesel erzeugten Rauigkeit.

Tabelle 2. Kritische Kavitationsparameter für einen einzelnen Zuschlagstein vorgegebener Form auf einer glatten Fläche.

---

#### Anmerkung des Übersetzers

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

23. XI. 66

Spunberg-Wiesike

*Инж. Г. А. Воробьев*

Московский инженерно-строительный институт имени В. В. Куйбышева

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛА КАВИТАЦИИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ НА ЕСТЕСТВЕННОЙ ЗЕРНИСТОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ БЕТОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования условий возникновения кавитации на естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности. Показывается, что при правильном выборе характерной скорости и характерного давления величина критического параметра кавитации одиночного камня-заполнителя, расположенного на гладкой плоскости, определяется только формой заполнителя. При расположении одиночного камня-заполнителя среди группы ему подобных, т. е. в условиях реальной шероховатости, влияние окружающих камней-заполнителей на рассматриваемый сказывается двояким образом. Во-первых, резко трансформируется эюра распределения скоростей на подходе участка вследствие развития придонного слоя, в результате чего уменьшается скорость набегающего потока на рассматриваемый выступ. Во-вторых, данный камень-заполнитель попадает в спутную струю впереди расположенных по течению камней-заполнителей. Вследствие этого дополнительно уменьшается скорость набегающего потока на рассматриваемый выступ и увеличивается турбулентность набегающего потока. Указанные влияния учитываются так называемой функцией затенения  $\tau$ . В работе приводятся простые зависимости, позволяющие выполнять инженерные расчеты по определению начала кавитации на естественной зернистой шероховатости различной формы и размеров и при различных гидравлических условиях.

Актуальной проблемой современного гидротехнического строительства является определение условий возникновения кавитации на неровностях поверхности ложа высоконапорных водосбросов. Условия возникновения кавитации на одиночных неровностях бетонной поверхности, происходящих, главным образом, от дефектов производства работ, изложены в работе [Л. 1] и здесь не рассматриваются. В данной работе приводится анализ проблемы возникновения начала кавитации на естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности водосбросов. Этот вид неровности возникает вследствие вымыва вяжущего в поверхностном слое бетона и частичного обнажения заполнителя. В работе [Л. 2] Колгейт описал случай возникновения кавитации на зернистой шероховатости поверхности водослива. Другой случай был отмечен в работе [Л. 3], когда локальные кавитационные повреждения возникли за участком сопряжения гладкой металлической облицовки с более шероховатой бетонной поверхностью. Аналогичные локальные повреждения отмечаются и другими авторами. В работе [Л. 2] Колгейт

приводит кривые, разграничивающие кавитационный и безкавитационный режимы работы зернистой шероховатости. Очертание этих кривых аналогично очертанию кривых, приводимых на рис. 4. Автор связал зависимость величины давления над образцом  $H$  с так называемой скоростью трения  $\frac{\tau_0}{\rho}$ , при сочетании которых возникает кавитация.

Однако можно показать, что для того, чтобы кривые, полученные в работе [Л. 2] и ограничивающие кавитационный режим обтекания, были одинаковыми и для натуре, и для модели, одного равенства размеров шероховатости натуре и модели, как это принято в работе [Л. 2], недостаточно. Необходимо еще, чтобы эпюра распределения скоростей на модели и в натуре была одинаковой по крайней мере на некоторую высоту от вершины выступов. Это возможно только в том случае, если помимо равенства размеров шероховатости гидравлические характеристики потока (и в частности гидравлический радиус) будут одинаковыми, а придонный слой получит одинаковую степень развития в натуре и на модели. Соблюдение перечисленных требований практически никогда не бывает возможным. Поэтому как сама методика, так и возможность непосредственного использования данных, приводимых в работе [Л. 2], для кавитационных расчетов вызывают возражения.

