

С. С. АВЕТИСОВ

ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ КАВИТЫ ПРИ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ*

Анализ абразивных и кавитационных износов определяет область кавитационных разрушений, как застойную зону [1, 10], в которой отсутствуют линии износов. Линии износа впереди застойной зоны указывают на наличие отрывного течения жидкости. На рис. 1 показан износ на поверхности верхнего обода рабочего колеса, при выходе потока. Линии износов, которые начинаются перед язвочками на обода рабочего колеса, у линии стыка лопасти с верхним ободом, направлены против течения. Затем перегибаясь, эти линии износов следуют по потоку, составляя как бы граничную линию застойной зоны. Согласно существующему представлению об отрывном обтекании за точкой отрыва, скорость частиц, движущихся в непосредственной близости к контуру тела, направлена против основного потока. Только этим можно объяснить своеобразную кривизну линий износов на поверхности верхнего обода рабочего колеса при выходе потока (рис. 1).

Приводим анализ динамики кавит в области отрывного течения исходя из следующих установившихся понятий из теории крыла и работ по кавитации.

При обтекании лопасти, на которой возникает подъемная сила, жидкость движется по концентрическим кругам вокруг выходной кромки лопасти, как вокруг вихревой нити [2, 4].

Многочисленные эксперименты, проведенные с целью изучения кавитации [3, 5, 7, 8, 9], установили что кавита в области отрицательного градиента скорости сгущается и по мере нарастания отрывается от контура лопасти. При обтекании лопасти жидкость должна двигаться по концентрическим кругам вокруг выходной кромки лопасти, как вокруг вихревой нити. Скорость в поле прямолинейного вихря, напряженке которого равно Γ , может быть выражена следующей формулой [2, 4]

$$\int dv = \int \Gamma (ds/4\pi r^2) \sin \alpha. \quad (1)$$

* В порядке обсуждения.

Единичный участок вихревой нити, при $\sin \varphi = 1$ обуславливает в точке P поля скорость

$$V \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \Gamma / 4 \pi a^2 \quad (2)$$

или

$$\Gamma = 4 \pi a^2 \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (3)$$

где a — расстояние от центра вихря до рассматриваемой точки.

В нашем случае a — это расстояние от выходной кромки лопасти до канавок, образованных на поверхности лопасти кавитацией [1].



Рис. 1.

Соответственно, сила действующая на участке лопасти с единичной длиной в направлении плоскости решетки, определится так:

$$P = \frac{\gamma}{g} \Gamma \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \frac{\gamma}{g} 4 \pi a^2 (v_x^2 + v_y^2). \quad (4)$$

Следовательно, в области кавитационных износов на кавиту, со стороны выходной кромки, будет действовать сила, вызванная цирку-

лящей лопасти, а со стороны входной кромки лопасти кавита будет испытывать действие сил основного потока. Эксперименты [3, 5, 7] показывают, что кавита возникает в слое жидкости, непосредственно прилегающей к твердой поверхности т. е. в пограничном слое лопасти. Эти кавиты скапливаются (сгущаются) в области отрывного течения. Согласно теории пограничного слоя, давление в пограничном слое приравнивается статическому давлению, внешнего к граничному слою потока. Таким образом, в области отрывного течения, статическое давление потока будет равно давлению образования. Следовательно, кавита, имея внутреннее давление, равное давлению пограничного слоя, находится под действием двух противоположно направленных сил. Одна сила направлена от выходной кромки лопасти, другая со стороны входной кромки. Если бы давление убывало вдоль потока, то поступательное движение кавиты продолжалось бы в том же направлении. Но продольная скорость движения в пограничном слое невелика, благодаря замедляющему действию стенки. Энергия и количество движения малы и могут оказаться недостаточными для того, чтобы кавита продолжала двигаться против нарастающего давления. В таком случае кавита остановится. Затем может начаться скопление кавит (сгущение). Только так можно объяснить процесс сгущения кавиты и дальнейший отрыв от обтекаемого контура. Силы, вызванные циркуляционным течением вихря, заменяющие выходную кромку, могут служить в начальный момент сгущения кавиты как бы подпорной поверхностью до момента полного сгущения кавиты. Так как кавиты выделяются из жидкости непрерывно, и судя по экспериментам [3, 7, 8], они скапливаются в оболочку вблизи выходной кромки, то практически размеры сгущенной кавиты могут возрасти в широких пределах. Размер же концентрической окружности определяется значением циркуляции лопасти, в данном случае открытием направляющего аппарата. Следовательно, для каждого открытия направляющего аппарата турбины в какой-то момент радиус сгущенной кавиты достигнет радиуса концентрической окружности. Когда радиус сгущенной кавиты станет равным радиусу концентрической окружности, вследствие равнодействия всех сил, приложенных на кавиту, незначительное изменение внешних сил во внешнем потоке или на концентрической окружности циркуляционного движения вызывает отрыв кавиты от контура лопасти. Естественно полагать, что отрываясь под действием основного потока, кавита должна катиться без скольжения по линии одинаковых скоростей по потоку, т. е. по концентрической окружности вокруг выходной кромки лопасти без скольжения. Когда кавита катится без скольжения по концентрической окружности циркуляционного движения, вне этой окружности, точка контура кавиты описывает эллипсоиду. Обозначим радиус неподвижной окружности через a , производящей — через b .

