

ГИДРОТУРБИНЫ

С. С. Аветисов

Износы, как следы линий тока в каналах рабочего колеса гидротурбины

Предисловие

Существующие методы расчетов рабочего колеса гидротурбины и техника экспериментирования не дают удовлетворительного решения задачи по определению скоростей и давлений в отдельных точках колеса и мало раскрывают внутреннее содержание тех явлений, которые происходят в потоке жидкости при прохождении через каналы рабочего колеса турбины.

Многочисленные опытные данные, имеющиеся по ГЭС, износы и кавитационные разъедания поверхности каналов рабочего колеса до настоящего времени не сопоставлены с существующей вполне развитой теорией профиля. До последнего времени эти износы не рассматривались как явления, которые поддаются строгому расчету.

В данной работе рассматривается вопрос воспроизведения линий тока через износы на поверхности каналов рабочего колеса турбины. С этой целью используется существующая теория профиля и полученные по ней результаты сопоставляются с износами рабочих колес турбин одной из гидроэлектростанций Армянской ССР, находившихся длительный срок в эксплуатации.

Чтобы определить, какие возникают силы на лопасти рабочего колеса при ее обтекании потоком жидкости, необходимо выяснить характер обтекающего потока и какие происходят явления в потоке при вращении турбины. Величина и направление равнодействующей гидродинамических сил, действующих на лопасть согласно теории профиля, зависит от структуры пограничного слоя и величины циркуляции потока вокруг лопасти. При этом характер пограничного слоя в значительной степени влияет на качественную картину потока и на величину циркуляции жидкости в каналах гидротурбины.

Структура пограничного слоя в каналах гидротурбины является более сложной, чем при обтекании потоком единичной лопасти.

Особенность пограничного слоя в данном случае обусловлена близким расположением лопастей решетки. Эта особенность усугубляется конечной длиной этих лопастей, т. е. наличием ободьев рабочего колеса. Канал колеса гидротурбины ограничен одной вогнутой и

другой выпуклой стенками лопасти, а также поверхностями верхнего и нижнего ободьев.

Градиент давления вдоль канала рабочего колеса должен определить структуру пограничного слоя. При наличии структуры пограничного слоя можно сделать некоторые предположения о картине потока в каналах гидротурбины.

Анализ износов

В течение периода эксплуатации турбина с исследуемым рабочим колесом работала при разных режимах, т. е. при различных открытиях направляющего аппарата.

Как известно, с изменением открытия направляющего аппарата меняется не только расход воды, но и направление потока, причем с увеличением открытий направляющего аппарата угол атаки уменьшается.

Этот угол меняется в пределах $0^\circ - 12^\circ$.

При этих углах атаки пограничный слой на профиле как по структуре, так и по длине ламинарного участка более устойчивый. Но при этих углах атаки, как и при всяких других, довольно значительно изменяются положения точек отрыва пограничного слоя выпуклого контура лопасти.

Как это следует из теории профиля в пределах рассматриваемых углов атаки, направления линий тока вдоль выпуклого и вогнутого контура лопасти в области ламинарного пограничного слоя на участке до точки отрыва от контура почти не отличаются друг от друга. Эта особенность обтекания лопасти значительно облегчает анализ износов. На основании этого направления линий износов на участке ламинарного пограничного слоя вполне точно будут определять направления линий тока вдоль выпуклого и вогнутого контуров лопасти.

С другой стороны, так как точка отрыва линий тока от выпуклого контура лопасти в области турбулентного пограничного слоя для каждого угла атаки разная, то положения точек отхода линий износов от контура будут обусловлены открытиями направляющего аппарата, что принято за основу при анализе вопроса о расположении и месте образования кавитационных износов.

Как было отмечено выше, изученные износы были вызваны работой турбины на разных режимах. Поэтому они отражают картину, являющуюся результатом наложения друг на друга полей скоростей различных потоков. Обычно в результате наложения полей скоростей разных потоков получаем сетку, которая мало препятствует выявлению характера линий тока отдельных потоков. Износы, соответствующие неосновным режимам работы турбины, только затемняют картину, но не исключают возможность анализа износов. Так как кривизны линий тока в области ламинарного пограничного слоя для разных основных режимов незначительно отличаются друг от друга, то можно утверждать, что обнаруженные на поверхности каналов рабочего колеса износы являются следами линии тока.