Задача, поставленная в настоящей работе, заключалась в том, чтобы попытаться найти наиболее общее выражение для критерия возникновения кавитации на зернистой шероховатости бетонной поверхности. Опыты выполнялись в кавитационной гидротрубе замкнутого типа. Электромоторный привод обеспечивал возможность регулирования расходов и напоров насоса. При этом расход насоса можно было изменять от 0 до 6 л/сек, а напор от 0 до 40 м. Рабочее сечение камеры имело размеры 25×25 мм и менее. Средние скорости в рабочем сечении изменялись от 0 до 25 м/сек. Давление в гидротрубе регулировалось с помощью двух систем: вакуумной (разрежения до 7 м в. ст. вакуума) и напорной (напор до 50 м в. ст. избыточной). Равномерная шероховатость создавалась путем наклейки заполнителя заданной фракции на плоскость. При этом заполнитель выступал из колошей массы в среднем на высоту  $(0,25 - 0,5)d_{cp}$ , где  $d_{cp}$  — средний диаметр заполнителя. Образцы имели длину по течению 150—200 мм. Подходной участок и три другие стенки рабочей камеры выполнялись из оргстекла и были практически идеально гладкими и прозрачными. Всего было испытано два варианта шероховатости. В первом варианте шероховатость создавалась колотым рваным щебнем. На каждый образец наклеивался щебень только одной фракции. Эти фракции имели следующие диаметры (в мм): 1,0 : 1,25; 1,25 : 2,5; 2,5 : 5,0; 5,0 : 10,0; 10,0 : 15,0; 15,0 : 20,0. Во втором варианте шероховатость создавалась хорошо окатанными фракциями, диаметром (в мм): 2,5 : 5,0; 5,0 : 10,0; 15,0 : 20,0. Путем регулирования давления в системе подбирались такие условия, чтобы при данных скоростях возникала перемежающаяся кавитация на отдельных выступах, которая фиксировалась визуально и по шуму. При этом производились замеры пьезометрических давлений в рабочем сечении в зоне образца и замерялись эпюры осредненных по времени скоростей с помощью трубки Пито особой конструкции. На рис. 1 схематически изображено сечение испытываемого образца плоскостью, параллельной оси потока. Максимальная высота выступа  $\delta = (0,25 - 0,5)d_{cp}$ , где  $d_{cp}$  — средний диаметр фракции. При этих условиях оказывается, что в плоскость сечения будут попадать выступы высотой  $\delta$  и меньшей высоты. Причем расстояние между наиболее высокими выступами  $L$  будет колебаться в пределах  $L = (2 - 4)d_{cp}$ .

Из работы [Л. 1] известно, что параметр кавитации  $K$  одиночной неровности удобно записывать в форме:

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

В формуле (1)  $H_{\text{окр}}$  — осредненный абсолютный напор над неровностью. Для случая безнапорного движения  $H_{\text{окр}} = (H_{\text{г}} + H)$ , где  $H_{\text{г}}$  — глубина безнапорного потока над выступом,  $H$  — атмосферное давление.

Для случая напорного движения  $H_{\text{окр}} = (H_{\text{пъез}} + H)$ , где  $H_{\text{пъез}}$  — пьезометрический напор над выступом;  $H_{\text{к}}$  — критическое давление вскипания жидкости;  $v_{\text{наб}}$  — скорость набегающего на выступ.

Физический смысл величины  $K$  заключается в том, что она равна сумме коэффициентов понижения минимального давления при данной стадии кавитации, обусловленных различными силами, проявляющимися в окрестности неровности из-за возмущения набегающего потока данной неровностью и из-за турбулентности набегающего потока. К этим силам относятся центробежные силы, возникающие вследствие искривления струй потока в окрестности обтекаемого тела, разрежения внутри дискретных вихрей, сходящихся с неровности и движущихся на границе раздела между мертвой зоной и транзитной струей; турбулентные пульсации в транзитной струе и в мертвой зоне и т. д. Параметр кавитации одиночного камня-заполнителя, расположенного на гладкой плоскости, записывается в виде:

$$K = \frac{H_{\text{окр}} - H_{\text{к}}}{\frac{v_6^2}{2g}}, \quad (2)$$

где  $v_6$  — скорость на высоте выступа, определяемая по эпюре скоростей на подходном участке (рис. 1). Рассмотрим, как изменится схема обтекания в случае, если данный камень-заполнитель разместить внутри группы таких же камней-заполнителей (на рис. 1, точка 2). При этом в схеме обтекания произойдут следующие изменения. Эпюра скоростей на подходном участке претерпит трансформацию, и скорость  $v_6$  вследствие развития придонного слоя резко уменьшится. Величина  $v_6$  легко определяется расчетом при заданной величине выступов  $d_{\text{ср}}$  и заданных гидравлических параметрах. Простые расчетные зависимости по определению скорости  $v_6$  приводятся в работе [Л. 4]. Другое изменение будет заключаться в том, что выступ 2 располагается как бы в тени выступа 1 (точнее в спутной струе выступа 1). Завихренность, набегающая со стороны камня 1 на камень 2, увеличивает разрежение от возмущений в зоне камня 2 (увеличивается турбулентная составляющая). Интенсивность завихренности в вихревой пелене, набегающей на камень 2, несколько уменьшается с увеличением расстояния  $L$ . Специальная серия опытов по исследованию вихревой структуры по-

