

К. К. ШАЛЬНЕВ

**ФОРМЫ ОБЛАСТИ КАВИТАЦИИ НОРМАЛЬНО ОБТЕКАЕМОЙ
ПЛАСТИНКИ**

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 11 XII 1953)

При теоретическом рассмотрении задачи о гидромеханических силах, возникающих при кавитационном обтекании профилей, задаются геометрической формой области кавитации. Некоторые авторы пользуются схемой струйного обтекания ⁽¹⁾, согласно которой область кавитации простирается в бесконечность. Другие авторы рассматривают область кавитации конечной длины, предполагая, что она замыкается зеркально отображенным профилем ⁽²⁾ или ветвями поверхности Римана ⁽³⁻⁵⁾. В данном сообщении приводятся результаты опытных исследований развития форм области кавитации за пластинкой, поставленной под углом 90° к оси потока, ограниченного стенками и имеющего положительный градиент давления в направлении течения.

Исследования кавитации за пластинкой были поставлены во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидромашиностроения. В качестве пластинки использовалась модель сегментного профиля с хордой 10 мм и относительной толщины 20%. Модель испытывалась в малой гидродинамической трубе (МГТ) ⁽⁶⁾ и устанавливалась в рабочей камере между двумя параллельными стенками, из которых одна была стеклянная; торцы модели плотно прилегали к стенкам камеры. На одной стенке, в дне камеры, были сделаны три ряда отверстий для измерения давления: центральный ряд и на расстоянии 15 мм от него два боковых ряда. В каждом ряду расстояние между пьезоотверстиями было также равно 15 мм. Скорость потока поддерживалась постоянной, равной в одной серии опытов $v_\infty = 8,0 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$ и в другой $v_\infty = 9,0 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Измерения показали, что в потоке имеется градиент давления $i = \Delta p / \Delta l = 2,1$ при $v = 8,0 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$. Различные стадии кавитации и, следовательно, формы области кавитации создавались регулированием давления в уравнивательной башенке МГТ. При проведении опытов делались зарисовки форм области кавитации при помощи сетки, нанесенной на две камеры. Кроме того, измерялось давление в области кавитации и в пограничных с ней струях при помощи ртутно-водяного манометра, присоединяемого к пьезоотверстиям в дне камеры.

Коэффициент кавитации α определялся по формуле

$$\alpha = 2(p_\infty - p_n) / \rho v_\infty^2 = v_a^2 / v_\infty^2 - 1, \quad (1)$$

где p_∞ и v_∞ — давление и скорость перед моделью, v_a — максимальная скорость на границе области срывного течения за моделью, p_n — давление паров воды, ρ — плотность воды. Длина области кавитации l_k , расстояние точки раздела между газовой и пузырьчатой частями области кавитации l_0 и ее максимальная ширина b_k выражались в единицах длины хорды профиля и обозначались: $\lambda = l_k / l$, $\lambda_0 = l_0 / l$ и $\beta = b_k / l$.

Рассмотрим результаты опытов, приведенные в табл. 1 и изображенные на рис. 1—3.

Критическое значение x^* или то значение x , ниже которого начинают проявляться признаки кавитации в виде шума и облачков пара, в наших опытах получилось равным $x^* = 3,95—4,15$ (табл. 1). Полученные в опыте пределы значений x^* объясняются отчасти погрешностями наблюдений, а отчасти методом ведения опыта, т. е. зависят от того, приближаться ли к x^* , понижая давление в уравнительной башенке МГТ или, наоборот, повышая давление. Сравним полученные в опытах величины x^* с величинами, вычисленными по формуле

$$x^* = 1 - 2\bar{p}_0, \quad (2)$$

выведенной для случая возникновения срывной кавитации за круглым профилем (7). В формуле (2) через \bar{p}_0 обозначен коэффициент давления для средней точки на задней стороне профиля, $\bar{p}_0 = 2(p_0 - p_\infty) / \rho v_\infty^2$. Согласно разным авторам (8), коэффициент p_0 для случая обтекания пластинок потоком бесконечной ширины равен $p_0 = 0,8—1,2$. Для рабочей камеры МГТ, учитывая влияние близости стенок при помощи коэффициента $k = B/l$ (9), где B — ширина рабочей камеры, следует принять $p_0 = 1,25—1,87$. При этих условиях должно быть $x^* = 3,5—4,74$, т. е. опытные x^* лежат в пределах вычисленных значений x^* по формуле (2).

