

К. К. ШАЛЬНЕВ, С. П. КОЗЫРЕВ, (Москва), И. И. ВАРГА,
Д. ШЕБЕШТЬЕН (Будапешт)

**ПАРАМЕТРЫ ВЛИЯНИЯ НА ОПЫТЫ С КАВИТАЦИОННОЙ
ЭРОЗИЕЙ В СВЕТЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ГИПОТЕЗЫ**

(Представлено академиком П. Я. Кочинной 18 V 1973)

1. Применительно к нашему экспериментальному устройству (см. табл. 1) ^(1, 2) к основным параметрам влияния на постановку опытов можно отнести: 1) взаимное расположение зоны кавитации и образца, 2) продолжительность испытания, 3) шероховатость поверхности образца, 4) скорость потока, 5) габариты модели, 6) стадию кавитации, 7) толщину слоя зоны кавитации, 8) толщину образцов.

Влияние взаимного расположения зоны кавитации и образца исследовалось в работах ^(3, 4), остальные параметры влияния изучали авторы настоящей работы.

Продолжительность испытания потребовалось знать в связи с исследованием масштабного эффекта кавитационной эрозии. Принятый в обычной практике метод, при котором время испытания назначалось постоянным, например независимо от скорости потока, оказался несостоятельным, так как механизм эрозии различен и зависит от степени разрушения поверхности образца ^(2, 5, 6). Решение этого вопроса было найдено в предложении принимать время испытания равным времени инкубационного периода. Эта особая точка на кривой $\Delta G(\tau)$ отчетливо выявляется ⁽⁶⁾ при построении $\Delta G/\tau^2 = f(\tau)$ (рис. 1).

Таблица 1

Характеристика экспериментальных устройств

Кавитационные трубы	Авторы	Рабочая камера $a \times b$, мм ²	Модель \varnothing , мм	v , м/сек	Предмет исследования
ИМП АН СССР	Шальнев	6×25	6	7—23	1,3,4,5,6,7
		12×50	12	7—23	То же
		24×100	24	7—23	» »
Будапештский университет и Венгерская Академия наук	Варга, Шебештьен	48×200	48	7—14	1,2,3,4,5,7

Примечание. Предмет исследования: 1 — продолжительность испытания, 2 — начальная шероховатость образцов, 3 — скорость потока, 4 — габариты модели, 5 — стадия кавитации, 6 — толщина слоя зоны кавитации, 7 — толщина образцов.

Влияние шероховатости образца на эрозию исследовалось под воздействием кавитации модели цилиндра ⁽⁷⁾.

Влияние скорости потока исследовалось в пределах чисел $Re = (90-900) \cdot 10^3$ ⁽⁶⁾.

В указанных пределах чисел Re зависимость эрозии от скорости потока может быть выражена формулой

$$\Delta V_2 = \Delta V_1 Y^\alpha,$$

где ΔV_1 и ΔV_2 — объемы эрозии в единицу времени, $Y = v_2/v_1$ — масштабное число для скоростей, v_1 и v_2 — скорости потока перед моделью,

α — показатель степени для масштабного числа скоростей. Согласно нашим опытам $\alpha=4-5$ (рис. 2).

Влияние характерного размера модели, в данном случае диаметра цилиндра, исследовалось в геометрически подобных рабочих камерах при стадии кавитации $\lambda=3$. Согласно (6, 8),

$$\Delta V_2 = \Delta V_1 \Lambda^\beta,$$

где Λ — масштабное число для характерного размера моделей. $\Lambda = d_2/d_1$, β — показатель степени для масштабного числа размеров, $\beta=2$ (рис. 2).

Влияние стадии кавитации дается (8) в виде графической зависимости $\Delta G(\lambda)$. Эта зависимость тождественна зависимости интенсивности шума кавитации от стадии. В обеих зависимостях наблюдается максимум эрозии при $\lambda_k=3-1,5$, при этом λ_k зависит от Re .

Толщина слоя кавитации или, как в нашем случае, высота цилиндра влияет на эрозию обратно пропорционально изменению высоты цилиндра. В наших опытах высота цилиндра менялась в пределах $h=3-18$ мм. Скорость потока и стадия кавитации поддерживались постоянными: $v=17$ м/сек, $\lambda=3$. На графической зависимости $\Delta G(h)$ (рис. 3А) наблюдается резкий максимум при $h=6$ мм, т. е. при $h/d=1$. При $h/d=3$ интенсивность эрозии падает в 9 раз по сравнению с эрозией при $h/d=1$.