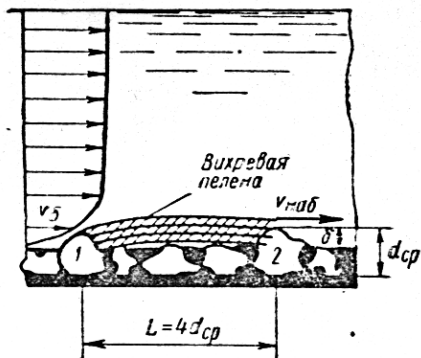


Рис. 1. Схема к анализу физической картины обтекания естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности.

тока за плохо обтекаемыми телами, выполненная нами, показала, что вблизи точки отрыва вихревые массы имеют поступательную скорость движения  $v_{\text{схода}} \approx 0,25v_0$ . Далее центры тяжести вихревых масс движутся на некотором участке с постоянным ускорением, зависящим от величины  $v_0$ . Таким образом, истинная скорость набегания на выступ 2 зависит не только от  $v_0$ , но и от расстояния  $L$ . Следовательно, разрежения, вызываемые возмущениями потока в зоне камня 2, можно оценить по формуле

$$\Delta H_{\text{разр}} = K_{\text{кр}2} \left[ \frac{(v_0 \beta)^2}{2g} \right], \quad (3)$$

где  $K_{\text{кр}}$  — критический параметр кавитации одиночного камня-заполнителя, расположенного на гладкой плоскости;  $\beta$  — поправка к критическому параметру кавитации на увеличение турбулентности потока  $m$  вихревой пелены, сходящей с выступа 1 и набегающей на выступ 2;  $\beta$  — поправка к скорости  $v_0$ , учитывающая, что рассматриваемый выступ 2 попадает в спутную струю выступа 1, и поэтому истинная скорость набегания  $v_n$  на выступ 2 меньше, чем скорость  $v_0$ . При-

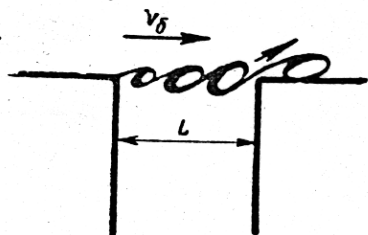


Рис. 2. Верховая структура следа за верхним ребром щели.

чем скорость  $v_n$  тем меньше, чем меньше расстояние  $L$ . Формулу (3) можно также представить в виде

$$\Delta H_{\text{разр}} = K_{\text{кр}} \cdot \tau^{(L)} \frac{v_0^2}{2g}, \quad (3a)$$

где  $\tau^{(L)} = \alpha \beta^2 = f(L)$  — суммарная поправка на затенение рассматриваемого выступа 2, впереди расположенным выступом 1 при расстоянии между выступами  $L$ .

Непосредственное определение функции  $\tau^{(L)}$  является затруднительным. Между тем наши опыты по исследованию вихревой структуры потока за плохо обтекаемыми телами показали, что параметры вихревой пелены, сходящей с различных плохо обтекаемых тел, мало зависят от формы этого тела и определяются, главным образом, внешней скоростью обтекания. На рис. 1 и 2 изображены вихревые структуры потоков, набегающих на низовое ребро щели, расположенное в струе верхового ребра, и на выступ 2, расположенный в спутной струе выступа 1. Вихревая пелена, сходящая с тела, распадается на ряд дискретных вихрей. Скорость центров тяжести этих вихрей увеличивается вниз по потоку от значения  $0,25v_0$  у точки отрыва пелены от тела до величины  $v_0$  на некотором расстоянии от тела, где  $v_0$  — внешняя скорость обтекания. Таким образом истинная скорость набегания на низовую грань щели и на выступ 2 выражается одной и той же функцией, зависящей только от внешней скорости обтекания  $v_0$  и расстояния  $L$ . Количество завихренности, присутствующее в дискретных вихрях, уменьшается вниз по течению и также в обоих случаях определяется только величинами  $v_0$  и  $L$ . Поэтому естественно предположить, что величина поправочного коэффициента  $\tau^{(L)}$  будет примерно одинакова при вычислении разрежения от возмущенной у низового ребра щели и у выступа 2, т. е. в стадии возникающей кавитации имеем:

$$\tau_{\text{выст. 2}}^{(L)} \approx \tau_{\text{щели}}^{(L)} = \frac{H_{\text{окр}}^{(L)} - H_{\text{к}}}{K_{\text{кр}}^{\text{макс}} \frac{v_0^2}{2g}}, \quad (4)$$



