

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 532.528:532.532.8

ПРОГНОЗ КАВИТАЦИИ НА ЛОТКЕ БЫСТРОТОКА ВОДОСБРОСНОГО СООРУЖЕНИЯ

© 2013 г. П.А. Михеев, В.А. Храповский

Михеев Павел Александрович – д-р техн. наук, профессор, ректор, Новочеркасская государственная мелиоративная академия. Тел. (8635)22-21-70.

Mikheev Pavel Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, professor, rector Novocherkassk State Meliorative Academy. Ph. (8635)22-21-70.

Храповский Виктор Абрамович – канд. техн. наук, доцент, Новочеркасская государственная мелиоративная академия. Тел. (8635)22-26-96.

Khrapkovskiy Viktor Abramovich – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Novocherkassk State Meliorative Academy. Ph. (8635)22-26-96.

По данным исследования гидравлических характеристик потока на лотке быстроготока выполнен прогноз кавитации и кавитационной эрозии по методу критических параметров и методу пороговой скорости при разных размерах абсолютной шероховатости бетонной поверхности и видах неровностей. Рассматриваются мероприятия по обеспечению кавитационной стойкости сооружения.

Ключевые слова: быстроток; кавитация; параметр кавитации; кавитационные характеристики шероховатостей и неровностей; кавитационная стойкость сооружения.

On the basis of the water movement conditions investigation and hudraulic flow characteristics there is given a cavitation forecast and cavitation erosion using the method of critical parameters. Calculated dependences of the cavitation parameter on absolute concrete surface roughness are received. Some measures on structure cavitation resistance guarantee are considered.

Keywords: chute channel; cavitation and cavitation parameter; cavitation characteristics of roughness and unevenness; structure cavitation resistance.

При больших скоростях потока на бетонных поверхностях сооружений вследствие имеющихся неровностей (однородная абсолютная шероховатость бетонной поверхности, выступы и уступы от смещения опалубки, раковины и выбоины и др.), конструктивных и температурно-осадочных швов, резких изломов поверхности наблюдается понижение давления. При понижении абсолютного давления до давления насыщенных паров в жидкости образуются пузырьки воздуха, которые объединяются в воздушные полости, наблюдается разрыв сплошности потока. Попадая в область повышенного давления, воздушные пузырьки и полости могут захлопываться, растворяться.

Процесс образования, перемещения и разрушения воздушных полостей в потоке называется *кавитацией*. При захлопывании пузырьков воздуха на бетонные поверхности сооружений передаются значительные гидродинамические давления (нагрузки), под действием которых наступает усталостное разрушение бетона, называемое *кавитационной эрозией*.

Прогноз кавитации по методу критических параметров

Наиболее достоверным и экспериментально обоснованным методом прогнозирования развития кавитации и кавитационной эрозии считается расчетный метод сравнения параметров кавитации [1].

Важным параметром в оценке степени развития кавитации является число кавитации (параметр кавитации) K , равное отношению сил, препятствующих разрыву сплошности потока, к силам, обуславливающим разрыв,

$$K = \frac{(p/\rho g)_{\text{хар}} - (p/\rho g)_{\text{нас}}}{U_{\text{хар}}^2 / 2g}, \quad (1)$$

где $(p/\rho g)_{\text{хар}}$ – характерное абсолютное давление в точке на твердой границе при отсутствии неровностей, м; $(p/\rho g)_{\text{нас}} = 0,24$ м вод. ст. – давление насыщенных паров при температуре $t = +20$ °С; $U_{\text{хар}}$ – характерная скорость, равная скорости набегания потока на высоту неровности, м/с.

Отсутствие кавитации определяется соотношением

$$K > K_{\text{кр}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{кр}}$ – критическое число кавитации, величина постоянная для большинства типов неровностей, определяется опытным путем по данным измерения гидравлических характеристик потока в момент начала кавитации.

Степень развития кавитации характеризуется отношением $K/K_{\text{кр}}$: при $K/K_{\text{кр}} > 1$ – кавитация отсутству-

ет; при $K/K_{кр} = 0,7 \div 0,8$ – начальная стадия кавитации; при $K/K_{кр} = 0,7 \div 0,1$ – развитая кавитация; при $K/K_{кр} \leq 0,1$ – высшая степень кавитации или суперкавитация.