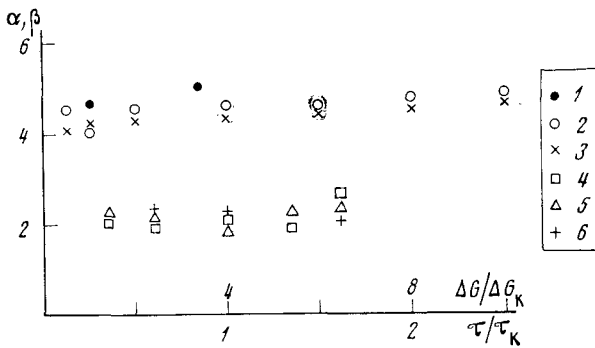


Рис. 2. Зависимость показателей масштабных чисел для скоростей $\alpha(\tau/\tau_k)$ (1-3) и для размеров моделей $\beta(\Delta G/\Delta G_k)$ (4-6). 1 — $d=48$ мм, 2 — 24 мм, 3 — 6 мм, 4 — $d=6$ и 24 мм, 5 — 6 и 48 мм, 6 — 24 и 48 мм

Влияние толщины образцов испытывалось на одинарных и сдвоенных образцах. В опытах Венгерской академии наук (ВАН) свинцовая пластинка наклеивалась на алюминиевую подложку клеем БФ. В опытах Института прикладной математики АН СССР свинцовые пластинки толщиной $\delta=2-24$ мм припаивались к латунным подложкам разной толщины сплавом Вуда (исключая образец $\delta=24$ мм), но так, что общая толщина образцов оставалась постоянной, равной 24 мм.

Характерным свойством графических зависимостей $\Delta G(\tau) = f(\delta)$ является то, что имеется некоторое значение δ , выше которого интенсивность эрозии остается постоянной (рис. 3Б).

2. Рассмотрение результатов и их согласование сделаем с использованием релаксационной гипотезы кавитационной эрозии (9).

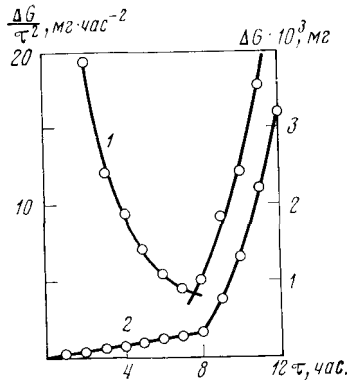


Рис. 3. Определение критической точки τ_k — конца инкубационного периода по опытам ВАН при $v=12$ м/сек. 1 — $\Delta G/\tau^2$, 2 — ΔG

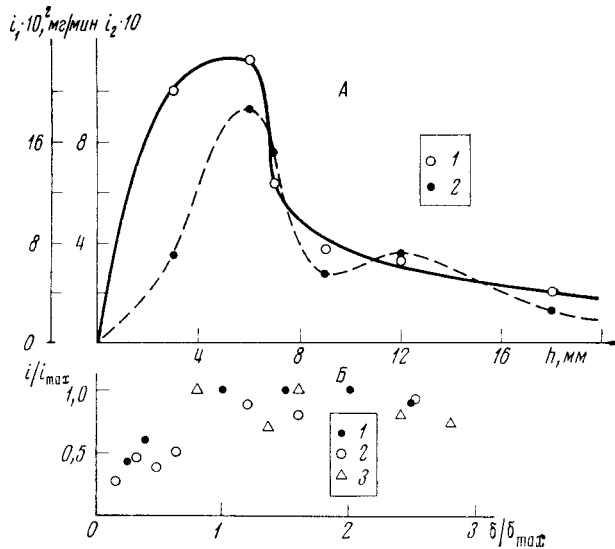


Рис. 3. Влияние на интенсивность эрозии высоты цилиндра h (высоты рабочего участка) (А) и толщины образца δ/δ_{\max} (В).

А: $d=6$ мм, $v=17$ м/сек; 1 — по данным $\Delta G_{\text{к}}$, 2 — по данным $\Delta G=50$ мг. В: 1 — по опытам ВАН, $d=48$ мм, $v=17$ м/сек; 2, 3 — по опытам ИПМ АН СССР, $d=24$ мм, $v=17$ м/сек, плексиглас (2); $d=6$ мм, $v=20$ м/сек (3)

Основные положения гипотезы сводятся к следующему. Первичные язвины эрозии возникают от удара малогабаритных масс жидкости при быстром образовании и росте пузырьков и пульсаций каверн вблизи поверхности твердого тела. Чтобы возникла эрозия, продолжительность действия должна быть близкой продолжительности сдвиговой релаксации жидкости. В таком случае ударяющую массу жидкости в короткий промежуток времени можно рассматривать как твердое тело.

Саму пульсирующую каверну при $h/d=1$ можно рассматривать как пульсирующую сферу с большой амплитудой. Мощность P такого импульсного источника

$$P \sim \frac{\rho f^2 v^2 d^2}{c} \sim \frac{\rho^2 v^5 d^2}{\psi M}; \quad (1)$$

здесь ρ — плотность жидкости, f — частота колебаний сферы, v — скорость потока, d — диаметр модели, ψ — объемная упругость жидкости, $\psi = \rho c^2$, c — скорость звука в жидкости, M — число Маха, $M = c/v$. В отдалении от источника пульсаций мощность излучения уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от центра излучения.