Для графического построения эписцилоиды, делим полуокружность bID и угол $bo\eta = \pi\delta/a$ на n равных частей, проводим радиусы I, 2, 3, 4 через точку o , дуги окружности I I, II 2, III 3 описываем из o ; откладывая затем I $\alpha_1 = 1\alpha$, II $\beta_1 = 2\beta$, III $\gamma_1 = 3\gamma$ получим точки $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, принадлежащие эписцилоиде.

Согласно обозначениям на рис. 2 имеем:

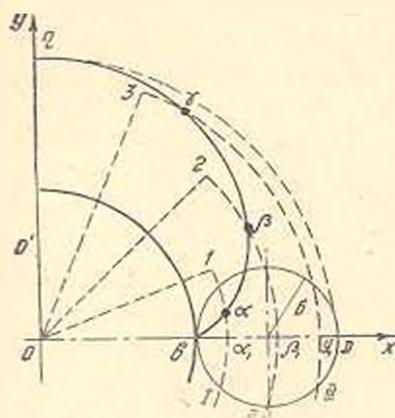


Рис. 2.

$$x = (a + \delta) \cos \frac{\delta}{a} t + \delta \cos \frac{a + \delta}{a} t, \quad (5)$$

$$y = (a + \delta) \sin \frac{\delta}{a} t - \delta \sin \frac{a + \delta}{a} t,$$

где t — угол катания.

По мере нарастания кавиты размер δ будет расти. При нарастании кавиты до величины $\delta = a$ эписцилоида обращается в кордиониду описываемую уравнением:

$$(y^2 + x^2 - 2ax)^2 = 4a^2(x^2 + y^2). \quad (6)$$

В (6), левая часть выражает кинетическую энергию основного потока, правая часть — энергию вторичного течения вызванного циркуляцией лопасти. При рассмотрении действия всех сил на кавиту в месте ее сгущения, изменение энергии можем определить по теореме количества движения, согласно которой

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} = 0. \quad (7)$$

Иначе говоря, кинетическая энергия потока в точке отрыва, где происходит сгущение кавиты, полностью преобразовывается в статическую. Кавиты, заключенные внутри жидкости, двигаются под действием трех сил: их увлекает поток, тормозят трение у стенки и перепад давления. В точке, где эти силы уравновешиваются, кавита останавливается. В уравнении (7) действие тормозящей силы не учтено. Скорость вблизи точки отрыва весьма мала и она изменяется настолько медленно, что в уравнении пограничного слоя (6) мы можем пренебречь производной $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$.

Первый член уравнения (7), определяющий динамическое давление потока, как вектор направлен в сторону движения. Второй член этого уравнения, определяющий статическое давление в текущей жидкости, показывает давление между отдельными линиями тока и направлен перпендикулярно линии тока. Таким образом, в момент отрыва кавиты от контура лопасти на кавиту будут действовать: полное давление, направленное в сторону движения и статическое давление направленное перпендикулярно движения кавиты.

Если по оси y отложить величину полного давления, а по оси x величину статического давления в текущей жидкости, будем иметь

$$y = \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} \text{ и } x = \frac{P}{\gamma}.$$

Подставляя значения x и y в уравнение (6), по которой двигается кавита в момент отрыва, получим:

$$\left[\left(\frac{v^2}{2g} \right)^2 + 2 \frac{P}{\gamma} \left(\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} \right) - 2 a \frac{P}{\gamma} \right]^2 = 4 a^2 \left(\frac{P}{\gamma} \right)^2. \quad (8)$$

Подставив граничное значение полного давления из уравнения (7) в уравнение (8) получим:

$$\left(\frac{v^2}{2g} \right)^2 = 4 a \frac{P}{\gamma}. \quad (9)$$

где a — расстояние от выходной кромки до места отрыва кавиты.