Учитывая, что в начальной стадии кавитация для водопропускных сооружений опасности не представляет, в практических расчетах рекомендуется [1, 2] вместо $K_{кр}$ использовать коэффициент начала эрозии $K_{кр.э}$, который характеризует границу перехода от «безэрозионной» кавитации, к той, которая может вызвать разрушение элементов. Величину $K_{кр.э}$ рекомендуется принимать $K_{кр.э} = 0,85 K_{кр}$. Тогда (2) можно записать в виде

$$K > 0,85 K_{кр}, \quad (3)$$

при котором кавитационная эрозия будет отсутствовать или кавитация практической опасности не представляет.

Краткая характеристика и справочные значения критических чисел кавитации $K_{кр}$ для наиболее часто встречающихся на практике неровностей приведены в табл. 1 [1, 3, 4].

Основные данные о конструкции, геометрических размерах и расчетных гидравлических характеристиках водосбросного сооружения, входящего в комплекс гидроузла, приведены в работах [5, 6]. После входной части сооружения располагается лоток быстрого тока, который состоит из трех участков с уклонами $i_1 = 0,085$, $i_2 = 0,20$, $i_3 = 0,385$. Общая длина лотка равна 259,8 м. Сооружение рассчитано на пропуск расходов расчетного $Q_{0,1\%} = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ и поверочного $Q_{0,01\%} = 2600 \text{ м}^3/\text{с}$ при напорах около 55 м.

Комплексные гидравлические исследования [5, 6], водосбросного сооружения, которые выполнялись на пространственной модели в масштабе 1:50, показали хорошую сходимость опытных глубин, измеренных на

лотке быстрого тока, и расчетных, полученных расчетом неравномерного движения воды по В.И. Чарномскому. Расхождение глубин в конце участков лотка с разными уклонами не превышает 1 – 3 см или менее 1 – 2 %.

Используя результаты расчетов неравномерного движения воды на трех участках лотка быстрого тока с разными уклонами, представленными в табл. 2, выполним прогноз кавитации и кавитационной эрозии.

Для установления начального створа кавитации выполним расчет в следующем порядке. Величины, входящие в (1), определяются по формуле

$$(p/\rho g)_{\text{хар}} = (p/\rho g)_a + h \cos \theta,$$

где $(p/\rho g)_a$ – атмосферное давление, зависящее от положения точки, $(p/\rho g)_a = 10,33 - \Delta z / 900 - 0,39 = 9,94 - \frac{399}{900} = 9,50$ м вод. ст.; $\Delta z / 900$ – поправка на превышение данной точки над уровнем моря; $\Delta z = 399$ м – абсолютная отметка точки местности сооружения; 0,39 м – понижение давления за счет метеорологических факторов; h – глубина погружения точки, м; θ – угол наклона линии дна лотка к горизонту.

Характерная скорость $U_{\text{хар}}$ набегающего потока на неровности, в соответствии с логарифмическим законом распределения скоростей Т. Кармана и Л. Прандтля, для гидравлически шероховатых русел определяется по расчетной зависимости [3, 7]

$$U_{\text{хар}} = U_* \left(5,75 \lg \frac{y}{\Delta_s} + 8,5 \right), \quad (4)$$

Таблица 1

Значение $K_{кр}$ для характерных неровностей

№ п/п	Эскиз неровности	Характеристики	$K_{кр}$
1		Равномерная естественная шероховатость $U_{\text{хар}} = 5,6 U_*$	1
2		Отдельные выступы с острой верхней кромкой	2
3		Плавный выступ (наплыв бетона и др.)	$4,2 \frac{z_n}{l}$
4		Выступ навстречу потоку (стык облицовок, выступ бетона из-за смещения опалубки и др.)	$0,125 \alpha^{0,65}$ (α – в градусах)
5		Конструктивный шов	
6		Излом поверхности	1,05

где $U_* = v\sqrt{\lambda/8}$ – динамическая скорость, м/с;
 $v = Q/(bh)$ – средняя скорость в живом сечении, м/с;
 λ – коэффициент гидравлического трения; $y = \Delta + z_n$ –
 расстояние от поверхности до точки, мм; Δ – абсо-
 лютная шероховатость бетонной поверхности, мм; z_n –
 высота неровностей, мм.

Для области квадратичного сопротивления коэф-
 фициент λ определяется по формуле Л. Прандтля
 $\lambda = 1 / \left(2 \lg \frac{3,7}{\bar{\Delta}} \right)^2$, где $\bar{\Delta} = \Delta_s / 4R$ – относитель-
 ная шероховатость; Δ_s – эквивалентная абсолют-
 ная шероховатость бетонной поверхности, мм;
 $R = \omega / \chi = (bh) / (b + 2h)$ – гидравлический радиус, м.

Выполним прогноз кавитации для разного вида и
 размеров неровностей, приведенных в табл. 1.

