

О МЕТОДЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ

И. И. Варга, Б. А. Чернявский, Е. Е. Шальнев
(Будапешт, Москва)

При выборе материалов для гидромашин и гидросооружений, работающих в условиях кавитации, обычно не учитывают те условия работы этих материалов, которые накладываются разнообразными видами, типами и стадиями кавитации. В результате материалы, использованные в практике, не соответствуют по своим механическим и физическим свойствам тем разрушающим силам, которые свойственны упомянутым выше разнообразным формам кавитации. Делались попытки предусматривать возможные зоны эрозии и интенсивность разрушительного действия путем испытания моделей турбин. Однако при этом не учитывались факторы масштабирования эрозии и кавитации. Ниже описывается опыт проведения экспериментов с эрозией при кавитации круглого цилиндра с учетом основных параметров гидромеханического моделирования: масштабных чисел для габаритов моделей, кавитации и скоростей потока.

1. О постановке исследований. а. *Характеристика интенсивности эрозии.* Для испытания материалов на сопротивляемость кавитационной эрозии применяются следующие методы [1].

Методы проточной кавитации, при которых испытуемый материал подвергается воздействию кавитации, образующейся в потоке за крутообтекаемыми телами или на стенках отверстий и патрубков.

Методы волновой кавитации, в том числе магнитострикционной вибрации и облучения звуковой и ультразвуковой волной.

Метод вращения, при котором образец испытуемого материала вращается вместе с диском, на котором он крепится заподлицо с его поверхностью, и подвергается воздействию кавитации, образующейся за выступами или впадинами, специально сделанными на поверхности диска.

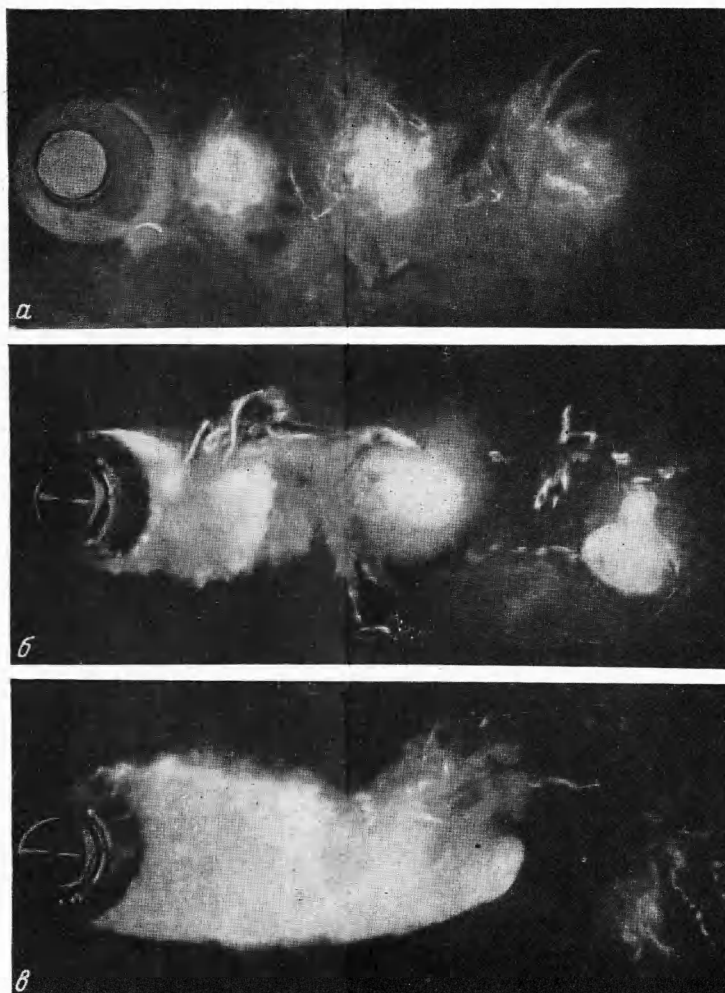
Метод струеударный, при котором вращающийся образец подвергается соударению со свободной струей; в этом случае предполагается, что механизм разрушения материала под воздействием соударения струи и образца тождествен механизму разрушения под воздействием кавитации. Это положение представляется пока спорным, поэтому целесообразно было использовать для нашей работы метод с непосредственным воздействием кавитации.

При выборе «кавитационного» метода следует иметь в виду, что встречающиеся в практике случаи кавитационной эрозии объясняются воздействием преимущественно (если не сказать только) одним типом кавитации — срывной, образующейся в зоне вихрей крутообтекаемых поверхностей [2]. Отсюда следует, что наиболее близким к натурным условиям является метод проточной кавитации. На разрушение материала эрозией требуется затрата некоторого количества энергии, поэтому из методов проточной кавитации следует выбрать такой, который позволил бы наиболее просто связать интенсивность эрозии с кавитационным сопротивлением тела — с энергией потока, затраченной на преодоление сопротивления тела при кавитационном обтекании. В качестве первого приближения к натурным условиям был выбран случай кавитации модели круглого профиля — круглого цилиндра, обтекаемого двумерным потоком в рабочей камере гидродинамической трубы (фиг. 1). Эта модель в отличие от всех других моделей с иным профилем наиболее подробно исследована в зависимости от параметров потока и кавитации [3].