где  $H_{\text{окр}}^{(L)}$  — средний абсолютный напор над низовым ребром щели, при наличии которого за этим ребром возникает кавитация. Причем ширина щели в этом случае равна  $L$ , а внешняя скорость равна  $v_6$  (рис. 2);  $K_{\text{кр}}^{\text{макс}}$  — максимально возможная при всех значениях раскрытия щели величина критического параметра кавитации;  $\tau_{\text{щели}}^{(L)}$  — поправочный коэффициент, справедливый при данном раскрытии щели  $L$  (или при данном расстоянии  $L$  от выступа 1 до выступа 2).

Очевидно, что согласно определению

$$\frac{H_{\text{окр}}^{(L)} - H_{\text{к}}}{\frac{v_6^2}{2g}} = K_{\text{кр}}^{(L)} \quad (5)$$

где  $K_{\text{кр}}^{(L)}$  — критический параметр кавитации низового ребра щели при заданной ширине последней  $L$ . Следовательно

$$\tau_{\text{выст. 2}}^{(L)} = \tau_{\text{щели}}^{(L)} = \frac{K_{\text{кр}}^{(L)}}{K_{\text{кр}}^{\text{макс}}} \quad (6)$$

Таким образом задача нахождения коэффициента  $\tau^{(L)}$  может быть сведена к нахождению критических параметров кавитации  $K_{\text{кр}}^{(L)}$  низового ребра щели при разных величинах ее раскрытия  $L$ . Опыты со щелью можно выполнить весьма чисто и с большей степенью точности. На рис. 3 приведена функция  $\tau^{(L)}$ , полученная по результатам обработки наших экспериментов со щелью.

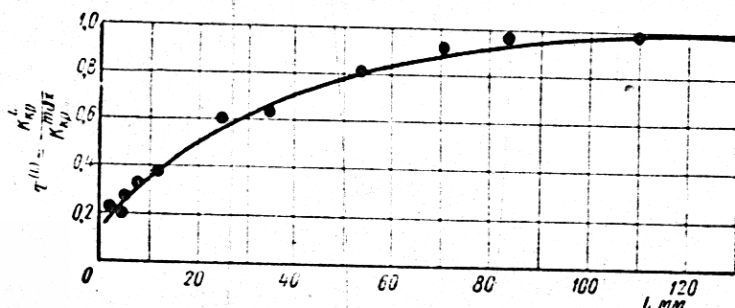


Рис. 3. График функции затенения (экспериментальные точки нанесены по экспериментам со щелью).

Справедливость выдвинутых выше допущений была проверена следующим образом. На рис. 4 по оси абсцисс нанесены скорости  $v_6$ , а по оси ординат давление над неровностью  $H_{\text{окр}}$ , при котором при заданной скорости  $v_6$  начинается кавитация. Каждая кривая разграничивает кавитационную и бескавитационную область работы равномерной шероховатости, создаваемой колотым рваным щебнем заданной фракции (диаметры фракций указаны в мм). Аналогичная серия кривых была получена и для шероховатости, создаваемой очень хорошо окатанным заполнителем (типа гальки) разных размеров фракций. График рис. 4 показывает, что кавитационная зона (зона расположенная ниже соответствующей кривой) сильно увеличивается с возрастанием диаметра заполнителя заданной формы, т. е., чем больше диаметр фракции при одной и той же скорости  $v_6$ , тем при более высоком напоре  $H_{\text{окр}}$  возникает кавитация. Уравнения кривых рис. 4, как было показано выше, имеют вид:  $H_{\text{окр}} = K_{\text{кр}} \tau^{(L)} \frac{v_6^2}{2g}$ .