Таблица 1

Схема на рис. 1	x	Шум кавитации	Схема на рис. 1	x	Шум кавитации
—	4,15	Отсутствие эффектов кавитации	<i>e</i>	1,25	Прерывистые щелчки, шум такой же силы
—	3,93	То же	<i>ж</i>	1,21	Прерывистые щелчки, треск, шум слабее
—	3,75	Изредка сухие щелчки или треск, чирканье	<i>з</i>	1,19	Заглушенные щелчки и треск, шум слабее
<i>a</i>	2,56	Непрерывное шипенье, сухой треск	<i>и</i>	1,19	То же
<i>б</i>	1,83	Непрерывный треск, гуденье, шум сильнее	—	1,19	Шипенье и слабый треск
<i>в</i>	1,70	Непрерывный треск, щелчки, шум сильнее	<i>к</i>	1,19	Шипенье
<i>г</i>	1,45	Непрерывные щелчки, шипенье, шум слабее	—	1,19	Шипенье очень слабое
<i>д</i>	1,29	Непрерывные заглушенные щелчки, шум такой же силы	<i>л</i>	1,18	» »
			—	1,19	» »
			<i>м</i>	1,17	» »

В начальной стадии развития кавитации, при x , несколько меньшем x^* , кавитация имеет вид облачков пара, изредка образующихся позади пластинки на некотором от нее расстоянии и вслед затем уносимых потоком. Быстрое на глаз мелькание кавитационных камер сопровождается резкими щелчками или треском. По мере понижения x облачка кавитации увеличиваются в размерах и становятся хорошо видимыми, но продолжают оставаться разделенными друг от друга — стадии *a*, *б* (рис. 1 на вклейке). При стадии *в* область кавитации становится монолитной за исключением ее хвоста, который продолжает оставаться раздвоенным. Начиная со стадии *e* и до стадии *л*, область кавитации состоит как бы из двух частей: передней, прилегающей к модели, и задней, хвостовой. Расстояние точки раздела представлено на графике $\lambda_0(\lambda)$ (рис. 2). При стадиях *г*, *д*, *e* передняя часть области кавитации непрозрачна и состоит, вероятно, из смеси жидко-

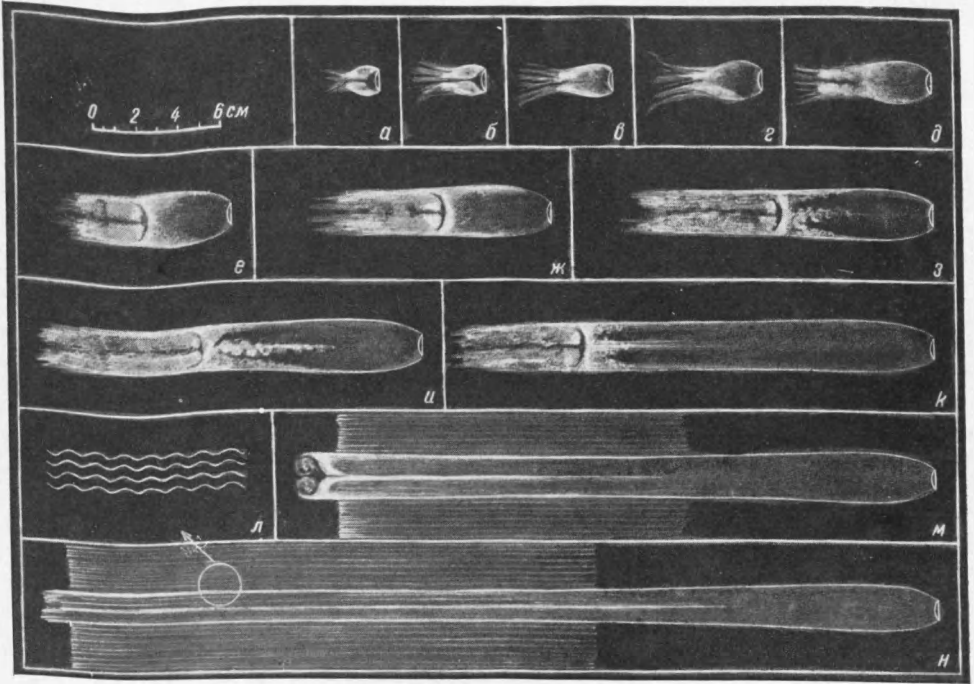


Рис. 1. Зарисовки форм области кавитации за пластинкой (модель сегментного профиля) при различных стадиях ее развития и значениях x (см. табл. 1)