Однако существующие параметры для оценки интенсивности эрозии не связаны с гидромеханическими параметрами потока [4]. Интенсивность эрозии оценивалась следующими величинами:

- а) глубиной и площадью расположения язв эрозии [5, 6];
- б) потерей веса образцов за какой-либо срок испытания [7, 8];
- в) потерей объема на единицу площади в единицу времени [1];
- г) то же веса [9];
- д) числом язв эрозии, образующихся на единицу площади в единицу времени [10];
- е) потерей объема образца, отнесенной к характерному размеру тела [11];
- ж) потерей интенсивности излучения изотопов, нанесенных вместе с краской на разрушаемую кавитацией поверхность тела [12];
- з) продолжительностью испытания образца до некоторой стадии или степени разрушения, определяемой визуально [13].

Из перечисленных параметров большая часть их определяется взвешиванием образцов до и после опыта. Метод изотопов применялся в натурных испытаниях турбин радиально-осевого типа. Рата [14] использовал изменение омического сопротивления образца при эрозии, но в конечном результате связал его с потерей объема. Говинда Рао [15] предложил безразмерный параметр кавитационной эрозии в виде отношения механической энергии разрушения некоторого объема твердого тела, потерянной на эрозию, к энергии разрушающихся кавитационных пузырьков при спаде кавитации.



Фиг. 1. Фотоснимки зоны кавитации за круглым цилиндром $d = 48$ мм. по опытам в кавитационной трубе Будапештского университета: *a* — стробоскопический снимок при удвоенной струхалевской частоте импульсов света; $\kappa = 1.79$, $R = 6.6 \times 10^5$; *b* — при вспышке в $5 \cdot 10^{-5}$ сек, $\kappa = 2.48$, $R = 6.35 \times 10^5$, *c* — то же, $\kappa = 1.47$, $R = 6.6 \times 10^5$

В данном случае при подсчете энергии разрушающихся пузырьков с использованием теории Релея допускается большая условность. Согласно теории Релея, пузырек должен быть окружен сплошной жидкостью, тогда как в опытах Говинда Рао, послуживших основой для вывода параметра, зона кавитации состояла из совокупности пузырьков. Кроме того, не учитывается влияние на разрушение пузырьков поверхностного натяжения жидкости. В механическом отношении параметр эрозии Говинда Рао представляет своего рода коэффициент вредного действия кавитации и зависит от продолжительности воздействия кавитации на образец, а также от стадии развития кавитации.

б. Энергетический параметр. Таким параметром эрозии [4] назван объем эрозии, отнесенный к единице некоторой доли кавитационного сопротивления модели. Обратная величина энергетического параметра дает меру прочности материала при разрушении его кавитационной эрозией в единицах работы, потребной для разрушения единицы объема материала. В отличие от всех ранее предлагавшихся параметров, новый параметр не зависит для данной стадии кавитации и материала ни от скорости потока, ни от габаритов модели, ни от критериев подобия Рейнольдса R и Вебера W .

Обратная величина параметра дает истинное сопротивление материала кавитационной эрозии в отличие от других параметров, при помощи которых определяется только относительное сопротивление эрозии, т. е. в сравнении одного материала с другим.

В соответствии с результатами исследований работы разрушения металлов, выполненных Гильмотом и Синайем [16], согласно которым работа разрушения не зависит от рода разрушающих механических сил сжатия или растяжения, энергетический параметр позволяет установить взаимосвязь между работами разрушения от сил кавитации и от сил механических. Для металлов, не подверженных химической коррозии при кавитации, работа разрушения металла от кавитации, по всей вероятности, должна быть тождественной работе разрушения механическими силами. Если же в разрушении металла при кавитации действуют также и коррозионные силы, то определенная при помощи энергетического параметра работа разрушения должна прибавить к прежнему новую характеристику физико-механических свойств металлов — сопротивление кавитации.

Согласно определению, данному ранее [4], энергетический параметр выражается формулой

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta V 10^4}{36 \Delta C_x h d q_\infty v_\infty \gamma} \text{ м}^3 \text{ кг м}^{-1} \quad \left(\Delta V = \frac{\Delta G}{\gamma_s \tau} \text{ мм}^3 \text{ час}^{-1}, \quad q_\infty = \frac{v_\infty^2}{2g} \right) \quad (1.1)$$

$$\Delta C_x = C_{xc} - C_x + [\Delta C_x']$$

Здесь ΔV — объем эрозии, ΔG — потеря веса образца на эрозию за время τ часов, γ_s — удельный вес материала образца, d — диаметр цилиндра, h — высота цилиндра, v_∞ — скорость потока с учетом влияния границ, γ — вес единицы объема жидкости, C_x — сопротивление цилиндра в отсутствие кавитации, C_{xc} — сопротивление цилиндра при кавитации, $\Delta C_x'$ — некоторая доля кавитационного сопротивления, получаемая экстраполированием зависимости $C_{xc} - C_x = f(W^{-1})$ до значения числа Вебера $W^{-1} = 0$. Число Вебера $W = \sigma / (\rho v_\infty^2 d)$, где σ — поверхностное натяжение, ρ — плотность жидкости.