Интенсивность износов рабочего колеса в общем случае зависит от количества часов, проработанных агрегатом. При сопоставлении износов различных рабочих колес, проработавших разное количество часов, было установлено, что на поверхности каналов рабочего колеса, проработавшего незначительное время, линии износов выражены менее отчетливо. Но интенсивность износов как отдельных каналов одного и того же рабочего колеса, так и отдельных участков одного и того же канала не объясняется только количеством часов, проработанных агрегатом. Если бы существовала простая зависимость износов от количества проработанных часов, то интенсивность износов вдоль выпуклого и вогнутого контуров была бы одна и та же, чего мы не замечаем в действительности. Отсутствие прямой связи между количеством часов, проработанных агрегатом, и интенсивностью износов наиболее наглядно выражено в разрушениях, вызванных кавитационными износами, которые разны не только для различных лопастей одного и того же рабочего колеса, но и для отдельных участков выпуклого контура одной и той же лопасти. Поэтому правильнее будет объяснить интенсивность износов условиями течения жидкости в каналах рабочего колеса. Это предположение использовано автором при анализе износов. Согласно теории, критерий возникновения кавитации определяется из условия существующего в потоке минимального давления, которое возникает на контуре лопасти при обтекании ее жидкостью. Минимальное давление для профилей получается в точках выпуклого контура, и эта величина определяет коэффициент подъемной силы лопасти. Следовательно, как параметр кавитации, так и коэффициент подъемной силы зависят от минимального давления, создаваемого профилем. При этом величина подъемной силы прямо пропорциональна разности статического давления на вогнутом и выпуклом контурах лопасти, а коэффициент кавитации $\sigma = \frac{P_0 - P_k}{\rho v^2}$ прямо пропорциона-

лен разности между минимальным статическим давлением на контуре лопасти и давлением насыщения. Так как характерной величиной, от которой зависит как подъемная сила, так и интенсивность кавитации, является минимальное давление, возникающее в обтекающем профиль потоке, то можно утверждать, что интенсивность кавитации у той или иной лопасти одного и того же колеса в основном определяется величиной подъемной силы, действующей на соответствующую лопасть. С другой стороны, кавитационные износы на поверхности лопасти сконцентрированы в области развитого турбулентного пограничного слоя, область распространения которого в значительной степени зависит от угла атаки. Угол атаки потока, как будет видно далее, зависит не только от открытия направляющего аппарата, но и от угла заделки лопасти рабочего колеса. Кроме того, углы атаки различных лопастей одного и того же рабочего колеса, вследствие производственных допусков, разные. При этом и подъемная сила, пропорциональная углу

атаки, и кавитация, косвенно зависящая, для одной и той же серии профилей, от угла атаки, будет разной для различных лопастей. Следовательно, при анализе износов мы можем и должны рассматривать кавитационные износы во взаимосвязи с подъемной силой лопасти.

Согласно теории кавитации, вторая фаза кавитации, т. е. разрушение кавит, происходит в области положительного градиента давления. Поэтому износы поверхности каналов рабочего колеса в пределах ламинарного пограничного слоя в области отрицательного градиента давления уже нужно отнести к эрозии поверхности, вызванной воздействием механических примесей песчаных потоком.

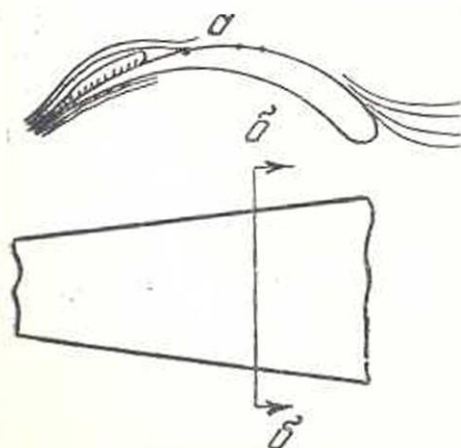
Механические примеси можно разделить на две группы; первая — это песок крупных фракций, который оставляет грубые беспорядочно расположенные задирины на поверхности лопасти. Вторая — это мелкий песок, который, находясь во взвешенном состоянии, перемещается с жидкостью, причем это движение подчиняется законам движения жидкости. Мелкий песок, перемещаясь вместе с потоком в области, граничащей с ламинарным пограничным слоем, оставляет на лопасти следы, которые определяют собой положение линии тока.

