

ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ В ПОТОКЕ НА РАЗВИТИЕ ЗОНЫ КАВИТАЦИИ

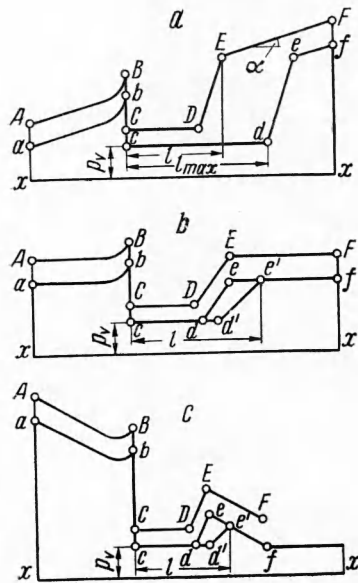
К. К. Шальнев

(Москва)

Давление в потоке через каналы решетки турбины понижается в направлении выхода из решетки, в решетке насоса давление повышается. В рабочих камерах гидродинамических труб, в которых производятся исследования кавитации профилей лопастей на одиночных моделях, давление вдоль оси камер обычно понижается. В последнее время отмечается стремление конструировать рабочие камеры гидротруб постоянного давления. Таковы, например, камеры для испытания гребных винтов, стенки которых имеют прорезы, параллельные оси камеры [1]; камера при этом располагается внутри корпуса трубы так, что между стенками камеры и корпусом трубы находится вода; для этой же цели делают диффузорные камеры [2].

Приводятся некоторые экспериментальные данные о влиянии градиента давления в потоке на развитие зоны кавитации на моделях конструктивных элементов, продуваемых в гидродинамических трубах.

Рассмотрим условия роста длины зоны кавитации, пользуясь схематичными графиками распределения давления вдоль оси рабочей камеры при трех вариантах градиента давления $\Delta p = p_1 - p_2$: отрицательного, нулевого и положительного (фиг. 1, а — с). Во всех трех вариантах Δp заглавными буквами на графиках обозначены линии давления для некоторого состояния кавитации, образующейся за препятствием в створе BC и распространяющейся до точки E . Прописными буквами обозначены линии давления, соответствующие условиям опытов, когда в уравнильной башенке [3] создается значительное разрежение, так что абсолютное давление над свободным горизонтом воды в ней приближается к давлению паров воды p_v , а в большей части зоны кавитации оно равно p_v .



Фиг. 1. Схема развития зоны кавитации при трех вариантах градиента давления вдоль оси рабочей камеры

В случае отрицательного градиента всегда будет находиться на второй кривой пониженного давления точка e с давлением, равным давлению в конце зоны кавитации предыдущей стадии, — в точке E . Увеличение длины зоны кавитации будет равно

$$\Delta l = l_2 - l_1 = h \operatorname{ctg} \alpha \quad (1)$$

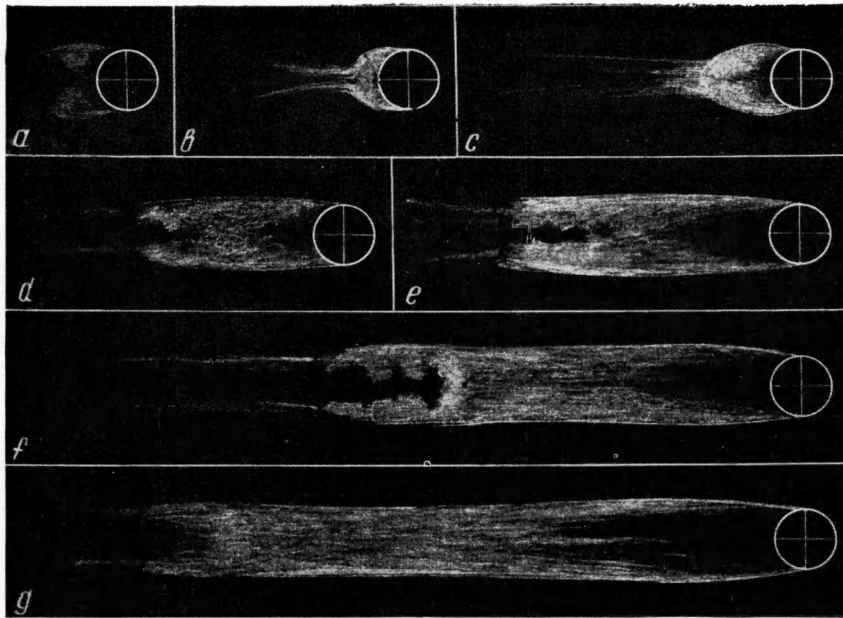
где h — понижение давления и α — угол наклона линии давления к горизонту.