в. Масштабный эффект. При помощи энергетического параметра представляется возможность определить масштабный эффект — определить потерю объема материала в натуре по опытам с моделью. Если стадии кавитации геометрически подобны и жидкости в модели и в натуре тождественны, то, составив для модели и натуре выражения по (1.1) и приравняв их, получим

$$\Delta V_n = \Delta V_m L^\alpha V^\beta \quad (1.2)$$

где L — масштабное число для линейных размеров модели и кавитации и V — масштабное число для скоростей потока. Формула (1.2) дает те условия, соблюдение которых необходимо при проведении опытов с эрозией на моделях. При этом, согласно (1.1), показатели $\alpha = 3$ и $\beta = 5$, что находит свое подтверждение в некоторых опытах и других авторов. Согласно исследованиям Кнаппа [10], с моделями осесимметричных тел и с турбиной в натуре [17], в которых интенсивность эрозии оценивалась числом язвенок, показатель $\beta = 4 \div 6$. Керр и Розенберг [12] по опытам в натуре с применением методов изотопов полагают, что наиболее вероятное значение $\beta = 5$. В опытах Рата [14] с узким диапазоном скоростей показатель $\beta = 4 \div 8$. В опытах Говинда Рао [15] с цилиндрами $\beta = 5.3 \div 8$, с прямоугольными блоками $\beta = 4 \div 8$.

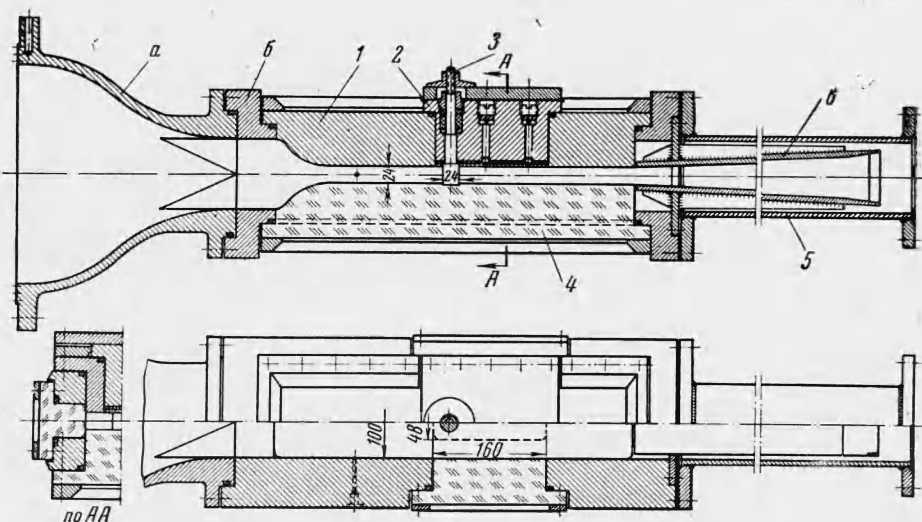
Влияние габаритов модели характеризует таблица, составленная по нашим опытам. В ней даны величины объема эрозии для трех вариантов габаритов модели круглого цилиндра и отношения объемов при четырех вариантах скоростей потока. Отсюда можно определить экспериментальное значение α . Средние величины отношений объемов близки к теоретическим $\alpha = 3$.

Таблица

v_0 мсек ⁻¹	ΔV_6 мм ³ час ⁻¹	ΔV_{12} мм ³ час ⁻¹	ΔV_{24} мм ³ час ⁻¹	$\frac{\Delta V_{24}}{\Delta V_6}$	$\frac{\Delta V_{24}}{\Delta V_{12}}$	$\frac{\Delta V_{12}}{\Delta V_6}$
14	0.18	1.74	—	—	—	9.7
17	0.76	4.50	48.2	63.5	10.7	6.0
20	1.78	15.42	101	57	6.6	8.5
23	2.56	19.2	—	—	—	7.4
Средние:				60.3	8.8	7.9
по формуле (1.2):				64	8	8

Другие исследования влияния габаритов не известны. Кнапп [16] отрицает влияние габаритов на интенсивность эрозии.

Разнообразие результатов говорит прежде всего о том, насколько тщательно должны быть продуманы как устройство опытов, так и определение величин, характеризующих интенсивность эрозии.