*Равномерно распределенная естественная шеро-
 ховатость* – бетонная поверхность со средней высо-
 той неровностей Δ (табл. 1, п. 1). Согласно рекомен-
 дациям [1], характерная скорость $U_{\text{хар}} = 5,6U_*$, кри-
 тическое число кавитации $K_{\text{кр}} = 1,0$. Тогда с учетом
 (3), условие отсутствия кавитационной эрозии имеет
 вид $K > K_{\text{кр},\varepsilon} > 0,85K_{\text{кр}} > 0,85$.

Среднее значение высоты выступов Δ (абсолют-
 ная шероховатость) для бетонной поверхности при
 тщательной затирке с железнением $\Delta = 0,3 \div 0,5$ мм,
 для торкретированной бетонной поверхности и по-
 верхности, полученной с применением металлической
 опалубки, $\Delta = 0,5 \div 1,0$ мм, для бетонной поверхности
 при деревянной опалубке $\Delta = 1 \div 4$ мм [2, 3].

Величина эквивалентной абсолютной шерохова-
 тости для бетонных поверхностей при прогнозах ка-

витации по данным [2, 3] принимается одинаковой с
 величиной абсолютной шероховатости, т.е. $\Delta_s = \Delta$.

*Одиночные выступы с округленной или острой
 верхней кромкой* – след от стыка опалубки, выступы
 заполнителей бетона и другие неровности (табл. 1, п. 2).
 Критический параметр кавитации $K_{\text{кр}} = 2,0$, $K_{\text{кр},\varepsilon} = 1,7$.

Расчет параметров кавитации на лотке быстрого
 выполнен для условий пропуска трех расходов – рас-
 четного 1500 м³/с, поверочного 2600 и 2000 м³/с. Ве-
 личина естественной абсолютной шероховатости бе-
 тонной поверхности в расчетах принималась равной
 $\Delta = 0,5; 1,0$ и 2,0 мм, а высота одиночных выступов
 (неровностей), которые располагаются на бетонной
 поверхности с абсолютной шероховатостью, $z_n = 4; 6;$
 8 и 10 мм.

Результаты расчета характеристик и параметра
 кавитации на втором и третьем участках лотка быст-
 ротока с абсолютной шероховатостью $\Delta = 2$ мм и
 разной высоте выступов при расходе $Q = 1500$ м³/с
 приведены в табл. 2.

Результаты расчета параметра кавитации на
 третьем участке лотка быстрого с абсолютными
 шероховатостями бетонной поверхности $\Delta = 0,5; 1,0;$
 2,0 мм и разной высоте выступов $z_n = 4; 6; 8$ и 10 мм
 при пропуске расходов 1500; 2000 и 2600 м³/с приведе-
 ны в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, 3, показы-
 вает, что:

– при увеличении расхода с 1500 до 2600 м³/с па-
 раметр кавитации в сечениях при одинаковой абсо-
 лютной шероховатости и высоте выступов увеличива-
 ется незначительно, не более чем на 3 – 4 %, или
 практически не изменяется;

Таблица 2

Параметр кавитации K на втором и третьем участке лотка быстрого при расходе $Q = 1500$ м³/с; $\Delta = 2$ мм

№ сечения	Расстояние от начала участка, м	h , м	v , м/с	λ	$(p/\gamma)_{\text{хар}}$, м	U_* , м/с	$z_{\text{н}} = 0, y = \Delta$		$z_{\text{н}} = 4$ мм		$z_{\text{н}} = 6$ мм		$z_{\text{н}} = 8$ мм		$z_{\text{н}} = 10$ мм	
							$U_{\text{хар}}$, м/с	K	$U_{\text{хар}}$, м/с	K	$U_{\text{хар}}$, м/с	K	$U_{\text{хар}}$, м/с	K	$U_{\text{хар}}$, м/с	K
Участок 2, уклон дна лотка $i = 0,200$, $b_1 = 40,0$ м, $b_{11} = 44,8$ м																
1	0,0	2,10	17,88	0,0145	11,59	0,762	4,27	12,23	8,57	3,03	9,12	2,68	9,54	2,45	9,89	2,28
3	10,0	1,95	18,78	0,0147	11,40	0,806	4,51	10,75	9,06	2,67	9,64	2,36	10,09	2,15	10,46	2,00
5	20,0	1,82	19,61	0,0149	11,28	0,847	4,74	9,63	9,52	2,39	10,13	2,11	10,60	1,93	10,99	1,76
7	30,0	1,71	20,36	0,0151	11,17	0,885	4,96	8,73	9,95	2,17	10,58	1,91	11,08	1,75	11,48	1,63
9	40,0	1,61	21,06	0,0153	11,08	0,920	5,15	8,01	10,35	1,99	11,01	1,75	11,52	1,60	11,94	1,49
11	45,9	1,56	21,45	0,0154	11,03	0,940	5,26	7,64	10,57	1,89	11,25	1,67	11,77	1,53	12,20	1,42
Участок 3, уклон дна лотка $i = 0,380$, $b_1 = 44,8$ м, $b_{10} = 49,4$ м																
1	0,0	1,56	21,45	0,0154	11,03	0,940	5,26	7,64	10,57	1,89	11,25	1,67	11,77	1,53	12,20	1,42
3	10,0	1,44	22,79	0,0156	10,84	1,007	5,64	6,54	11,32	1,62	12,05	1,43	12,61	1,31	13,07	1,22
5	20,0	1,33	24,00	0,0159	10,74	1,069	5,99	5,74	12,02	1,43	12,78	1,26	13,38	1,15	13,87	1,07
7	30,0	1,25	25,10	0,0161	10,66	1,125	6,30	5,15	12,65	1,28	13,46	1,13	14,09	1,03	14,60	0,96
9	40,0	1,17	26,09	0,0163	10,59	1,177	6,59	4,67	13,23	1,16	14,08	1,02	14,73	0,94	15,27	0,87
10	43,9	1,15	26,44	0,0164	10,57	1,195	6,69	4,53	13,44	1,12	14,30	0,99	14,97	0,90	15,51	0,84