Подставляя в уравнение (9) значение $\frac{P}{\gamma}$ из уравнения (4) будет иметь вид

$$\frac{v^2}{2g} = 32 \pi a^3 \quad (10)$$

Полученная зависимость довольно хорошо подтверждает наличие разных канавок кавитационных разрушений для разных открытий направляющего аппарата. Анализ износа рабочего колеса [1] показывает, что число канавок кавитационных разрушений совпадает с числом открытий направляющего аппарата. Исходя из этого было сделано допущение, что расстояние кавитационных разрушений от выходной кромки лопасти с изменением скорости текущей жидкости, при изменении открытия направляющего аппарата, тоже меняется. Формула (10) дает зависимость скорости движения кавиты, в момент отрыва ее от поверхности лопасти, от расстояния точки отрыва до выходной кромки лопасти. При этом, чем меньше расстояние от места отрыва кавиты до выходной кромки тем меньше скорость, при которой возможен отрыв кавиты от контура.

Застойная зона характеризуется относительно малой скоростью движения частиц жидкости. Поэтому скорость при которой кавита может отрываться от контура лопасти является важной предпосылкой для возникновения отрывной кавитации. Формула (10) показывает, что отрыв кавиты происходит при сравнительно малой скорости.

Необходимо отметить, что эта скорость с увеличением расстояния от выходной кромки до точки отрыва, при которой отрывается кавита, возрастает. Это можно объяснить, с одной стороны, нарастанием пограничного слоя с увеличением угла атаки, с другой стороны, ростом циркуляции. Практически отрыв кавиты от выходной кромки будет происходить при незначительной скорости течения. Сле-

довательно, если имеется условие отрыва потока от контура лопасти, разрушение поверхности, вызванное отрывом кавиты, будет происходить при самых незначительных скоростях. Поэтому, условие безотрывного обтекания жидкости является важным фактором в борьбе с кавитационными разрушениями в гидротурбинах.

Таким образом при наличии отрыва потока от контура лопасти, скорость текущей жидкости, при которой происходит отрыв кавиты, зависит от расстояния отсчитанного от места отрыва потока до выходной кромки лопасти.

Так, например, для разных значений a будем иметь:

при $a = 0,2$ м, $v = 4$ м/сек;

при $a = 0,1$ м, $v = 1,41$ м/сек;

при $a = 0,02$ м, $v = 0,13$ м/сек.

Таким образом отрыв кавиты при отрывном обтекании лопасти будет происходить при весьма незначительной скорости. Это значит, что выходная кромка турбины будет интенсивно разрушаться при всех режимах ее эксплуатации.

Если теперь в уравнении (9) подставить значение $\frac{v^2}{2g}$ из уравнения (4) получим следующее выражение для определения разности статистического давления в движущейся жидкости и давления в области отрыва:

$$\frac{P}{\gamma} = 64 \pi^2 a^5$$

откуда

$$P = 64 \pi^2 a^5 \gamma$$

Здесь P выражено в кг/см², a в метрах.

Так например при $a = 0,2$ м, $P = 0,02$ кг/см². Следовательно кавита отрывается при незначительной разности сил давления. Сила необходимая для отрыва кавиты от контура лопасти зависит от расстояния от выходной кромки до точки отрыва. Чем дальше точка отрыва кавиты от выходной кромки, тем большая разность давления нужна для отрыва кавиты от контура лопасти. Следовательно, наличие отрыва потока от лопасти является предпосылкой для разрушения поверхности лопасти при весьма незначительном статическом давлении на кавиту. Это разрушение может наступить при очень малой скорости течения в застойной зоне, если не обеспечено безотрывное обтекание. Таким образом, наличие отрывного течения создает условие для кавитационного разрушения даже при незначительной скорости течения и статическом давлении в текущей жидкости. Резюмируя изложенное, надо отметить следующее.

Кавитационное разрушение в рабочем колесе гидротурбины является следствием отрыва струй от поверхности проточной части, по-

этому состояние этой поверхности играет весьма существенную роль в развитии кавитации. Наличие малейшей неровности на поверхности проточной части рабочего колеса может привести к местному отрыву потока, что и может служить обстоятельством, способствующим возникновению кавитации. Это обстоятельство предъявляет весьма высокое требование к качеству обработки поверхности каналов рабочего колеса.