Фиг. 2. Экспериментальное устройство ГТЗ ИМЕХ: а — сопло, б — рабочая камера, в — диффузор; 1 — металлическое доннышко, 2 — монтажная вставка с образцом, 3 — модель круглого профиля — цилиндр, 4 — плексигласное окно, 5 — труба

2. Экспериментальные устройства. а. Гидродинамические трубы. Опыты с кавитационной эрозией проводились в кавитационных гидродинамических трубах ГТ-2 и ГТ-3 Института механики АН СССР совместно с Будапештским университетом и Венгерской Академией наук [19]. Все перечисленные трубы имеют замкнутую циркуляцию воды, возбуждаемую центробежным насосом. Регулирование скорости производится электромоторным приводом, давление регулируется независимо от скорости. В трубе Будапештского университета максимальная скорость потока в рабочей камере $200 \times 200 \text{ мм}^2$ может быть достигнута равной 10 м сек^{-1} . В трубах ИМЕХ скорость в различных вариантах рабочих камер могла изменяться в пределах $0 \div 25 \text{ м сек}^{-1}$. Здесь описаны некоторые позиции трубы ГТЗ (фиг. 2), имеющие наибольшее значение при опытах с эрозией.

б. Сопло трубы. Сопло располагается между напорным резервуаром и рабочей камерой. К соплу трубы предъявляются большие требования, так как оно определяет структуру потока в рабочей камере. Сопло должно создать поток на выходе, равномерный по всему сечению, свести до минимума продольные и поперечные пульсации в потоке, поступающем в рабочую камеру. Это достигается надлежащим поджатием потока. Поджатие потока или отношение площадей входа и выхода сделано для сопел равным 7.5, согласно [20]. Продольный профиль сопел состоит из двух кривых. На первом, входном участке кривая служит для плавного сопряжения его с кривой выходного участка сопла. Профиль выходного участка сопла очерчивался по кривой Витошинского [21].

Для предотвращения образования вихревых зон при сопряжении первого и второго участков сопла длина сопла увеличена до $l = 3 d_0$ за счет длины первого участка. Одновременно сопло, будучи протарировано, используется как указатель расхода или скорости потока в рабочей камере.

в. *Рабочая камера.* В трех установках гидродинамических труб в опытах с эрозией применялись рабочие камеры четырех вариантов поперечного сечения:

а) в трубах Института механики сечением 6×12 , 12×50 и 24×100 мм²,
б) в трубе Будапештского университета 48×200 мм².

Дадим конструктивное описание одного варианта рабочей камеры 24×100 мм². Корпус камеры вырезан из круглого дюралюминиевого прутка диаметром 300 мм. Он состоит из четырех ребер, соединенных заодно с фланцами. Ребра образуют четырехстороннюю рамку с просветами, в которые вставляются доньшки с фланцами. Рамка и доньшки уплотняются резиновыми шнурами. Доньшки в зависимости от назначения опыта могут быть сделаны либо из металла, либо из прозрачного плексигласа. В целях экономии времени на монтаж образцов и экономии материала, идущего на изготовление плексигласных доньшек, в обоих доньшках сделаны монтажные вставки. Одна из вставок, металлическая, служит для крепления образцов и модели круглого профиля, другая, плексигласная, используется для наблюдений. На чертеже (фиг. 2) одно из доньшек показано сплошь прозрачным.

Образец изготавливается составным: из подложки и собственно образца. Подложка имеет гнезда под болты, которыми она крепится к монтажной вставке. Образец, изготавливаемый из катаного свинца, припаивается к подложке сплавом Вуда, после чего обрабатывается начисто. Модель — цилиндр, изготовленный из прокатанной бронзы, — крепится к монтажной вставке вместе с образцом. Другой свободный конец цилиндра заводится в гнездо в противоположной плексигласной вставке.

г. *Диффузор.* Форма диффузора определяет кавитационное качество гидродинамической трубы, так как в большей степени, чем другие позиции трубы, подвержен кавитации. Кавитация диффузора влечет за собой резкое увеличение сопротивления трубы и падение производительности насоса. Исходя из упомянутых соображений, был сделан угол раскрытия диффузора 7° , несколько меньшим, чем рекомендуется для аэродинамических труб. Ради простоты изготовления диффузор сделан составным: из наружного корпуса — прямого патрубка круглого сечения — и вставки, собственно диффузора прямоугольного сечения, переменного по его длине.

3. *Определение основных величин. а. Определение скорости в мерном створе.* Обычно определяется средняя скорость потока перед моделью по расходу, найденному каким-либо мерным приспособлением: дюзой, мерным фланцем или расходомером типа Вентури. Для быстрых предварительных подсчетов можно пользоваться скоростью на оси потока, определяемой при помощи предварительной тарировки цилиндрическим насадком с пьезоотверстием на цилиндрической поверхности.