Износы поверхности каналов рабочего колеса турбины

Износы видны по всей поверхности как с выпуклой, так и с вогнутой стороны лопасти. Приведенные в статье снимки обнаруживают разрушение поверхности канала рабочего колеса, вызванное истиранием песком (абразивное действие), а также кавитацией. Учитывая то обстоятельство, что поток, проходящий через рабочее колесо, содержит примесь песка, то при долгой работе турбины поверхности ее лопастей изнашиваются (истираются) и характер износа определяется траекториями движения жидких частичек.

Кавитационные износы концентрируются в зоне наибольшей ширины лопасти, т. е. максимальной хорды (фиг. 2). Эти износы начинаются за точкой a перегиба выпуклого контура лопасти (фиг. 1), где имеется минимальное давление,

Сечение $\delta-\delta$



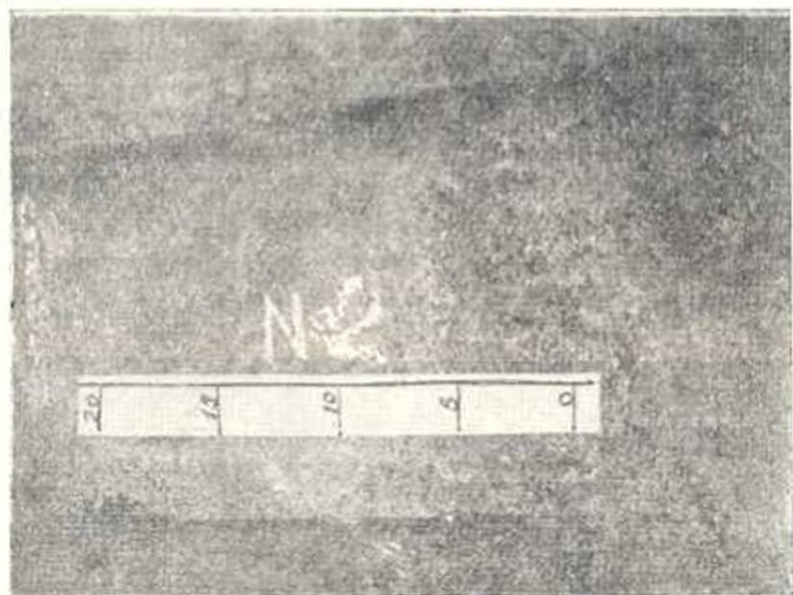
а, следовательно, максимальная скорость.

Изучение износов лопастей рабочего колеса показывает, что поверхность лопастей разрушается неравномерно. Из приводимых фотографий износов следует, что разрушения поверхности выпуклого контура лопасти от кавитации образуют канавки, которые расположены параллельно как друг другу, так

Фиг. 1. Линии тока у входной и выходной и выходной кромке лопасти (фиг. 2).
кромки лопасти.

В промежутках между указанными канавками поверхность лопасти разбита весьма незначительно. На фиг. 2, 3, 5 места разрушений получились темными, а менее разрушенные поверхности более светлые и близки по цвету к поверхности лопасти.

На фиг. 2 и 3 представлен выпуклый контур лопасти со стороны выходного сечения канала. В верхней части фото видна выходная кромка смежной лопасти.