Примечание: Данные столбцов 10 и 11 при $z_n = 0, y = \Delta$ соответствуют естественной абсолютной шероховатости, для которой $U_{\text{хар}} = 5,6U_*$.

– увеличение абсолютной шероховатости бетонной поверхности в пределах $0,5 \div 2,0$ мм обуславливает уменьшение чисел кавитации в сечениях на 30 – 32 %;

– для бетона с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,5; 1,0; 2,0$ мм расчетные числа кавитации при пропуске всех расходов значительно превышают критическую величину $K_{кр.э} = 0,85$, что позволяет сделать вывод об отсутствии кавитации и кавитационной эрозии на лотке быстроготока;

– при одинаковых гидравлических условиях (скорость, давление) основным фактором, определяющим характеристики кавитации и развитие кавитационной эрозии, является высота неровностей;

– с увеличением высоты неровностей, при одинаковой абсолютной шероховатости бетонной поверхности, параметр кавитации уменьшается на 17 – 25 %, а при одинаковой высоте неровностей – увеличивается на 17 – 30 % с увеличением абсолютной шероховатости бетона;

– при высоте неровностей $z_n = 4; 6; 8$ и 10 мм в виде отдельных выступов на втором и третьем участках лотка числа кавитации становятся меньше критических, что свидетельствует о создании условий для кавитации.

На рис. 1 показаны графические зависимости параметра кавитации на втором и третьем участках лотка от высоты неровностей при расходе $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ и абсолютной шероховатости бетона $\Delta = 2 \text{ мм}$.

Данные, представленные в табл. 2, 3 и на рис. 1, позволяют определить местоположение граничных сечений начала кавитации и кавитационной эрозии на лотке быстроготока (табл. 4) при разной высоте выступов z_n .

Анализ приведенных данных показывает, что одиночные выступы, которые могут образоваться при смещении опалубки и плохой зачистке стыка, выступе заполнителей бетона, щебня, гравия, недопустимы на втором и третьем участках лотка быстроготока.

Таблица 3

Параметр кавитации K на третьем участке лотка быстроготока

Расход, м³/с	Δ, мм	Сечение 1-1 (начало лотка)					Сечение 10-10 (конец лотка)				
		Параметр <i>K</i> при высоте неровностей <i>z_н</i> , мм									
		<i>z_н</i> = 0 <i>y</i> = Δ	4	6	8	10	<i>z_н</i> = 0 <i>y</i> = Δ	4	6	8	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1500	0,5	10,04	1,46	1,33	1,24	1,21	5,98	0,87	0,79	0,74	0,72
	1,0	8,82	1,76	1,55	1,41	1,32	5,24	1,05	0,92	0,84	0,78
	2,0	7,64	1,87	1,66	1,51	1,41	4,53	1,12	0,99	0,90	0,84
2000	0,5	10,19	1,48	1,34	1,25	1,23	6,04	0,88	0,80	0,74	0,73
	1,0	8,94	1,79	1,57	1,43	1,33	5,29	1,06	0,93	0,85	0,79
	2,0	7,76	1,90	1,68	1,53	1,43	4,58	1,13	1,00	0,92	0,85
2600	0,5	10,40	1,50	1,37	1,27	1,26	6,12	0,69	0,81	0,75	0,74
	1,0	9,10	1,82	1,60	1,46	1,36	5,38	1,08	0,95	0,86	0,80
	2,0	7,93	1,95	1,73	1,58	1,47	4,67	1,16	1,03	0,94	0,87

Примечание: Данные столбцов 3 и 8 соответствуют абсолютной шероховатости высотой Δ .