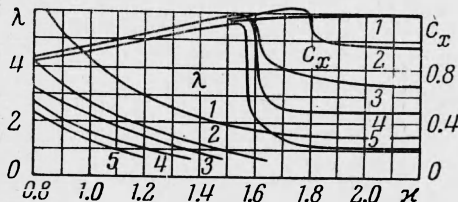
Обозначим через p_1 — давление при входе в сопло, p_2 — давление при выходе из сопла, p_3 — давление при входе в рабочую камеру, p_4 — давление на стенке камеры в месте прохождения оси цилиндра в его отсутствие, p_c — давление в передней особой точке цилиндра, расположенной посередине его высоты (высоты камеры). Опытами определяют

$$\text{либо } p_3 - p_4 = f(p_1 - p_3), \quad \text{либо } p_3 - p_4 = f(p_1 - p_2) \\ p_3 - p_c - [p_3 - p_4] = q = f(p_1 - p_3) \quad (q = v_0^2/2g)$$

и затем, пользуясь графическими построениями [22]

$$v_0 = f(p_1 - p_3), \quad v_0 = \sqrt{2gq}$$

Влияние границ трубы учитывается при помощи уравнения расхода. Тогда скорость обтекания будет равна $v_\infty = vb/(b-d)$, где b — ширина рабочей камеры. При анализе результатов опытов будем пользоваться следующими величинами скоростей: v — средняя скорость перед моделью, v_∞ — средняя скорость с учетом влияния стеснения потока моделью, v_0 — скорость на оси потока, $v_{\infty 0}$ — скорость на оси потока с учетом стеснения. Определение скорости является очень ответственной задачей, так как объем эрозии зависит от скорости в степени $\beta \approx 5$.



Фиг. 3. Осредненные кривые опытных величин C_x , C_{xs} и λ в зависимости от R и числа Рейнольдса R : 1 — при $R = 4 \cdot 10^4 \div 8 \cdot 10^4$, $d = 5 - 10$ мм; 2 — $11 \cdot 10^4 \div 16 \cdot 10^4$, 20 мм; 3 — $18 \cdot 10^4 \div 23 \cdot 10^4$, 30 мм; 4 — $25 \cdot 10^4 \div 30 \cdot 10^4$, 40 мм; 5 — $30 \cdot 10^4 \div 43 \cdot 10^4$, 50 мм

б. *Определение давления в мерном створе.* Давление в мерном створе p_4 непосредственно не определяется. Во время опытов определяют давление p_3 в точке 3, расположенной до модели. Затем, пользуясь зависимостью $p_3 - p_4 = f(p_1 - p_3)$, найденной предварительно в отсутствие цилиндра, находим $p_4 = p_3 - [p_3 - p_4]$, учитывая тем самым падение напора на сопротивление участка рабочей камеры от точки 3 до точки 4.

в. *Определение коэффициента кавитации κ .* Определение коэффициента кавитации κ требуется при нахождении ΔC_x . Его значение может быть определяемо или с учетом влияния границ или без учета его.

Поэтому в общем виде

$$\kappa = \frac{p_\infty - p_v}{\gamma q_n}$$

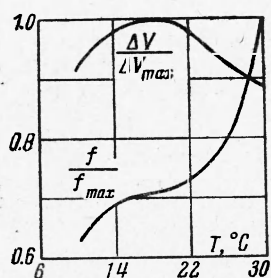
где p_∞ приравнивается p_4 , q_n — напор от скорости, определяемый соответственно принимаемому методу (см. 3, а). Величина p_v — давление паров воды и γ — вес единицы объема воды.

г. *Длина зоны кавитации.* Длина зоны кавитации определяется, считая от оси цилиндра до кончика устойчивой по визуальной оценке части зоны кавитации

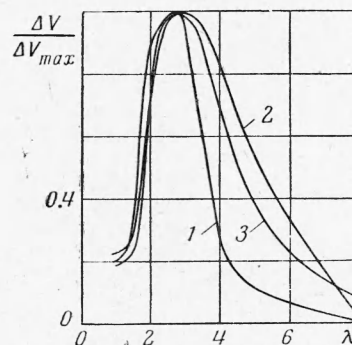
Фиг. 4. Осредненные опытные величины C_x , C_{xc} , ΔC_x и ΔV — в зависимости от числа Вебера W^{-1}

l_c , и дается в условных единицах $\lambda = l_c/d$, где d — диаметр цилиндра.