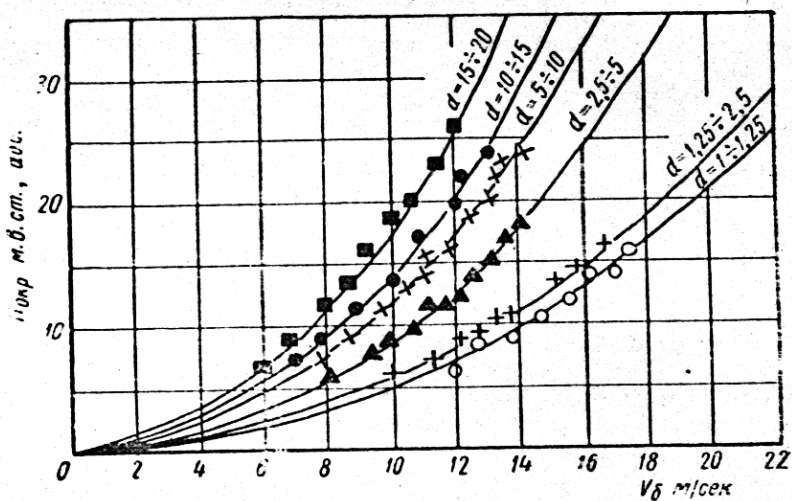


Рис. 4. Кривые связи между  $H_{окр}$  и  $v_б$  при сочетании которых возникает кавитация на зернистой шероховатости, образованной данной фракцией. Кривые получены для рваного щебня. Размер фракций у кривых дан в мм.

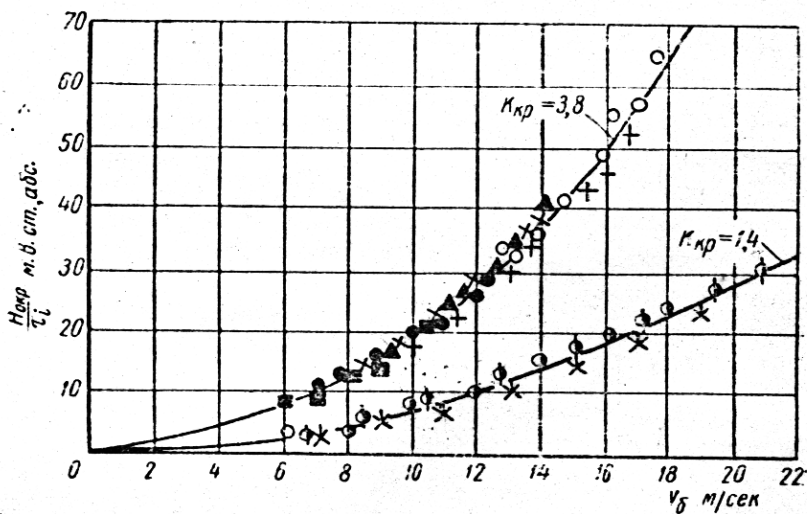


Рис. 5. Универсальные для данной формы заполнителя кривые связи между  $\frac{H_{окр}}{L \cdot v_б}$  и  $v_б$  при сочетании которых возникает кавитация на зернистой шероховатости. Кривая  $K_{кр}=3,8$  характеризует кавитационные свойства шероховатости, созданной рваным щебнем. Кривая  $K_{кр}=1,4$  характеризует кавитационные свойства шероховатости, созданной хорошо окатанным гравнем, галькой.



На рис. 5 те же данные нанесены на график, где по горизонтальной оси отложена скорость  $v_6$ , а по вертикальной — величина  $\frac{H_{окр}}{\tau(L)}$ , где  $\tau(L)$  определялась для каждой фракции по графику рис. 3. Все шесть кривых рис. 4, относящиеся к фракциям рваного щебня, легли на одну кривую, уравнение которой  $\frac{H_{окр}}{\tau(L)} = K_{кр} \frac{v_6^2}{2g}$ , где величина  $K_{кр} = 3,8$  — критический параметр кавитации (в форме 1) для одиночного рваного камня, наклеенного на гладкую плоскость. Три аналогичные кривые, полученные для шероховатости из хорошо окатанных фракций, легли на другую кривую, уравнение которой  $\frac{H_{окр}}{\tau(L)} = K_{кр} \frac{v_6^2}{2g}$ , где  $K_{кр} = 1,4$  — критический параметр кавитации одиночного камня хорошо окатанной формы, приклеенного на гладкой плоскости. Плотное расположение точек вокруг характерных для данного типа неровности кривых показывает, что идеи, заложенные в основу анализа рассматриваемой проблемы, вероятно близки к истине.

В свете изложенного расчет начала кавитации естественной зернистой шероховатости бетонной поверхности состоит из следующих этапов:

- 1) определяется реальная эпюра распределения скоростей с учетом шероховатости русла и гидравлических параметров;
- 2) по полученной эпюре распределения скоростей определяется величина скорости  $v_6$  на высоте выступов шероховатости;
- 3) по табл. 2, зная геометрическую форму заполнителя, определяем критический параметр кавитации  $K_{кр}$  для одиночного камня на гладкой плоскости.