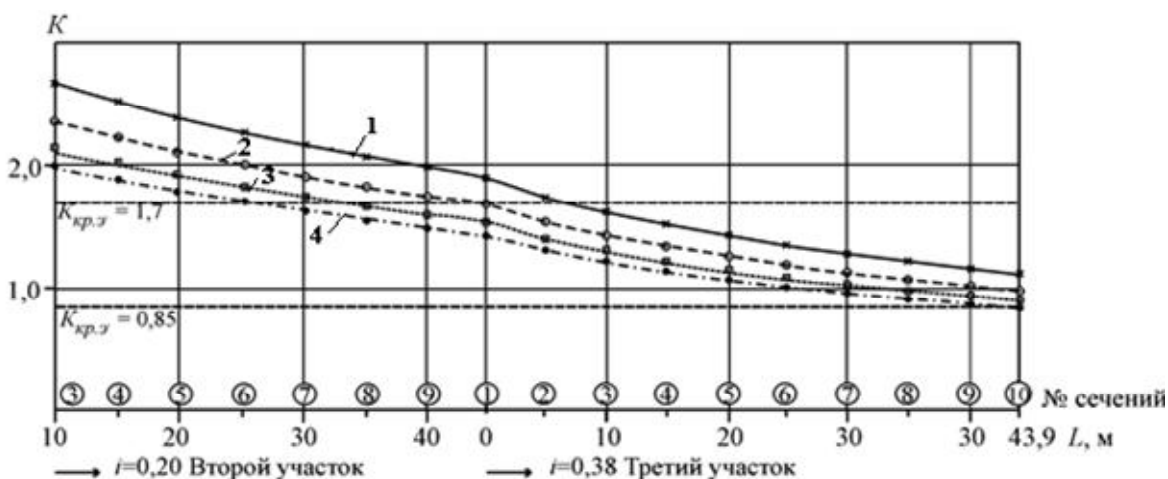


Рис. 1. Зависимость коэффициента кавитации на втором и третьем участках лотка от величины выступов при расходе $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$: 1 – $\times$ – $z_n = 4$ мм; 2 – $\circ$ – $z_n = 6$ мм; 3 – $\square$ – $z_n = 8$ мм; 4 – $\bullet$ – $z_n = 10$ мм

Таблица 4

Положения границ начала кавитации и кавитационной эрозии при одиночных выступах

z_n , мм	Сечение начала кавитации	Сечение, ниже которого возможна кавитационная эрозия
4	№ 2 + 40 м*	№ 3 + 7 м
6	№ 2 + 25 м	№ 2 + 45 м
8	№ 2 + 15 м	№ 2 + 33 м
10	№ 2 + 10 м	№ 2 + 25 м

Примечание: * № + номер участка лотка, плюс расстояние от начала участка.

Таблица 5

Положение сечений начала кавитации и кавитационной эрозии

α , град	Характер кавитации	Расположение сечений на лотке при высоте выступа, мм			
		4	6	8	10
90	Начало кавитации	№2+40 м*	№2+25 м	№2+15 м	№2+10 м
	Ниже возможна эрозия	№3+7 м	№2+45 м	№2+33 м	№2+25 м
60	Начало кавитации	№3+5 м	№2+45 м	№2+33 м	№2+25 м
	Ниже возможна эрозия	№3+20 м	№3+10 м	№3+5 м	№2+40 м
30	Начало кавитации	Нет	Конец лотка	№3+35 м	№3+27 м
	Ниже возможна эрозия	Нет	Нет	Нет	Нет

Примечание: * № + номер участка лотка, плюс расстояние от начала участка.

Обеспечение кавитационной стойкости бетона на лотке может быть достигнуто за счет сглаживания и формирования бетонной поверхности с помощью металлической опалубки, применения виброреек, тщательной затирки поверхности с железнением, использования в качестве заполнителя мелкого щебня, применения бетона повышенной прочности, вакуумирования бетона и др. [8].