д. *Определение ΔC_x .* Для определения ΔC_x пользуемся известными зависимостями $C_x(R, \kappa)$ и $\lambda(\kappa)$, представленными в работе [3, 4] (фиг. 3). Приводимые в ней данные желательно пополнить как в сторону больших чисел Рейнольдса, так и меньших, чтобы получить надежные данные о величинах C_x , удовлетворяющих требованиям практики. Наиболее простой и в то же время точный способ определения C_x — метод по распределению давления в среднем по высоте сечения модели. При других способах определения C_x , например весами, требуется учитывать влияние



Фиг. 5. Осредненная опытная зависимость объема эрозии ΔV и площади эрозии f от температуры воды T , °C



Фиг. 6. Осредненная опытная зависимость объема эрозии ΔV от длины зоны кавитации λ : 1 — при скорости $v_0 = 14$ м сек⁻¹, 2 — то же при 17 м сек⁻¹, 3 — то же при 20 м сек⁻¹

щелей — конструктивных зазоров между моделью и стенками камеры. Наличие зазоров приводит к искажению обтекания модели по сравнению с тем, какое имеется в опытах с эрозией.

При помощи зависимостей $C_x(R, \kappa)$ и $\lambda(\kappa)$ находится зависимость C_x , C_{xc} и ΔC_x от числа Вебера W (фиг. 4). Согласно (1.1), величина ΔC_x будет несколько большей, чем превышение кавитационного сопротивления над сопротивлением в от-

существование кавитации, и, кроме того, $\Delta C_{xc} - \Delta C_x = f(W)$ определяется экстраполированием до значения $W = 0$. Поэтому для каждой экспериментальной установки желательно определить указанную зависимость непосредственно.

г. *Определение ΔV* . Объем эрозии определяется по потере веса образца ΔG и по продолжительности опыта τ .

$$\Delta V = \frac{\Delta G}{\gamma_s \tau} \text{ мм}^3 \text{ час}^{-1}$$

где γ_s — удельный вес материала образца. Во избежание больших погрешностей желательно предварительно построить зависимость $\Delta V = f(W)$, осредненную по нескольким опытным данным ΔV на совмещенном графике $\Delta C_x = f(W)$ (фиг. 4).

ж. *Определение ΔG* . Потеря веса образца на эрозию определяется взвешиванием его до и после опыта с надлежащей точностью, зависящей от величины ΔG . Допустимая точность взвешивания, соизмеримая с точностью определения других величин, может быть достаточной в пределах $\pm 1\%$.

з. *Определение τ* . В соответствии с анализом факторов влияния на точность получения результатов опытов (см. 4) продолжительность каждого опыта на эрозию назначалась в зависимости от целей опыта. Если опыты ставились в зависимости только от скорости потока при постоянном устройстве опыта $d = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$, то продолжительность каждого опыта назначалась с таким расчетом, чтобы ΔG были равны. Если опыты велись в зависимости от габаритов модели, то продолжительность опытов назначалась с таким расчетом, чтобы $\Delta G_n / \Delta G_m \approx L^3$.

и. *Температура воды*. Температура воды определяется термометром, помещавшимся в гнезде большего фланца сопла. Гнездо заполнялось машинным маслом.

к. *Прочие величины*. Барометрическое давление определялось по ртутному барометру. Все остальные величины, которые требовались для вычисления формул (1.1) и (1.2), как-то: а) вес единицы объема воды γ ; б) удельные веса материала образцов γ_s ; в) давление паров воды p_v ; г) поверхностное натяжение воды σ ; д) кинематическая вязкость воды ν — определялись по таблицам физических констант.

4. *Факторы влияния на точность результатов*. К таковым следует отнести неучитываемые условия опытов.

а. *Влияние содержания воздуха*. Согласно данным опытов Новотного [23], с кавитационной эрозией, получаемой методом вибрации на магнитострикционном приборе в воде различного происхождения, содержание воздуха может оказывать значительное влияние на интенсивность эрозии. Так, потеря на эрозию в дистиллированной воде больше, чем в водопроводной, на 80%. Потеря уменьшается на 30% в водопроводной воде при пропускании через нее воздуха. Из сказанного следует, что опыты с эрозией необходимо проводить при неизменном содержании воздуха в воде. В этих целях в конструкции труб предусмотрена изоляция свободного горизонта воды в напорном баке от непосредственного соприкосновения с воздухом; поддерживалось постоянство добавляемого свежего количества воды при демонтаже образцов.

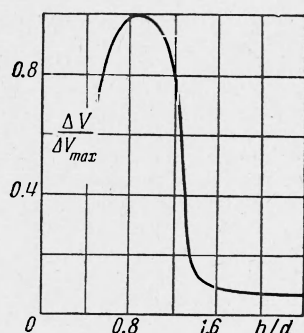
б. *Влияние температуры*. Исследования влияния температуры воды на интенсивность эрозии проводились обычно при постоянном давлении, в результате чего к влиянию температуры присоединялось еще влияние стадии кавитации или ее структуры. Наши исследования [2] в условиях проточной кавитации со свинцовыми образцами при соблюдении постоянства стадии или габаритов зоны кавитации и скорости потока показали, что в пределах колебания температуры $10 \div 26^\circ \text{C}$ падение интенсивности эрозии может изменяться в пределах от 0 до 7% (фиг. 5). Поскольку повышение температуры воды в наших опытах изменялось в пределах $1 \div 8^\circ \text{C}$, то ее влияние на интенсивность эрозии не учитывалось.

