

## РОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБТЕКАЕМОГО ТЕЛА В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ

*А. М. Фрид*

В конце прошлого столетия техники столкнулись со своеобразным, характерным своей пористостью разрушением поверхности гребных винтов и лопастей рабочих колес гидротурбин.

Было замечено, что разрушение возникает тогда, когда давление на поверхности лопасти вблизи мест будущих повреждений длительное время снижалось до значения, необходимого для парообразования при данной температуре, и вместо однородного потока поверхность омывалась смесью воды и пузырьков, заполненных паром и газом, которые сливались в полости-каверны, напоминающие пустоты. Отсюда это явление и получило название кавитации<sup>1</sup>.

В настоящее время с явлением кавитации и ее вредными последствиями можно встретиться не только в гидромашинах, но в агрегатах и машинах, работа которых связана с жидкостью: в двигателях внутреннего сгорания водяного охлаждения, в топливных форсунках, в жидкостных насосах.

Безусловно, что успешная борьба с кавитацией и явлениями, сопутствующими ей, возможна только в том случае, когда будут выяснены их истинные причины, которые остаются еще не совсем ясными. Так, например, до настоящего времени не ясна причина образования кавитационных пузырьков при давлениях, отличных от давления парообразования при данной температуре.

Как известно из опытных данных, с увеличением количества растворенного в жидкости воздуха повышается давление, при котором возникают кавитационные пузырьки. Исходя из этого, а также из существующего мнения о причине образования последних (вследствие разрывов в жидкости), некоторые исследователи утверждают, что растворенный в жидкости воздух понижает прочность ее и вследствие этого облегчает процесс образования кавитационных пузырьков. Однако опыты, проведенные Гарвеем<sup>2</sup>, ставят под сомнение указанное утверждение.

Обработав высоким давлением (порядка 650 ат) насыщенную воздухом воду, Гарвей испытал ее на разрыв. Многие образцы после этого выдерживали напряжение растяжения в 20—25 кг/см<sup>2</sup>.

Исходя из результатов своих опытов, Гарвей предположил, что сопротивление растяжению жидкости, не обработанной давлением, нарушается из-за наличия в ней субмикроскопических пузырьков воздуха в трещинках, микроскопических пылинок, находящихся в жидкости, которые

<sup>1</sup> От латинского слова *cavitas* — пустота.

<sup>2</sup> Robert T., Knapp. The Inst. of Mechanical Engineers, Proceedings (A), v. 166, № 2, 1952.

и являются, следовательно, центрами образования кавитационных пузырьков. Однако эта гипотеза не проверена опытом.

По нашему мнению, роль воздуха в образовании кавитационных пузырьков сводится к следующему: на поверхности омываемого тела всегда имеются поры, микроскопические трещины и вмятины. Для простоты представим последние в виде полусферы с радиусом  $r$  (рис. 1а).

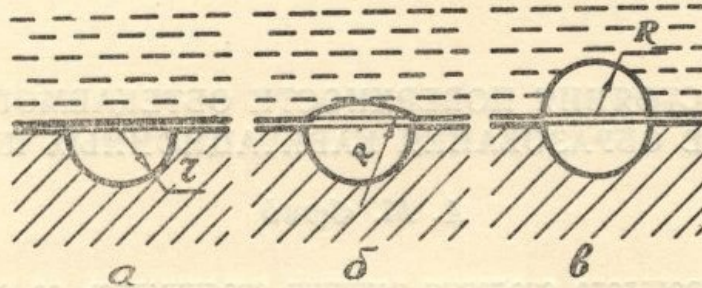


Рис. 1.

Если предположить, что поверхность вмятины несмачиваема или плохо смачиваема, то вода не заполнит сферу, так как для этого понадобится бы большое гидродинамическое давление, которое может быть найдено из выражения<sup>1</sup>

$$P_0 = \frac{2\alpha}{r}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — поверхностное натяжение жидкости (для воды при температуре  $20^\circ$   $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-5}$  кг/см),

$r$  — радиус сферы в сантиметрах.

Если в гидродинамической установке вода насыщена воздухом, то давление последнего, который, в основном, будет заполнять полусферу, равно, примерно, давлению насыщения  $P_n$ . При отсутствии воздуха в воде давление в полусфере равно, примерно, упругости паров  $P_n$ .

Предположим, что вследствие понижения гидродинамического давления  $P_0$  давление в пространстве, ограниченном полусферой и водой ( $P_n$  или  $P_n$ ), станет больше суммы гидродинамического давления  $P_0$  и силы поверхностного натяжения. Последнее, как и гидродинамическое давление, будет препятствовать образованию кавитационного пузырька. Тогда под воздействием этого избыточного давления, которое будет поддерживаться выделяющимся из жидкости паром или воздухом, начнет формироваться пузырек.

На рисунке 1 показана первая  $a$  и вторая  $b$  стадии роста пузырька, при этом мы не предусматриваем отрыв жидкости от поверхности тела.

Следовательно, зародившийся пузырек будет расти, если

$$P_n > P_0 + \frac{2\alpha}{R_1} \quad (2)$$

или

$$P_n > P_0 + \frac{2\alpha}{R_2}, \quad (2a)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — соответственно радиусы парового и воздушного пузырьков.

<sup>1</sup> Давление в пространстве, ограниченном полусферой и поверхностью жидкости, в данном случае не учитывается.

Необходимо обратить внимание на следующее: по мере образования пузырька радиус его уменьшается. Вследствие этого второй член правой части неравенства (2) и (2а) возрастает, и рост пузырька замедляется. Рост пузырька совсем прекратится, когда давление в нем станет снова равным внешнему давлению, то есть

$$P = P_0 + \frac{2\alpha}{R}. \quad (3)$$

Для дальнейшего роста пузырька необходимо новое понижение гидродинамического давления  $P_0$ .