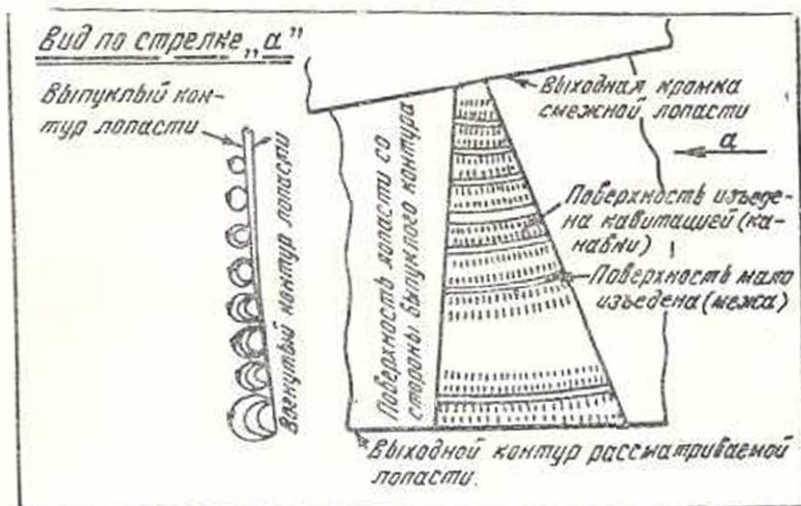
Фиг. 2. Износы на выпуклом контуре лопасти.

Длина канавок, образованных кавитационными износами, различна в различных частях выпуклого контура лопасти. Самая длинная канавка расположена непосредственно вдоль выходной кромки лопасти. Длина канавок сходит на нет вблизи линии минимального давления на выпуклом контуре лопасти. (фиг. 2а)*.

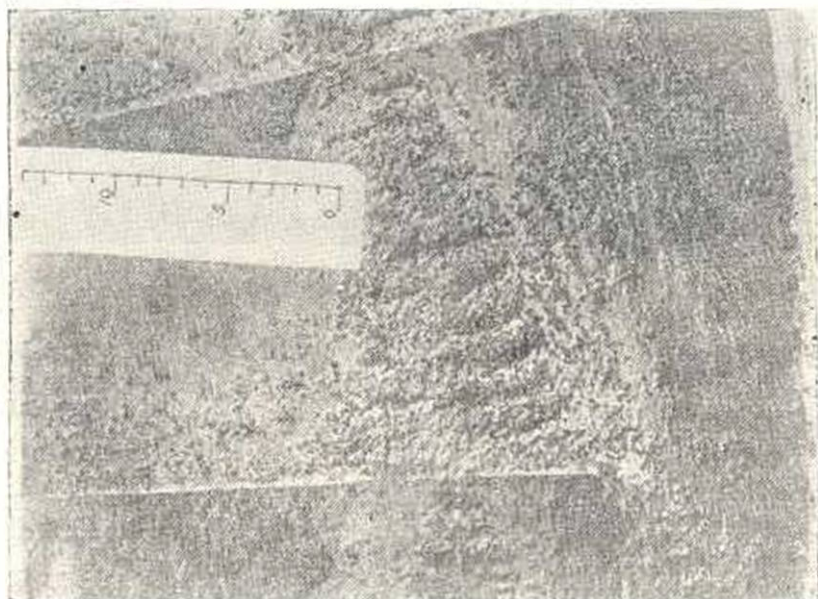
Область кавитационных износов выпуклой поверхности лопасти можно ограничить двумя лучами. Эти лучи имеют разный наклон по отношению к выходной кромке лопасти. Из фотографий видно, что интенсивность износов увеличивается по мере приближения к внешнему ободу. Ширина лопасти вблизи внешнего обода больше, чем у внутреннего, следовательно, интенсивность распространения износов зависит от уширения лопасти.

Канавки отличаются друг от друга также по глубине. Наиболее глубокие канавки наблюдаются у выходной кромки лопасти; глубина достигает 3—4 мм. Наиболее мелкие канавки расположены вблизи

* На фигурах, которые обозначены цифрой с буквой, воспроизведены линии тока по износам поверхности каналов рабочего колеса. Цифра указывает на фотографию, которая отражает износы, показанные на данной фигуре линиями тока.



Фиг. 2а. Область и структура кавитационных износов, изображенных на фиг. 2.



Фиг. 3. Выпуклый контур лопасти с более выраженными канавками, образованными кавитационными износами.

точки минимального давления, на выпуклом контуре, и имеют глубину порядка 1—1,5 мм.

Более интенсивно срабатывается выходная кромка лопасти.

Снимок, представленный на фиг. 4, сделан со стороны выхода потока и изображает выпуклые контуры лопастей. На снимке весьма отчетливо видно, что интенсивность кавитационных износов для различных лопастей различна, но характер и область, охваченная этими износами, для всех лопастей одни и те же.