Отсюда видно, что в рабочих камерах со слабым градиентом давления увеличение длины зоны кавитации будет больше, чем в камерах с крутым градиентом давления. Длина зоны кавитации достигает предела, когда давление в уравнильной башенке гидротрубы понизится от некоторой величины p_a до p_v . Тогда

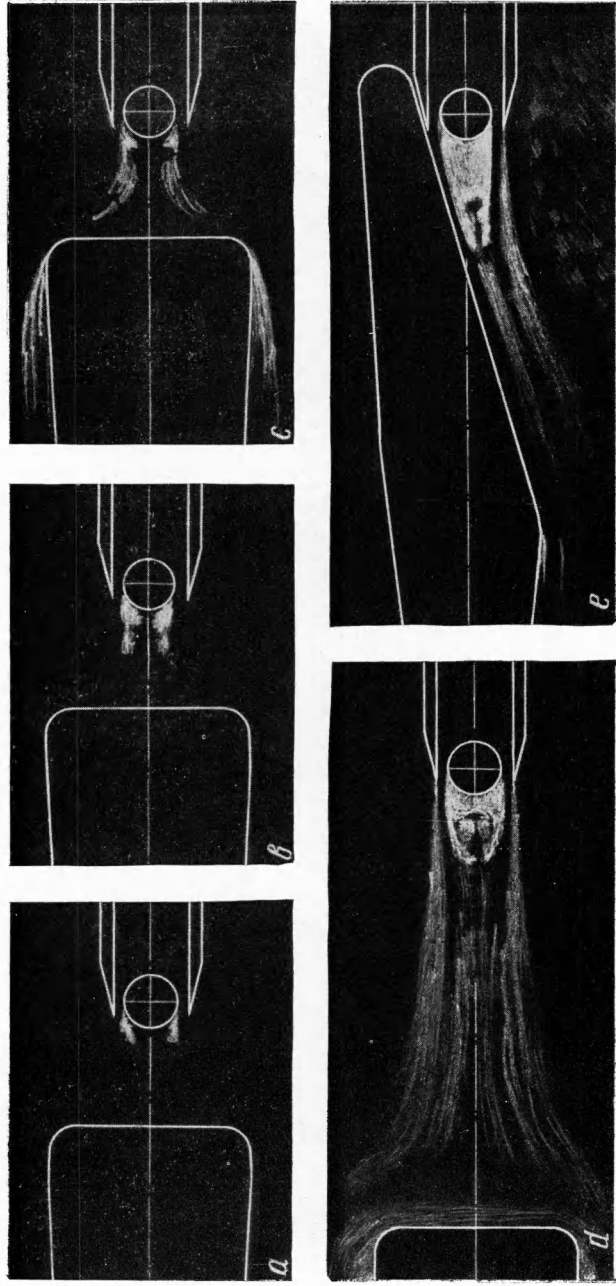
$$\Delta l_{\max} = h \operatorname{ctg} \alpha = \frac{p_a - p_v}{\gamma} \operatorname{ctg} \alpha \quad (2)$$

Так как давление в конце зоны кавитации будет оставаться равным давлению в этой точке предыдущей стадии, то структура зоны кавитации будет мало изменяться.

