



Рис. 1. Эрозия поверхности чугушной втулки рабочего колеса поворотной-лопастной турбины

К. К. ШАЛЬНЕВ

КАВИТАЦИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВЫЗЫВАЕМАЯ ЕЮ ЭРОЗИЯ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 23 II 1951)

Во многих случаях кавитационной эрозии стенок камеры лопастных гидромашин причина эрозии приписывается действию щелевой кавитации⁽¹⁾. Результаты исследований свойств щелевой кавитации в лаборатории⁽²⁾ и опыты по обнаружению кавитации в насосах осциллографированием давления⁽³⁾ привели автора к убеждению в ошибочности таких предположений. Происхождение этой ошибки объясняется тем, что повреждения от кавитации обычно начинают изучать тогда, когда они достигают большого объема. Между тем, если проследить развитие эрозии с первичных ее стадий, то легко обнаруживается характерная особенность в расположении первых каверн эрозии, а именно: эрозия располагается за неровностями поверхности, например, от неточной подгонки деталей друг к другу, за вершинками гребешков от нечистой обработки поверхности детали режущим инструментом (рис. 1) и в других аналогичных случаях. Тот факт, что кавитация может возникать от незначительных неровностей поверхности, часто наблюдается в опытах с кавитацией в гидродинамических трубах⁽⁴⁾: такая кавитация возникает за случайными царапинами на модели или на стенках экспериментальной коробки, на стыке стенок экспериментальной коробки с соплом трубы.

С целью исследовать структуру кавитации неровностей поверхности и условия ее возникновения автором ставились опыты с продувками моделей неровностей в малой гидродинамической трубе ВИГМ⁽⁴⁾. Модели неровностей в виде порожистых выступов треугольного и сегментного профиля крепились своим основанием на стенке экспериментальной коробки или на поджимающей стенке модели щели⁽²⁾. Высота порожков колебалась в пределах $a = 0,3 \div 6,0$ мм, высота экспериментальной коробки изменялась в пределах $a_{\infty} = 10,0 \div 30,0$ мм, высота щели была постоянной и равной $a_{щ} = 5$ мм.

В опытах с моделями неровностей использовался коэффициент кавитации $\kappa_{np} = (p_{\infty} - p_n) / \gamma q_{\infty}$, где $q_{\infty} = v_{\infty}^2 / 2g$, p_{∞} и v_{∞} — давление и средняя скорость в сечении канала, где расположена неровность, p_n — давление паров воды, γ — вес единицы объема воды. В опытах с моделью щели использовался коэффициент кавитации $\kappa_{щ} = (p_{\infty} - p_n) / \gamma q_{щ}$, где p_{∞} — давление перед щелью, $q_{щ} = v_{щ}^2 / 2g$, $v_{щ}$ — средняя скорость в щели.

Стадия кавитации характеризовалась ее длиной в долях высоты порожка $\lambda = l_k / a$, где l_k — длина кавитации, считая от порожка. Для исследования структуры области кавитации применялась высокочастотная киносъемка⁽⁵⁾, а для обнаружения шума кавитации в начальной ее стадии использовался пьезокварцевый датчик давления⁽⁶⁾.

Сравнительно устойчивая на глаз область кавитации по данным кино- съемки состоит из каверн, периодически возникающих за неровностью, растущих до какого-то предела и затем уносимых течением. В опытах с порожком высотой $a = 4,5$ мм и при высоте коробки $a_{\infty} = 24,0$ мм с помощью киносъемки с частотой 4000—5000 кадров/сек. удалось зафиксировать начальные стадии кавитации. На снимках, сделанных при $x_{кр} = 2,23$, мы наблюдали, что первые каверны кавитации возникают на расстоянии $2,2-2,7a$ от порожка. На снимках более поздних стадий развития место возникновения кавитации располагалось ближе к порожку. Снимки кавитации, сделанные при $\lambda = 18 \div 20$, не обнаруживают признаков периодичности кавитации, по крайней мере в головной ее части. Можно предположить, что каверны кавитации за-

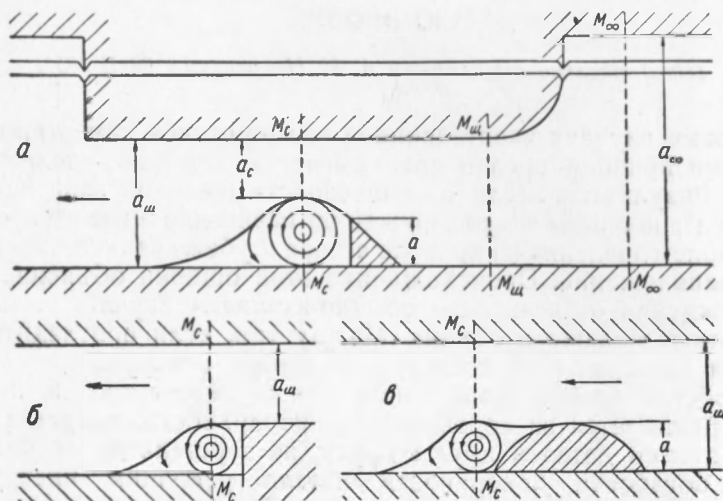


Рис. 2. Схема обтекания неровностей поверхности

рождаются на оси вращения вихрей, срывающихся с порожка (?). Снимки показывают, что распределение давления вдоль оси вихрей неравномерно, минимум давления расположен на середине оси вихря. В периодичности образования каверн кавитации обнаруживается существование, помимо основного периода, еще одного, более короткого, появляющегося через определенные промежутки времени. (8)

Период возникновения каверн в наших опытах характеризовался следующими величинами ($\tau \cdot 10^5$ сек.): 254, 292, 178, 178, 305, 267, 254, 292, 229, 216, 114, 158, 369, 280, 242, 280, 267, 318, 191, 305, 369, 216, 229, 153, 305, 242, 229, 318. Подобное явление было отмечено также в опытах по измерению давления за плохо обтекаемыми телами (8).