Плавный выступ – наплыв бетона (табл. 1, п. 3). Критический параметр кавитации $K_{кр} = 4,2z_n / l$. При $z_n / l = 0,17$, $K_{кр} = 0,71$, $K_{кр.э} = 0,60$. Из графика на рис. 1 следует, что плавные выступы высотой $z_n = 4 \div 10$ мм на лотке являются допустимыми, так как они не вызывают кавитацию и кавитационную эрозию. Предельно допустимое отношение z_n / l в конце лотка при $K = 0,84$ и $z_n = 10$ мм составляет $z_n / l = 0,2$.

Выступ навстречу потоку (табл. 1, п. 4). В соответствии с [1, 4, 7] $K_{кр} = 2 \sin \alpha$. При $\alpha = 90^\circ$ $K_{кр} = 2,0$, $K_{кр.э} = 1,70$. При $\alpha = 60^\circ$ $K_{кр} = 1,73$, $K_{кр.э} = 1,47$. При $\alpha = 30^\circ$ $K_{кр} = 1,0$, $K_{кр.э} = 0,85$.

Положение граничных сечений начала кавитации и кавитационной эрозии при различных углах скоса выступа (рис. 1) определяется данными, представленными в табл. 5.

Одним из простых и эффективных мероприятий по повышению кавитационной устойчивости сооружений является уполоаживание выступов неровностей. Как видно из табл. 5, избежать кавитационную эрозию в пределах всех трех участков лотка возможно только при угле скоса $\alpha = 30^\circ$ и высоте выступов $z_n = 10$ мм. На рис. 2 приведен график зависимости предельно

допустимой высоты выступов $z_{н.доп} = f(\alpha)$, построенный из условия $K > K_{кр.э}$ недопустимости эрозии в конце лотка.

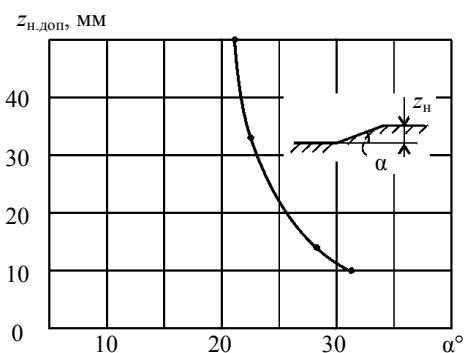


Рис. 2. График для определения угла скоса выступов

График может быть использован для определения допустимого угла наклона передней лобовой грани выступов в зависимости от принятой их высоты.

Конструктивный шов (табл. 1, п. 5). В соответствии с графиком $K = f(b)$ при ширине шва $b = 10$ мм $K_{кр} = 0,8$, $K_{кр.э} = 0,68$. Данные, приведенные в табл. 3 и на рис. 1, позволяют сделать вывод о допустимости ширины конструктивно-осадочных швов, принятой в проекте.

Излом линии дна лотка (табл. 1, п. 6). При изменении уклона дна первого участка лотка с $i_1 = 0,085$ на $i_2 = 0,20$ – уклон дна лотка второго участка, линия дна претерпевает резкий излом на $6,45^\circ$. При углах излома более 5° критическое число кавитации $K_{кр} = 1,05$, а $K_{кр.э} = 0,89$.

По расчетным данным число кавитации в конце первого участка лотка при расходе $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ определено равным $K = 12,23$, что значительно больше $K_{кр} = 1,05$, поэтому при изломе линии дна лотка быстрого течения кавитации не будет.

Прогноз кавитации по методу пороговой скорости

Прогноз кавитации по методу пороговой скорости [2] позволяет, в некоторой степени, учесть прочность бетона, степень аэрации потока, длительность кавитационного периода.

В соответствии с этим методом в качестве критерия оценки кавитации принимается пороговая скорость – скорость, при которой гарантируется отсутствие эрозии бетона в течение инкубационного периода при любой стадии развития кавитации. Если скорости потока на высоте выступов неровностей не превышают пороговую скорость, то даже при развитой стадии кавитации кавитационная эрозия не происходит. Кавитация становится возможной лишь при превышении потоком пороговых скоростей $v_{пор}$. Условие отсутствия кавитационной эрозии выражается неравенством

$$U_{хар} < v_{пор} \quad (5)$$

Бетон при скорости, не превышающей пороговую, сопротивляется воздействию кавитации достаточно продолжительное время. График зависимости пороговой скорости от прочности бетона, воздухосодержания S в потоке, при продолжительности инкубационного периода в 48 ч, показан на рис. 3.

Прогноз кавитации по методу пороговой скорости заключается в назначении допустимой высоты z_n одиночных выступов, расположенных на поверхности бетона с абсолютной шероховатостью Δ .