в. *Влияние стадии развития кавитации*. Согласно нашим исследованиям [2], имеется стадия развития кавитации круглого цилиндра $\lambda_{\text{max}} = 3$, при которой интенсивность эрозии максимальная (фиг. 6). При отклонении λ_{max} до $\lambda = 2$ интенсивность эрозии понижается на 25% и при отклонении до $\lambda = 4$ — $\geq 16\%$. Считалось, что возможная максимальная погрешность в определении ΔG равна $\delta_G = \pm 5\%$.

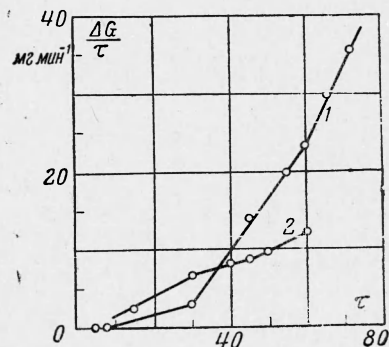
г. *Влияние относительных габаритов модели*. В условиях наших опытов влияние относительных размеров модели l/d , где l — длина цилиндра, тождественно влиянию высоты сечения рабочей камеры a/d . Согласно нашим исследованиям [1], имеется оптимальная длина модели $l/d = 1$, при которой интенсивность эрозии максимальная (фиг. 7). Интенсивность эрозии резко уменьшается с увеличением l/d ; при увеличении l/d на 10% интенсивность эрозии уменьшается тоже на 10%, а при увеличении l/d на 30% падает в 3—4 раза. Поскольку в наших опытах изменения l/d вследствие неточного соблюдения заданных размеров не превышали $\pm 1\%$, то эта неточность монтажа модели могла приводить к погрешности определения ΔV в пределах $\pm 1\%$.

д. *Влияние продолжительности опыта*. Зависимость ΔV (τ) для металлов определяется, с одной стороны, пластическими свойствами испытываемого материала, а с дру-

гой — характером сил, вызывающих эрозию. В начальный период разрушения замечается для пластических металлов так называемый инкубационный период, во время которого происходит деформация поверхностных слоев (наклеп) без потери веса (фиг. 8). Для свинцовых образцов с наступлением хрупкого разрушения потеря на эрозию $\Delta G/\tau$ растет с течением времени линейно до некоторой величины, характеризующейся образованием явно выраженных очагов эрозии — язвин округлой формы. По всей вероятности, с образованием этих язвин механическое воздействие кавитации усиливается кумулятивным эффектом струй при спаде кавитации. Чтобы получить сравнимые результаты опытов следует выбрать такую продолжительность опытов, при которой разрушение определялось бы преимущественно силами кавитации.



Фиг. 7. Осредненная опытная зависимость объема эрозии ΔV от относительных габаритов модели l/d или a/d



Фиг. 8. Опытная зависимость объема эрозии ΔV от продолжительности испытания образца τ для двух образцов, испытанных в рабочих камерах $25 \times 100 \text{ мм}^2$, $6 \times 25 \text{ мм}^2$

е. Влияние обработки поверхности образца. Такое влияние было обнаружено при сравнении ΔV_0 образцов, поверхность которых зачищалась полотнами с различной крупностью абразива [4]. Для сравнимости получаемых результатов необходимо точно придерживаться технологических правил изготовления образцов.

ж. Влияние числа опытов. Как отмечалось выше, показатель степени масштабного числа скоростей оценивается разными авторами в пределах $\beta = 4 \div 8$. Воспользовавшись подробными данными опытов Говинда Рао, представленными в таблицах его статьи [18], сделали графическую обработку материалов по цилиндрам и по блокам. Выяснилось, что как для цилиндра, так и для блоков показатель степени β в формуле (1.2) может быть принят $\beta = 5$, если пренебречь крайними, при низких скоростях, величинами ΔV . Некоторые опыты были поставлены при трех вариантах скоростей, что явно недостаточно, так как зависимость $\Delta V(v)$ определяется графически. В опытах Рата широкие изменения $\beta = 4 \div 8$ могут быть также объяснены случайными ошибками, так как скорости были близки, $v \approx 30 \div 40 \text{ мсек}^{-1}$.