Согласно принятым обозначениям (рис. 2) можно получить, пользуясь уравнением энергии и известным свойством распределения давления в поперечнике вихря (9), следующие формулы связи для критических значений коэффициентов кавитации щели: в случае щели с неровностями треугольного профиля:

$$x_{шт}^* = \frac{2 + \zeta'_{вх}}{\alpha_{сщ}^2} + \zeta_{вх} + \zeta_{тр} - m^2; \quad (1)$$

в случае неровностей сегментного профиля:

$$x_{шт}^* = \frac{2 + \zeta'_{вх}}{\alpha^2} + \zeta_{вх} + \zeta_{тр} - m^2 \quad (2)$$

высоты неровности a/a_{∞} должны стремиться к постоянному значению, равному, независимо от формы профиля неровностей, $\kappa_{нр} = 1,0$. С целью проверки приведенных соображений были построены по данным опытов с разными моделями неровностей графики $\kappa_{нр} = f(a/a_{\infty}, a/a_{щ})$ при $\lambda = 0, 4,0$ и $12,0 \div 14,0$ (рис. 3). На том же графике построены кривые $\kappa_{нр}^*$, вычисленные по формулам (4), (5), полагая $\zeta'_{вх} = \zeta'_{тгр} = 0$. Необходимые для этих вычислений значения α_c для разных степеней поджата были взяты из опытов со свободным истечением из-под щита⁽¹¹⁾, которые оказались близкими к теоретическим^(12, 13) и к опытным⁽¹⁴⁾.

Таблица 1

Тип щели	a , мм	μ	$\kappa_{щ}^*$
С	0	0,95	1,40
С	0,3	0,95	1,40
С	0,6	0,89	1,97
С	1,3	0,84	3,07
П	0	0,83	3,52

Влияние пограничного слоя на опасность возникновения кавитации неровностей было показано в опытах с моделями щелей типа С, в которых, как известно, кавитация входа не возникает⁽²⁾. Когда вершинки неровностей, искусственно прикрепленных к поджимающей стенке щели, спрятаны в пограничном слое, который, согласно опытам с дюзами⁽¹⁵⁾, должен достигать на поджимающей стенке значительной толщины, то ни $\kappa_{щ}$, ни коэффициент расхода μ не отличаются от таковых для щели с гладкими стенками. Когда вершинки неровностей выступают за пограничный слой, то щели типа С с неровной поверхностью в отношении опасности возникновения кавитации мало чем отличаются от щелей типа П (табл. 1), что можно также видеть из сравнения формул (1)–(3) с формулами коэффициентов щелевой кавитации⁽²⁾.

Выводы

1. Возникновение и развитие кавитации отдельных неровностей поверхности аналогично возникновению и развитию срывной кавитации плохо обтекаемых тел. В частности, в начальных стадиях развития кавитации ее периодичность также характеризуется числом Струхаля.

2. В щелевых каналах опасность возникновения кавитации неровностей и эрозии зависит от относительной высоты неровностей, толщины и эпюры скорости пограничного слоя.

3. Эрозионное действие кавитации неровностей поверхности особенно должно быть разрушительным, когда вершинки неровностей выступают из пограничного слоя, так как частота срыва каверн с вершинок неровностей может достигать частот, употребительных в аппаратах для ускоренных испытаний материалов на кавитационную эрозию. Этот вывод находит свое подтверждение во многих случаях эрозии лопастей вблизи цаппин и других незначительных неровностей.

Всесоюзный научно-исследовательский институт гидромашиностроения

Поступило
11 XII 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 J. M. Mousson, Proc. second Hydr. Conf. 1942, Un. Iowa 1943.
- 2 К. К. Шальнев, Инж. сборн., 8 (1950). 3 К. К. Шальнев, там же, 9 (1951).
- 4 К. К. Шальнев, ДАН, 73, № 4 (1950). 5 Н. М. Иванов, ЖТФ, 8, № 19 (1938).
- 6 Н. М. Иванов, Зав. лабор., № 7 (1938). 7 Noekkentwed, Ingenieoren, 41, 1932.
- 8 Г. И. Петров и Р. И. Штейнберг, Тр. ЦАГИ, № 482 (1940).
- 9 А. А. Саткевич, Аэродинамика как теоретическая основа авиации, Петроград, 1923; Сборн. Ленингр. ин-та инж. пут. сообщ., в. 100 (1929).
- 10 M. Teissie-Solier, Contr. à l'ét. des corps immerg., Paris, 1931.
- 11 В. А. Шаумян, Тр. ВНИИГИМ, 22, (1939).
- 12 В. В. Ведерников, там же, 9 (1933).
- 13 Н. Е. Жуковский, Собр. сочин., 3, Гидродинамика, М., 1936.
- 14 J. Weisbach, Unters. aus dem Geb. des Mech. und Hydr., 1843.
- 15 R. Witte, Forschung, 2, No. 8 (1931).