Во втором случае, когда в потоке устанавливается нулевой градиент давления (фиг. 1, б), давление в точке E при понижении давления в уравнильной башенке понизится до давления в точке e . Давление уменьшится на всем протяжении зоны кавитации, что должно повлечь изменение в структуре зоны кавитации и увеличение ее длины (точка e'). Согласно формуле (1) длина зоны кавитации будет равна неопределенной величине.



Фиг. 3. Зарисовка зон кавитации в рабочей камере с положительным градиентом давления (обозначения см. в табл. 1).

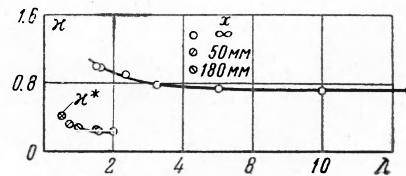


Фиг. 4. Зарисовка зон кавитации в рабочей камере с отрицательным градиентом давления: *a* — с по опытам при $x = 50$ мкм; *b* — по опытам при $x = 180$ мкм; *c* — по опытам с косым подпирающим клином

В третьем случае, когда в потоке устанавливается положительный градиент давления, давление в точке *E* при понижении давления в уравнительной башенке понижается до точки *e*. Вследствие уменьшения давления на всем протяжении зоны кавитации ее длина должна увеличиться. При этом, если длина зоны распространится до точки *f*, где давление равно p_v , то ее длина может сделаться равной бесконечности. Структура зоны кавитации должна резко измениться.

Приведем результаты наших опытов с моделью круглого профиля в гидротрубе при двух вариантах градиента давления: положительного и отрицательного. В первом варианте опытов модель устанавливалась в прямолинейной рабочей камере сечением 20×50 мм², так что ее торцы прижимались к стенкам камеры. Положительный градиент давления в отсутствие кавитации составлял 12 мм рт. ст. в воде на 30 мм длины камеры.

Фиг. 2. Длина зоны кавитации за моделью круглого профиля в рабочей камере с положительным и отрицательным (кружки с крестиками) градиентами давления



В каждом варианте опытов скорость потока поддерживалась постоянной, давление регулировалось с таким расчетом, чтобы охватить возможно широкий диапазон стадий кавитации. Изменялись длина зоны кавитации в долях диаметра модели ($\lambda = l/d$), давление в потоке, температура воды. Делались зарисовки зоны кавитации и регистрировались звуковые эффекты кавитации.

Коэффициент кавитации вычислялся по формуле

$$x = \frac{P_{\infty} - P_v}{\gamma q_{\infty} k} \tag{3}$$

Здесь p_{∞} и q_{∞} — давление и скоростной напор в створе оси модели в ее отсутствие, k — коэффициент стеснения потока моделью, γ — вес единицы объема воды. Коэффициент k вычислялся из условия равенства расходов в сечении до модели и в сечении, стесненном моделью.

Опыты при положительном градиенте давления показали (фиг. 2, табл. 1), что

Таблица 1

Обозначения на фиг. 3	x	λ	Шум кавитации
a	1.94	}	Очень редкий скрип, шипение, кавитации не видно
	1.20		
	1.00		
b	0.98	1.5—1.75	Прерывистый треск, мелькание облачков
c	0.90	2.2—2.5	Гудение, треск
d	0.78	3.0—3.5	Сильный треск, гудение
e	0.73	4.5—5.5	Сильный треск, бурление
f	0.72	8	Бурление, щелчки
g	0.72	10.5	Слабое бурление
			Слабое шипение, отрыв

длина зоны кавитации начинает быстро возрастать с понижением x , начиная с некоторой стадии кавитации, примерно с $\lambda = 4$. На протяжении $1/2 \lambda$, считая от задней поверхности модели (фиг. 3), зона имеет крупнопустотную структуру и только на протяжении $1/3 \lambda$ — хвосте зоны, пузырчатую структуру — отрывная стадия кавитации. С дальнейшим понижением x кончик зоны кавитации отходит дальше от модели. Структура крупнопустотной части кавитации при этом не меняется. Состояние кавитации по сравнению с кавитацией при $\lambda = 2-3$ неустойчивое. Если при $\lambda < 4$ требуется значительное изменение давления, чтобы зона кавитации удлинилась, то при $\lambda > 5$ достаточно небольшого изменения давления, чтобы длина зоны резко возрастала.