з. Возможно-максимальная погрешность в определении ΔV_0 и ΔV_n . Согласно правилам приближенного вычисления погрешностей [24], можем составить следующие выражения для возможно-максимальной погрешности в определении ΔV_0 :

$$\delta_0 = \delta_G + \delta_\tau + \delta_{C_x} + \delta_n + \delta_d + 3\delta_v + \delta_g + \delta_\gamma$$

и для ΔV_n

$$\delta_n = \delta_m + 3\delta_L + 5\delta_V = \delta_m + 3.2\delta_l + 5.2\delta_v$$

В приведенных формулах через δ обозначены максимальные возможные погрешности определяемых величин, показанных индексами. При определении δ_G следует исходить не столько из точности взвешивания образцов, а в основном из того, насколько соблюдались постоянными λ , l/d и другие упоминавшиеся выше факторы. На основании изложенных соображений можно подсчитать

$$\delta_0 = 0.05 + 0.01 + 0.05 + 0.005 + 0.005 + 3 \cdot 0.02 + 0 + 0 = 0.18 \approx \pm 18\%$$

и

$$\delta_n = 0.06 + 3.2 \cdot 0.005 + 5.2 \cdot 0.02 = 0.29 \approx \pm 30\%$$

Таковыми сравнительно большими величинами возможных погрешностей объясняется разброс опытных величин ΔV_0 на графике $\Delta V_0(W)$ [4]. Особенно велика может

быть погрешность в определении интенсивности эрозии в натуре по опытам с моделями.

5. **Выводы.** При исследованиях масштабного эффекта кавитационной эрозии следует обращать особое внимание: а) на точность определения скорости потока кавитационного сопротивления, потери на эрозию—объема эрозии; б) на соблюдение тождественности стадий кавитации и относительных размеров моделей; в) на правильное назначение продолжительности опытов. Во избежание большой величины погрешности надлежит ставить опыты в большом интервале скоростей и в большем числе их вариантов.

Поступила 25 II 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Шальнев К. К. Гидромеханические аспекты кавитационной эрозии. Изв. АН СССР. Отд. техн. н., 1958, № 1.
2. Шальнев К. К. Условия интенсивности кавитационной эрозии. Изв. АН СССР. Отд. техн. н., 1956, № 1.
3. Константинов В. А. Влияние числа Рейнольдса на отрывное обтекание. Изв. АН СССР. Отд. техн. н., 1946, № 10.
4. Шальнев К. К. Энергетический параметр и масштабный эффект кавитационной эрозии. Изв. АН СССР. Отд. техн. н., 1961, № 5.
5. Plesset M. S., Ellis A. T., On the Mechanism of Cavitation Damage. Trans. ASME, 1955, v. 77, No. 7.
6. Parsons Ch., Cook St. Investigations into the causes of corrosion or erosion of propellers. Engineering, 1919, v. 107.
7. Kerr S. L. Determination of the Relative Resistance to Cavitation Erosion by the Vibratory Method. Trans. ASME, 1937, v. 59, No. 5.
8. Mousson J. M. Pitting Resistance of Metals Under Cavitation. Trans. ASME, 1937, v. 59, No. 5.
9. Гавранек В. В. Изучение кавитационной эрозии металлических материалов на магнотриксционном вибраторе. ХПИ им. В. И. Ленина, 1957, т. IX, 1.
10. Knapp R. T. Recent Investigation of the Mechanics of Cavitation Damage. Trans. ASME, 1955, v. 77, No. 7.
11. Noskiewicz J. Beitrag zur Ähnlichkeit bei Kavitation. Bergakademie, 1956, Bd. 8, No. 2.
12. Kerr S. K., Rosenberg K. An index of Cavitation Erosion by Means of Radioisotopes. Trans. ASME, 1958, v. 80, No. 6.
13. Schröter H. Korrosion durch Kavitation in einem Diffusor. Z. veraines dtsch. Ingr., 1932, Bd. 76, No. 21.
14. Rata J. M. Erosion de cavitation. Mesure de l'erosion par jauges resistantes. Symposium Recherche sur les Turbines Hydrauliques de Nice. 16—20 septembre 1960.
15. Gowinda Rao P. S., Thiruvengadam A. Preduction of Cavitation Damage. J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs, 1961, v. 87, No. Hy 5.
16. Gillemot L., Sinay F. Die Brucharbeit als Werkstoffkenngrösse. Acta techn. Acad. scient. hung., 1958, t. XXII, fasc. 1—2.
17. Knapp R. T. Accelerated Field Tests of Cavitation Intensity. Trans. ASME, 1958, v. 80, No. 1.
18. Gowinda Rao W. S. Cavitation — its Inception and Damage. Irrigat. and Power, 1961, v. 18, No. 1.
19. Fáy Csaba. A Vízgépek Transzékének Kavitációs Csatornája Magyar tud. akad. Müsz. tud. oszt. közl. 1958, XXII, Kötet 1—3, számából.
20. Prandtl L. Herstellung einwandfreier Luftströme. Handb. Exptl phys., 1932, Bd. 4, Teil 2.
21. Witoszynski E. Über Strahlerweiterung und Strahlablenkung. Vorträge aus dem Gebiete der Hydro- und Aerodynamik. Berlin, 1924.
22. Шальнев К. К. Кавитация неровностей поверхности треугольного профиля. ПМТФ, 1962, № 6.
23. Nowotny H. Werkstoffzerstörung durch Kavitation. Berlin, VDI — Verlag, 1942.
24. Франк М. П. Элементарные приближенные вычисления. М., 1932.