Фиг. 4. Неравномерность кавитационных износов лопасти рабочего колеса.

На фиг. 5 представлен снимок лопасти со значительным кавитационным износом поверхности.

Изучение кавитационных износов показывает, что:

1) кавитационные износы охватывают не всю поверхность лопасти:



Фиг. 5. Интенсивный кавитационный износ лопасти.

- 2) поверхность, охваченная кавитационными износами, разрушается не сплошь, а полосками;
- 3) наиболее интенсивное разрушение от кавитационных износов

наблюдается на выпуклом контуре лопасти, вблизи внешнего обода рабочего колеса;

4) на поверхности внешнего обода кавитационные износы расположены в гидродинамическом следе лопасти и вытянуты по направлению движения потока, т. е. в той зоне, где, по теории профиля, поток, срываясь с выходной кромки лопасти, испытывает разрыв сплошности и где образуется область завихренного потока (фиг. 4);

5) в местах стыка лопасти с верхним и нижним ободами рабочего колеса сосредоточены кавитационные износы, интенсивность которых различна для различных лопастей.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее интенсивные кавитационные износы поверхности лопасти сосредоточены в области, где возможен срыв струи с обтекаемого контура.

2. Кавитационные износы расположены в определенной последовательности (фиг. 2—5), что должно подчиняться строгому математическому анализу.

Структура пограничного слоя в области максимального кавитационного износа

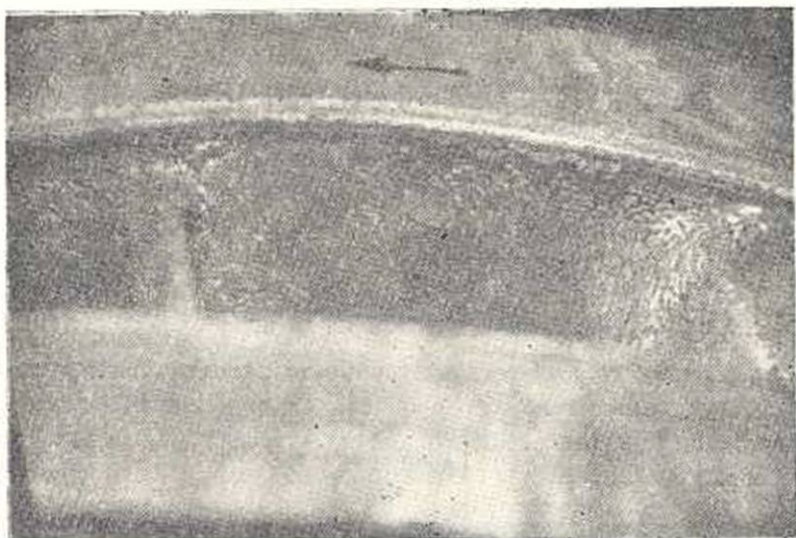
Линии тока при выходе из направляющего аппарата на конечном расстоянии до встречи потока с лопастью имеют одно и то же направление. Передняя кромка лопасти служит линией раздела потока, после которого жидкость направляется на выпуклый и вогнутый контуры лопасти. Ввиду наличия циркуляции потока максимальная скорость жидкости должна быть в точке a выпуклого контура лопасти (фиг. 1). При этом жидкость, обтекающая выпуклый контур лопасти, за точкой минимума давления движется с отрицательным ускорением и имеет минимальную скорость в какой-то точке данного контура.

Согласно теории профиля, поток, обтекающий выпуклый контур лопасти, после своего деления перемещается до точки a (фиг. 1) с положительным ускорением и максимальная скорость v достигается в точке a . За точкой a по направлению к выходной кромке лопасти скорость жидкости начинает падать.

Поверхности нижнего и верхнего ободьев рабочего колеса с износами рассматриваем как сечение потока. Мы вправе это сделать, так как структура обтекающего лопасть потока вблизи граничных поверхностей (ободья рабочего колеса) определяется в основном наличием лопасти в потоке. Следовательно, эрозионные износы на поверхности верхнего и нижнего ободьев можно рассматривать как следы обтекающего потока.