В опытах с отрицательным градиентом давления в рабочей камере были установлены поджимающие стенки, образующие сопло, в выходном отверстии которого сече-

нием 30×20 мм и располагалась та же модель круглого профиля диаметром 20 мм. За выходным отверстием сопла помещалось препятствие в виде клина, обращенного своей тупой стороной к модели. Передняя тупая поверхность клина в одних вариантах была нормальна к оси потока, в других — составляла угол, меньший 90° . Установленный ниже по течению клин должен был создавать некоторый подпор — повышение давления, распространяющееся вверх против течения в направлении к модели круглого профиля. В опытах с клином с нормальной передней поверхностью расстояние между моделью и передней стенкой клина было 50 и 180 мм.

Результаты опытов приводятся в табл. 2, наблюдавшиеся формы зоны кавитации даны в виде схематических рисунков (фиг. 4, *a* — *d*). Как показывают рисунки, в обоих вариантах опытов сходным является тот результат, что максимальная длина кавитации, которая могла быть достигнута в опытах, не превышает $\lambda = 2.0$. Несмотря на

Таблица 2

Обозначения на фиг. 4	κ	λ	Шум кавитации
$x = 50$ мм			
<i>a</i>	0.41	—	Изредка треск
	0.35	—	Непрерывный треск
	0.32	0.75	Непрерывный треск
	0.26	1.50	Громкий непрерывный треск
<i>c</i>	0.24	1.60	Когда облачка соединены, треск переходит в гудение
$x = 180$ мм			
<i>d</i>	0.40	—	Мелькание облачков сопровождается треском
	0.34	—	
	0.29	1.0	Слабое шипение
	0.25	1.5	» »
	0.23	2.0	» »

низкие значения κ , которые можно было достигнуть в трубе, получить большую длину кавитации в рабочей камере или отрывную ее стадию не удалось. При варианте опытов $x = 50$ мм зона кавитации во всех стадиях представляется менее плотной, чем при варианте $x = 180$ мм.

В большем диапазоне значений κ она продолжает оставаться разделенной на два облачка вследствие большого подпора от клина.

Следует заметить, что аналогичное явление было наблюдаемо также Расмуссенем [4] в опытах с моделью круглого профиля, помещенной в канале с расходящимися стенками. Подпирающее действие клина сказывается также и при косом клине (фиг. 4, *e*).

Результаты опытов дают основание сделать вывод, что в насосах не могут образовываться отрывные стадии кавитации с таким длинным хвостом, который наблюдается в опытах в каналах с положительным градиентом давления. Если в таких гидромашинах могут образовываться отрывные стадии кавитации, то в этих случаях зона кавитации должна заканчиваться где-то на лопасти или вблизи нее. Это обстоятельство должно приводить также к иному влиянию кавитации и на гидромеханические характеристики профилей лопасти, чем оно сказывается на моделях одиночных профилей в рабочей камере с отличающимся градиентом давления.

Наоборот, в турбинных решетках кавитация на лопастях легко может удлиняться и переходить в отрывную стадию. Это наблюдается в действительности, когда хвост кавитации заходит в отсасывающую трубу, а отдельные пузыри воздуха, выделившиеся при кавитации, увлекаются течением в отводный канал.

Поступила 12 I 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Staub L. G., Ripken J. F. and Olson R. M. The Six-inch Water Tunnel at the St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory and its Experimental Use in Cavitation Design Studies. Proceedings Symposium «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
2. Williams E. E. and McNulty P. Some Factors Affecting the Inception of Cavitation. Proceedings Symposium «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
3. Шальнев К. К. Кавитационное качество гидродинамических труб. ДАН СССР, 1950, т. 72, № 4.
4. Rasmussen R. E. Resultats d'expériences relatives à l'influence d'une admission d'air dans des écoulements soumis à la cavitation. Rev. gén. hydraul., ann. 16, mars — avr., 1950, No 56.