Исследованиями аэрации потока на лотке быстрого течения [6] было установлено, что при пропуске расчетных расходов поток в конце третьего участка лотка,

где аэрация получает наибольшее развитие, является слабо аэрированным, поэтому концентрация воздуха в придонном слое $S = 0$.

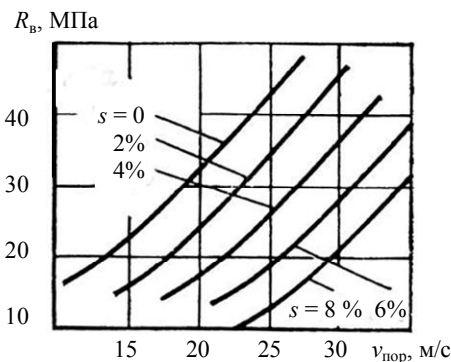


Рис. 3. Зависимость пороговой скорости $v_{пор}$ от прочности бетона на сжатие R_b и аэрации пристенного слоя

Для прогноза кавитации на лотке быстрого течения, в соответствии с графиком на рис. 3, при $S = 0$ определяется величина пороговых скоростей для бетонов прочности: $R_b = 22 \text{ МПа} - v_{пор} = 14 \text{ м/с}$; $R_b = 27 \text{ МПа} - v_{пор} = 16,5 \text{ м/с}$; $R_b = 33 \text{ МПа} - v_{пор} = 20 \text{ м/с}$.

По проектным данным продолжительность работы сооружения с расчетным расходом $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ во время прохождения паводка составляет 26 ч, что меньше инкубационного периода 48 ч, поэтому величина пороговой скорости не подлежит корректировке.

Сравнение характерных скоростей $U_{хар}$ на высоте выступов неровностей $\Delta = 2 \text{ мм}$ в конце третьего участка лотка, приведенных в табл. 2, и пороговых скоростей показывает, что максимально допустимая высота выступов из условия (5) при прочности бетона $R_b = 22 \text{ МПа}$ равна $z_{н. доп} = 6 \text{ мм}$, при $R_b = 27 \text{ МПа}$ максимальная высота z_n может быть более 10 мм.

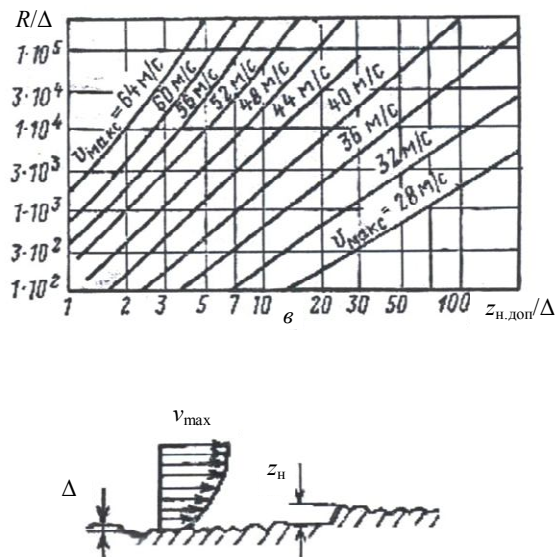
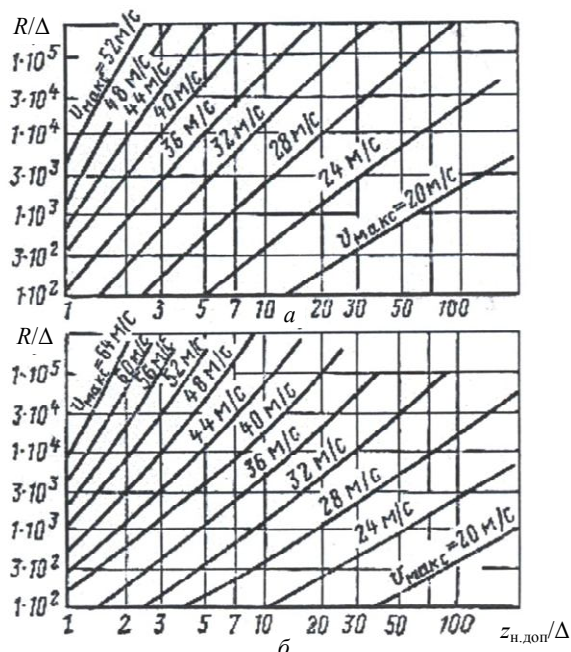


Рис. 4. Графики для определения допустимой высоты изолированного выступа $z_{н. доп}$ на обтекаемой поверхности:

а – $v_{пор} = 14 \text{ м/с}$; б – $v_{пор} = 16,5 \text{ м/с}$; в – $v_{пор} = 20 \text{ м/с}$

Для определения максимальной высоты одиночных выступов может быть использована приближенная методика НИС Гидропроекта [2], основанная на обобщении результатов лабораторных и натурных исследований кавитации. На рис. 4 приведены графики зависимости допустимой высоты выступов для пороговых скоростей $v_{\text{пор}} = 14; 16,5; \text{ и } 20 \text{ м/с}$.