Иная картина будет тогда, когда радиус пузырька  $R$  станет равным радиусу полусферы на поверхности тела  $r$ . С этого момента с понижением давления  $P_0$  начнется неограниченный рост пузырька.

Критические размеры радиуса пузырька, отвечающего граничащим условиям, может быть найдем из равенства (3).

$$R^* = r = \frac{2\alpha}{P - P_0}. \quad (4)$$

Если в жидкости нет растворенного воздуха, тогда равенство (4) можно записать в следующем виде:

$$R^* = r = \frac{2\alpha}{P_n - P_0}. \quad (4a)$$

Величина  $P_n$  может быть больше  $P_0$  только в результате благоприятных тепловых флуктуаций, или же при понижении  $P_0$  до значений, меньших  $P_n$ .

Но так как величина  $P_n$  (при нормальной температуре) порядка сотых долей атмосферы, то, следовательно, для получения критических размеров пузырька необходимо, вероятно, весьма значительное понижение  $P_0$ , то есть в этом случае кавитационные пузырьки будут возникать при давлениях  $P_0$ , которые значительно ниже давления парообразования при данной температуре.

В том случае, когда жидкость насыщена воздухом, равенство (4) можно записать в следующем виде:

$$R^* = r = \frac{2\alpha}{P_n - P_0}. \quad (4б)$$

Величина  $P_n$  зависит от степени насыщенности жидкости воздухом и, следовательно, образование пузырька возможно при давлениях  $P_0$ , превосходящих давление парообразования при данной температуре.

Таким образом, чем больше растворено в воде воздуха, тем при более высоком значении  $P_0$  мы получим, при остальных равных условиях, требуемую для образования пузырька разность  $P_n - P_0$ . С другой стороны, чем большее значение  $P_n$ , тем при меньших значениях радиуса  $r$  микроскопической сферы (трещинки или поры) на теле возможно образование и рост пузырька при тех же значениях  $P_0$ .

Для подтверждения вышеизложенных предположений нами были проведены следующие опыты: стеклянная мензурка № 1 наполнялась отстоявшейся водопроводной водой и помещалась в камеру специально сконструированной установки, которая также заполнялась водой. Вода в камере сжималась до давления 700—1000 атм и выдерживалась 5—10 минут. После этого при атмосферном давлении вода в мензурке медленно подогревалась до температуры кипения в сосуде с касторовым маслом. Для контроля в этот же сосуд помещалась также стеклянная мензурка № 2, наполненная водой, не обработанной давлением.

Как показали опыты, обработанная давлением вода закипала в мензурке № 1 при  $118^{\circ}$ , в то время как необработанная вода в мензурке № 2 начинала кипеть при температуре около  $100^{\circ}$ .

Таким образом были проверены опыты Гарвея.

Однако мы провели вторую серию опытов, результаты которых ставят под сомнение гипотезу Гарвея и в некоторой степени подтверждают наши предположения о процессе возникновения паровоздушных пузырьков. Эти опыты заключались в следующем: стеклянная мензурка № 1, наполненная водой, как и ранее, обрабатывалась давлением. После этого вода переливалась из мензурки № 1 в № 2, а в мензурку № 1 наливалась необработанная давлением вода. Обе мензурки при атмосферном давлении подогревались до температуры кипения воды, находящейся в них.

Неоднократно проведенные опыты показали, что обработанная давлением вода, но не в обработанной мензурке № 2 неизменно закипала при температуре около  $100^{\circ}$ , в то время как необработанная вода, но в обработанной до того (с водой) давлением мензурке № 1 закипала при температуре  $118^{\circ}$ .

Как первая, так и вторая серии опытов были проверены путем создания вакуума над поверхностью воды в мензурках, помещенных в эксикатор. Качественная картина при этом аналогична той, которую мы получили при кипячении воды.

Проведенные опыты дают основание предполагать, что при обработке высоким давлением вода заполняет все неровности микротрещины на поверхности сосуда, в которых до того находился воздух. Последний же, очевидно, растворяется в воде при обработке ее давлением. Поэтому образование пузырьков на поверхности такого сосуда затруднительно, и вода в нем закипает с перегревом, независимо от того, какое количество воздуха растворено в ней, а также от того, что в ней, очевидно, находятся инородные микроскопические частицы.

Эти опыты дают, в некоторой степени, объяснение и того факта, что чистота обработки обтекаемого тела, а также материал его в значительной мере влияет на процесс образования кавитационных пузырьков. На тщательно обработанной поверхности труднее вызвать кавитацию, нежели на грубо обработанной. На поверхности тела, изготовленного из пористого металла, легче вызвать кавитацию, нежели на теле, изготовленном из малопористого материала.

Для проверки вышеизложенного были изготовлены образцы стали, латуни, дюралья и свинца, по два из каждого материала. Одна поверхность одного образца из каждой пары полировалась или тщательно обрабатывалась, в то время как поверхность второго была чисто обработана резцом. Образцы были помещены в мензурки с водой, находящиеся в эксикаторе, в котором создавался вакуум. Опыты подтвердили наши предположения. На дюралевых образцах наблюдалось наибольшее количество и наибольший размер пузырьков, выделение которых не прекращалось в течение нескольких часов опыта, в то время как на стальном микрошлифе пузырьки визуально не наблюдались и тогда, когда давление в эксикаторе стало ниже давления парообразования (кипения).

Следовательно, растворенный в воде воздух в сочетании с микроскопическими трещинками и порами на поверхности тела облегчает процесс образования кавитационных пузырьков.

Можно предположить, что пропитка под высоким давлением или покрытие поверхности обтекаемого тела каким-либо малопористым веществом повысит кавитационную стойкость его.