К статье Л. М. Хромченко, стр. 1037

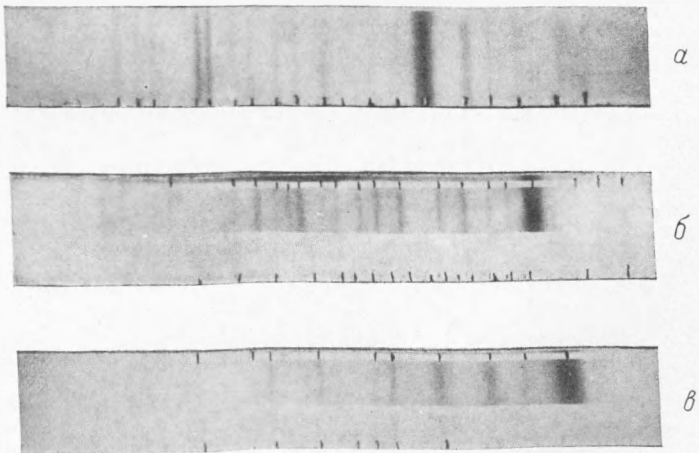


Рис. 1. Энергетические спектры: *а* — алюминия ($E_d=3$ Мэв), *б* — алюминия ($E_d=4,3$ Мэв), *в* — бора ($E_d=4$ Мэв)

сти и паровоздушных пузырьков — пузырьчатая структура, а затем, на стадии *ж* — *к*, она становится прозрачной, пузырьки отходят в хвост области — газовая структура. При стадиях *а* — *е* от хвоста области кавитации отходят перемежающиеся струи пара — следы отрывающихся каверн или кавитационных вихрей⁽¹⁰⁾. При самой крайней стадии поверхность области кавитации как сбоку, так и в плане, начиная с середины ее длины, состоит из отдельных как бы спиралеобразных струек пара (рис. 1, *н*). Такие же струйки обнаруживаются и на поверхности дна рабочей камеры. Граница области кавитации при всех стадиях, за исключением стадии *а* — *в*, имеет форму линии двойкой кривизны, в некоторых стадиях явно выпуклой в сторону потока вблизи модели и в хвосте и вогнутой в соседней части ее длины.

Область кавитации до $\lambda = 2,5-3,0$ устойчива в том смысле, что требуется значительное изменение давления или κ для малого увеличения ее длины (рис. 2). При $\lambda > 3$ область кавитации неустойчива, коэффициент κ остается почти постоянным на протяжении $\lambda = 8-40$. Максимальная ширина области кавитации наблюдается при $\lambda = 6-7$ и отстоит от профиля на расстоянии $3l$. Перед тем, как область кавитации теряет свою устойчивость, шум кавитации достигает наибольшей силы.

Вопрос о связи κ с формой области кавитации, с λ , рассмотрим при помощи выражения

$$\kappa_{\kappa} = v_{\kappa}^2/v_{\infty}^2 - 1 + \zeta(l_{\kappa}/4\chi)(v_{\kappa}^2/v_{\infty}^2) = 2(p_{\infty} - p_{\text{п}})/\rho v_{\infty}^2 = \kappa \quad (3)$$

для потока между сечением M_{∞} и сечением M_{κ} , проходящим через конец хвоста области кавитации. В формуле (3) членом $\zeta(l_{\kappa}/4\chi)(v_{\kappa}^2/v_{\infty}^2)$ учтена потеря энергии на трение на участке l_{κ} от пластинки до M_{κ} . Формула (3) показывает, что падение κ с ростом $\lambda = 2-8$ может быть объяснено преимущественно резким уменьшением v_{κ} . Роль сопротивлений, которые должны увеличивать κ , на этом участке λ невелика. Изменение скорости v_{κ} происходит вследствие изменения структуры области кавитации в начальных стадиях ее развития⁽¹⁰⁾. Слабое падение (или даже постоянство) κ с ростом $\lambda > 8$, несмотря на возрастающее сопротивление трения, показывает, что уменьшение скорости v_{κ} с ростом λ все же происходит.