3. Рассмотрим результаты опытов по влиянию высоты цилиндра на эрозию, представленные в табл. 2, где $i = \Delta G/\tau$ — интенсивность эрозии. Приводятся два значения i : по опытам при $\Delta G_{\text{к}}$, т. е. за инкубационный период, и по опытам при $\Delta G=50$ мг. Таким образом, была соблюдена тождественность объема разрушения поверхности образца эрозией. По данным табл. 2 замечаем более близкое соответствие интенсивности эрозии закону убывания мощности излучения для $h/d > 1$, чем для $h/d < 1$. Объясняется такое свойство изменением структуры зоны кавитации. Наиболее близкое соответствие расчету наблюдается при $h/d=2$ для $\Delta G_{\text{к}}$ и при $h/d=3$ для $\Delta G=50$ мг.

Влияние стадии кавитации на эрозию, имеющую максимум при $\lambda=1,5-2$, объясняется прямой квадратичной зависимостью колебательной

Таблица 2

Влияние толщины слоя кавитации на эрозию по расчету и по опыту

h_n , мм	Расчет (h_0/h_n) ²	Опыт			
		при ΔG_K		при $\Delta G=50$ мг	
		i_n	i_n/i_0	i_n	i_n/i_0
3	0,25	20	0,87	3,5	0,4
6	1	23	1,0	9	1
9	0,44	7	0,3	3,0	0,33
12	0,25	6	0,26	3,5	0,39
18	0,11	4	0,17	1,2	0,13

мощности от числа Струхала Sh (1). При этих значениях λ число Sh имеет большую величину, чем при $\lambda > > 2-3$ (8).

Влияние толщины образца также может быть объяснено ударом жидкости при возникновении пузырька. Для однослойных образцов волна от удара (первого рода) распространяется поперек образца и, когда доходит до его граничной поверхности, частично отражается и проходит толщину δ образца в обратном направлении. В двухслойных образцах с разными акустическими свойствами волна давления отражается от подложки.

Если толщина образца δ , слой воды от центра пульсации h_c , то можно составить следующие соотношения:

$$\tau_m = 2\delta/c_m, \quad \tau_w = h_c/c_w,$$

где τ_m , τ_w — время прохождения волны через металл и слой воды соответственно, c_m , c_w — скорость звука в образце и жидкости.

Таблица 3

Сопоставление критической толщины образца по теории и по опыту

Автор (источник)	Кавитация	Материал	Жидкость	h_c , мм	c_m , м/сек	c_w , м/сек	δ_0 , мм	δ , мм
Варга, Шебештьен (8)	Гидродинамическая	Свинец	Вода	24	1000	1400	8,6	8,0
Шальнев (данная работа)	То же	Плексиглас	»	12	1770	1400	7,2	10,0
То же	» »	Свинец	»	3	1000	1400	1,05	2,0
Рахмаи, Коннелл (12)	Ультразвуковая	Баббит	Масло	0,38	3000	1200	0,47	0,45

При $\tau_w < \tau_m$ имеем случай нормальной эрозии; при $\tau_w > \tau_m$ отраженная волна от импульса первого рода повышает давление в зоне роста пузырька и способствует отрыву образца от подложки. Нейтральное состояние будет, когда $\tau_w = \tau_m$ или $2\delta/c_m = h/c_w$; отсюда соответствующая толщина материала, испытываемого на эрозию,

$$\delta = \frac{1}{2} h_c c_m / c_w. \quad (2)$$

В табл. 3 приводятся критические значения толщины образцов, одинарных и склеенных с подложкой, по расчету δ_0 и по опыту δ . В качестве дополнительной иллюстрации к сказанному приводятся результаты расчета толщины наплавки баббита по данным работы (12).

Институт проблем механики
Академии наук СССР
Москва

Исследовательская группа по гидродинамике
Венгерской Академии наук
Будапешт

Поступило
15 V 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. К. Шальнев, Изв. АН СССР, ОТН, № 1 (1956). ² П. И. Варга, Б. А. Чернявский, К. К. Шальнев, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 3 (1963). ³ J. M. Mouson, ASME, v. 59, № 5 (1937). ⁴ J. S. Pearsall, P. J. McNulty, Cavitation Forum, 1968. ⁵ К. К. Шальнев, J. J. Varga, D. Sebestyen, Erosion by Cavitation or Impingement, Spec. Techn. ASTM Publ., 1967, p. 408. ⁶ J. J. Varga, G. Sebestyen, K. K. Shalnev, Proc. of the III Conf. on Fluid Mechanics and Fluid Machinery, Budapest, 1969. ⁷ J. Varga, G. Sebestyen, La Houille Blanche, № 8 (1966). ⁸ К. К. Шальнев, J. J. Varga, G. Sebestyen, Acta Technica, v. 66/4 (1969). ⁹ К. К. Шальнев, С. П. Козырев, ДАН, т. 202, № 5 (1972). ¹⁰ H. Kuttruff, U. Radek, Acustica, v. 21, № 5 (1969). ¹¹ E. Mundry, W. Güth, Acustica, v. 7, № 4 (1957). ¹² D. Rachman, Ross Connel, Proc. of the IV Conf. on Fluid Machinery, Budapest, 1972.