Отрывную кавитацию можно уменьшить утопением пограничного слоя. Этого можно достигнуть, например, устройством щели в рабочем колесе гидротурбины со стороны повышенного давления.

НИИКС СХХ Армянской ССР

Поступило 9.V.1962г.

Ա. Ա. ԱՎԵՏԻՈՒՂ

ԿԱՎԻՏԱՅԻ ՇԱՐԻՄԱՆ ՀԵՏԱԴԻՄՐ ԸՆԿՆԱՏՎՈՂ ՇՐՋԱՀՈՍՄԱՆ ԿԵՊՔՈՒՄ

Ա. մ փ ո փ ո մ

Հղիանյութային և կապիտացիոն մաշվածքների վերլուծությունից սրտշվում է կապիտացիոն բաշքայումների տեղամասը՝ որպես կանդառածության գոտի, որտեղ բացակայում են մաշումների դժերը, իսկ այդ կանդառածության գոտու առջևում մշակումների դժերը ցույց են տալիս հեղուկի ընդհատվող հոսքի ներկայությունը: Մաշվածքների դժերը, որոնք սկսվում են փոսիկներից առաջ բանվորական անիվի անվաճեցի վրա՝ թիակի կցվանքի դժի մոտ վերին անվաճեցի նկատմամբ, ուղղված են հոսանքին հակառակ: Կրանցից հետո մաշվածքների դժերը ձուլվելով հետևում են հոսանքին՝ կազմելով կանդառածության գոտու հոսանքի սահմանագիծ:

Պոկման կետի ետևում, բնդհատվող շրջահոսման մասին գոյություն ունեցող պատկերացումները համաձայն, մասնիկների արագությունների ուղղությունների (որոնք շարժվում են անմիջականորեն մոտիկ մարմնի կոնտուրին) ուղղված են հիմնական հոսքին հակառակ, միայն սրանով կարելի է բացատրել մաշվածքների դժերի յուրահատուկ կորուսյունը բանվորական անիվի վերին անվաճեցի մակերևույթի վրա:

Տեսական ճանապարհով ստացված բանաձևը ցույց է տալիս, որ կապիտացի պոկումը սեղի է ունենում համեմատաբար փոքր արագությամբ: Սա շատ կարևոր է, քանի որ կանդառածության գոտին, որտեղ կապիտաները խտանում են մինչև պոկումը, բնորոշվում է հեղուկ մասնիկների փոքր արագությամբ: Ստացվել է նաև բանաձև, որի օգնությամբ որոշվում են այն ուժերի մեծությունները, որոնք հարկավոր են կապիտան պոկելու համար: Ինչպես սպասվում էր, կապիտան պոկվում է ճնշման աննշան տարրերությունից:

Ստացված բանաձևերը ցույց են տալիս, որ թիակի մակերևույթի քայքայումը, որը տեղի է ունենում կապիտացի պոկումից, կարող է առաջ գալ կանդառածության գոտում՝ հոսքի փոքր արագության զնայքում, եթե ապահովված չէ շրջահոսումը՝ առանց պոկումների:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Аветисян С. С.* Износы, как следы линий тока в каналах рабочего колеса гидротурбины. «Известия АН Армянской ССР». № 5. 1955.
2. *Вознесенский И. И.* Уравнение гидродинамики и конструкция водяных турбин. Труды ЛПИИ № 2. 1948.
3. *Daily I. W.* Cavitation Characteristics and Infinite-Ration Characteristics of a Hydrofoil section. Transactions of the ASME № 3. 1949.
4. *Жуковский Н. Е.* Избранные произведения т. т. I, II. 1948.
5. *Knapp R. T.* Cavitation mechanics and its Relation of the Design of Hydraulic Equipment. The Institution of Mechanical Engineers № 2. 1952.
6. *Лойцянский Л. Г.* Аэродинамика пограничного слоя. М., 1941.
7. *Шальнев К. К.* Структура и область кавитации. «Известия АН СССР», № 5. 1954.
8. *Шальнев К. К.* Кавитация щитовых пазов. «Известия АН СССР», № 2. 1962.
9. *Козырев С. П.* Кавитация в гидрообразном потоке и кавитационно абразивное изнашивание. «Известия АН СССР», № 2. 1962.
10. *Тер-Акопян Г. Д.* Суперкавитирующие гидротурбины. «Известия АН Армянской ССР» (сер. Т. Н.), т. XIV, № 4. 1961.