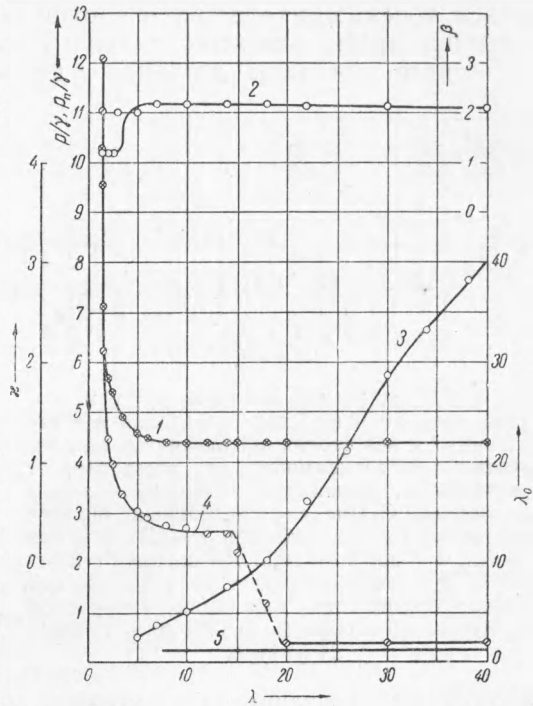


Рис. 2. Графическая характеристика связи между габаритами области кавитации, λ , β и λ_0 , и коэффициентом кавитации κ и давлением p/γ в точке M на оси следа за пластинкой. 1 — коэффициент $\kappa(\lambda)$, 2 — максимальная ширина области кавитации $\beta(\lambda)$, 3 — расстояние точки раздела $\lambda_0(\lambda)$, 4 — давление p/γ в точке M в вод. ст., 5 — давление $p_{\text{п}}/\gamma$ в м вод. ст.

Давление в пограничных струях почти при всех стадиях кавитации симметрично распределяется по обеим сторонам области кавитации (см. рис. 3). Даже при близком расположении точек замера к области кавитации (менее 4 мм) величина давления в них превышает давление паров воды, т. е. давление в области кавитации, за исключением точек, приходящихся против задней половины области кавитации при крайне развитых стадиях. Наглядное представление о характере связи величины давления с формой области кавитации можно

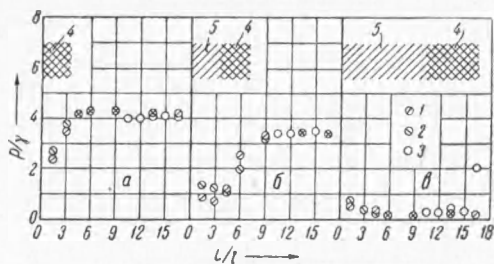


Рис. 3. Распределение давления p/γ в вод. ст. за пластинкой в области кавитации и в пограничных с ней струях при различных стадиях кавитации в зависимости от расстояния от пластинки L , выраженного в длинах хорды пластинки l . Схемы распространения области кавитации: *a* — давление при $\lambda = 4,3$; *б* — при $\lambda = 7,5$; *в* — при $\lambda = 16,5$. 1 — справа от пластинки, 2 — слева от пластинки, 3 — по оси потока, 4 — область кавитации пузырьчатой структуры, 5 — область кавитации газовой структуры

получить, если проследить ход изменения давления в одной точке M , расположенной на оси следа за пластинкой (см. рис. 2). В наших опытах такая точка M отстояла от модели на $16,5l$. До того момента, пока область кавитации еще не распространилась до точки M , изменение в ней давления подобно изменению давления перед моделью. Давление в точке M резко падает, когда через нее проходит хвост кавитации, но продолжает оставаться выше p_n . Только тогда, когда точка M попадает в газовую зону области кавитации, давление в точке M становится почти равным давлению p_n .

Выводы. 1. Условия возникновения кавитации за пластинкой, нормально установленной к оси потока, тождественны условиям возникновения кавитации за круглым профилем.

2. Форма поверхности кавитационной каверны в плоско-параллельном потоке с положительным градиентом давления соответствует теоретическим предположениям об односторонней кривизне пограничной линии области кавитации только в начальной ее стадии, а при развитых стадиях кавитации лишь части пограничной линии, ближайшей к пластинке. При крайне развитых стадиях кавитации распад части поверхности, замыкающей область кавитации, на кавитирующие струи исключает возможность возврата пограничного тока к задней стороне пластинки.

3. Величина среднего давления в области кавитации не одинакова для различных точек области кавитации, зависит от ее структуры и, следовательно, от стадии кавитации. Среднее давление в области кавитации равно давлению паров воды только в газовой зоне области кавитации.

Всесоюзный научно-исследовательский институт гидромашиностроения

Поступило
4 IX 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. Betz, Verh. 3 Int. Kongr. techn. Mech., 1, T., 1931. ² D. Riabouchinsky, III Congrès de Méchan. Appl. des Fluides, 1, 1930. ³ Д. А. Эфрос, ДАН, 51, № 4 (1946). ⁴ М. И. Гуревич, Изв. АН СССР, ОТН, № 4 (1946). ⁵ D. Gilbarg, J. Serrin, J. Math. Phys., 29, 1 (1950). ⁶ К. К. Шальнев, ДАН, 72, № 4 (1950). ⁷ К. К. Шальнев, ДАН, 71, № 6 (1948). ⁸ Е. В. Красноперов, Экспериментальная аэродинамика, 2, 1935. ⁹ J. Brickhoff, M. Plesset, N. S. I m t o n s, Quart. Appl. Math., 8, No. 2 (1950). ¹⁰ Н. М. Иванов, ЖТФ, № 8 (1939).