При расходе $Q = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$ глубина воды в конце лотка (табл. 2) равна $h = 1,15 \text{ м}$, гидравлический радиус $R = 1,10 \text{ м}$. Максимальная скорость на свободной поверхности воды в сечении определена (при $y = h$, $U_* = 1,195 \text{ м/с}$, $\Delta = 2 \text{ мм}$) по формуле (4), равной $v_{\text{max}} = 29,1 \text{ м/с}$; при $\Delta = 1 \text{ мм}$, $U_* = 1,11 \text{ м/с}$, $v_{\text{max}} = 29,0 \text{ м/с}$; при $\Delta = 0,5 \text{ мм}$, $U_* = 1,04 \text{ м/с}$, $v_{\text{max}} = 28,9 \text{ м/с}$. Зная отношение R/Δ и максимальную скорость v_{max} , из графиков можно определить предельно допустимую относительную высоту одиночных выступов для бетонов разной прочности. Из графика на рис. 4 а для бетона прочности $R_b = 22 \text{ МПа}$, $v_{\text{пор}} = 14 \text{ м/с}$, при $\Delta = 2 \text{ мм}$, $R/\Delta = 550$, $v_{\text{max}} = 29,1 \text{ м/с}$, определяем $z_{\text{н.доп}}/\Delta = 4$ или $z_{\text{н.доп}} = 8 \text{ мм}$; для бетона с $R_b = 33 \text{ МПа}$ ($v_{\text{пор}} = 20 \text{ м/с}$) из графика (рис. 4 в) $z_{\text{н.доп}}/\Delta = 30$ или $z_{\text{н.доп}} = 60 \text{ мм}$. По результатам расчета построен график (рис. 5) зависимости предельно допустимой высоты одиночных выступов от прочности бетона, который будет справедливым и для расхода $Q = 2600 \text{ м}^3/\text{с}$.

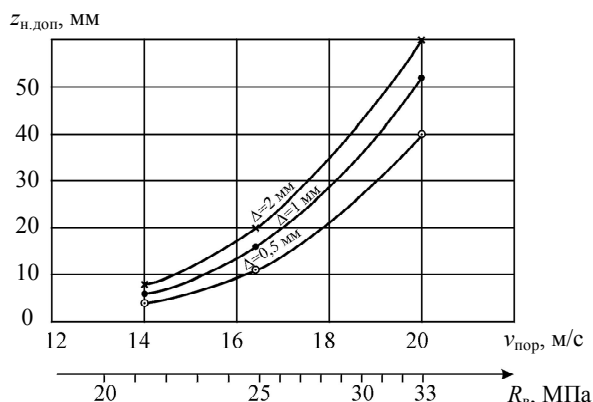


Рис. 5. График зависимости допустимой высоты одиночных выступов

График может быть использован при назначении марки бетона в зависимости от принятой высоты неровностей и абсолютной шероховатости.

Результаты исследований по прогнозу кавитации на лотке быстрого тока были использованы в практике проектирования и строительства гидроузла Тилездита при обосновании конструкции водосбросного сооружения и технических требований к гладкости бетонной поверхности из условия недопущения кавитации и кавитационной эрозии на лотке быстрого тока.

Литература

1. Рекомендации по учету кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений: П 38-75 / ВНИИГ. Л., 1976.
2. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие. М., 1988.
3. Слисский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М., 1986.
4. Розанов Н.П., Шальнев К.К., Мойс П.П., Паиков Н.Н., Воробьев Г.А. Прогнозирование начала кавитации на неровностях бетонной поверхности // Изв. ВНИИГ. 1985. Т. 78.
5. Михеев П.А., Храповский В.А. Гидравлические исследования движения воды за полигональным водосливом входной части водосбросного сооружения // Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки. 2004. № 3.
6. Михеев П.А., Храповский В.А. Исследование аэрации потока на лотке быстрого тока // Изв. вузов. Сев.- Кавк. регион. Техн. науки. 2012. № 4. С. 72 – 76.
7. Гальперин Р.С. Осколков А.Г., Семенов В.М., Цедров Г.Н. Кавитация на гидросооружениях. М., 1977.
8. Воробьев Г.А. Защита гидротехнических сооружений от кавитации. М., 1990.