Данные, приводимые в табл. 2, получены нами в специальной серии опытов.

ТАБЛИЦА 2

Критические параметры кавитации для одиночного камня-заполнителя заданной формы, расположенного на гладкой плоскости

Форма заполнителя бетона	$K_{кр}$
Рваный щебень . . . . .	3,8 ÷ 4,0
Окатанный гравий . . . . .	2,5 ÷ 3,0
Очень хорошо окатанный гравий, галька . . . . .	1,4 ÷ 1,6

4) По графику рис. 3 определяется затенение  $\tau(L)$  при  $L = 4d_{ср}$ , где  $d_{ср}$  — средний диаметр обнажаемой фракции заполнителя. Условие отсутствия кавитации определяется по уравнению:

$$\tau(L) \frac{v_6^2}{2g} < H_{окр} - H_{кр} \quad (7)$$

где  $H_{окр}$  — абсолютный напор в м. в. ст над шероховатостью.

В работе [Л. 3] отмечаются случаи локальных кавитационных повреждений, возникающих на бетонной поверхности, если последняя следовала за гладкой металлической облицовкой. Расчет такого случая производится в следующем порядке: 1) определяется реальная эпюра распределения скоростей на поддном более гладком участке; 2) по этой эпюре определяется величина  $v_6$  на высоте выступа шероховатости второго более шероховатого участка; 3) по табл. 2 при заданной форме заполнителя более шероховатого участка определяется

$K_{кр}$ . Поскольку кавитация в рассматриваемом примере возникает за первыми выступами более шероховатого участка, то поправку на затенение  $\tau^{(L)}$  вводить не следует. Условие отсутствия кавитации записывается в виде

$$K_{кр} \frac{(v_6^{II})^2}{2g} < H_{окр} - H_k \quad (8)$$

где  $v_6^{II}$  — скорость набегания на второй более шероховатый участок.

В заключение следует отметить, что расчет на начало кавитации на естественной зернистой шероховатости поверхности условен. При больших скоростях в открытых потоках (например, на водосливах) большую роль в эрозионных процессах начинает играть примешанный к воде воздух. Есть основания предполагать, что износ бетонной поверхности от кавитации, возникающей на естественной шероховатости, протекает достаточно равномерно. Об этом свидетельствует опыт многих благополучно работающих водосливных поверхностей при скоростях потока 25—30 м/сек и более высоких. Поэтому можно предположить, что мы несколько преувеличиваем опасность кавитации естественной шероховатости бетонной поверхности. Вопросы эрозии требуют еще тщательного изучения. Здесь эти проблемы не рассматриваются.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Розанов, П. П. Мойс, Н. Н. Пашков, Г. А. Воробьев. Прогнозирование начала кавитации на неровностях бетонной поверхности, Известия ВНИИГ\*, т. 78, 1965.
2. D. Colgate, Cavitation Damage of Roughened Concrete Surfaces, Proc. ASCE, 1959, vol. 85, n. HY 11.
3. I. Brown, Cavitation in Hydraulic Structures, Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, vol. 89, № HY1, January 1963, pt 1, p. 99—114.
4. И. К. Никитин, Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области, Изд-во АН УССР, 1963.

Поступила 25 февраля 1965 года.

## STUDY OF CAVITATION ONSET ON NATURAL GRANULAR ROUGHNESS OF CONCRETE SURFACE

By Vorobyev G. A., Engr.

The results of theoretical and experimental studies are described on the conditions of cavitation onset on natural granular irregularities of a concrete surface. It is shown that with a proper choice of characteristic velocity and pressure the value of critical cavitation parameter for an isolated stone (aggregate) on a smooth surface is dependent on the stone shape only. If a stone is among similar stones, i. e. under real roughness conditions, the effect of neighbouring stones on it is double. In the first place, the velocity distribution curve in the approach section is abruptly transformed due to the bottom layer development, thereby decreasing the run-up velocity on the stone. In the second place, the bottom stone is subjected to a vortex wake formed by the flow passing stones located in front of it. Hence, the run-up velocity on the stone decreases still more, and the turbulence of the run up flow increases. For taking into consideration the above effects a shadow function  $\tau$  is introduced. Simple relations are given for calculation of cavitation onset on a natural granular irregularities of different form and dimensions under different hydraulic conditions.