Из анализа износов на поверхности верхнего и нижнего ободьев можно заметить деление потока (фиг. 6).

На фиг. 6 представлены износы на поверхности верхнего обода рабочего колеса. Серая кольцевая полоса, на которой стрелкой пока-



Фиг. 6. Износы у входной кромки лопасти.

зано направление вращения рабочего колеса, является внешней поверхностью верхнего обода. Нижняя сплошная серая полоса является нижним ободом рабочего колеса. Между этими двумя кольцевыми полосами на снимке видна нижняя поверхность верхнего обода и входная кромка лопасти. Рассматривая износы на поверхности обода, при входе потока в канал рабочего колеса, как следы линий тока, нетрудно заметить, что линии тока вдоль выпуклого контура обтекают переднюю кромку лопасти.

На основании фотографий на фиг. 1 схематически показаны линии тока.

На поверхности ободьев линии износов впереди лопасти расположены под одним и тем же углом относительно хорды лопасти. Такое расположение линий износов подтверждает то положение, что углы всех линий тока при входе потока в канал рабочего колеса, на конечном расстоянии до встречи с передней кромкой лопасти одинаковы. Линии износов вдоль выпуклого контура по мере удаления от передней кромки лопасти сгущаются, что равносильно сгущению линий тока. Такое сгущение линий тока, согласно теории профиля, создает ускоренное движение во внешнем, прилегающем к пограничному слою, потоке, что соответственно приводит к падению градиента давления потока в направлении движения. Максимальное сгущение линий износов вдоль выпуклого контура лопасти наблюдается вблизи максимальной кривизны ее контура.

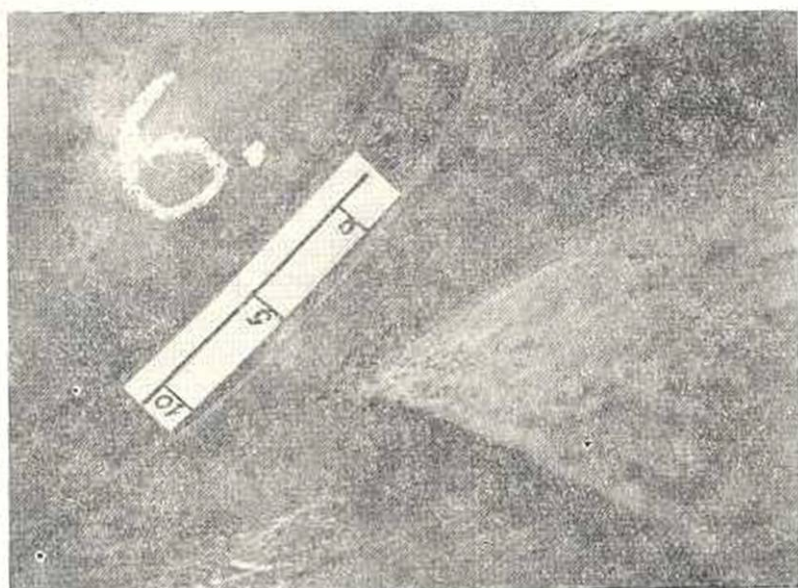
Линии износов вдоль вогнутого контура резко отличаются от линий износов вдоль выпуклого контура лопасти. Из теории профиля известно, что статическое давление на вогнутом контуре значительно больше статического давления невозмущенного потока, обтекаю-

щего лопасть до входа в канал, а большему давлению соответствует меньшая скорость. Надо полагать, что этим обстоятельством объясняется резкое отличие в интенсивности и характере линий износов вдоль выпуклого и вогнутого контуров лопасти. Линии износов вдоль вогнутого контура, в отличие от линий износов вдоль выпуклого контура, значительно реже расположены и менее резко выражены.

Таким образом, анализ износов вдоль выпуклого и вогнутого контуров при входе потока в канал рабочего колеса дает возможность установить наличие несимметричности в потоке, обтекающем лопасть.

Линии износов при выходе потока из каналов рабочего колеса

Наличие циркуляции жидкости вокруг лопасти накладывает определенные условия на характер обтекания профиля и износы на выходе потока из каналов рабочего колеса. На фиг. 7 видны износы на выходе из каналов рабочего колеса.

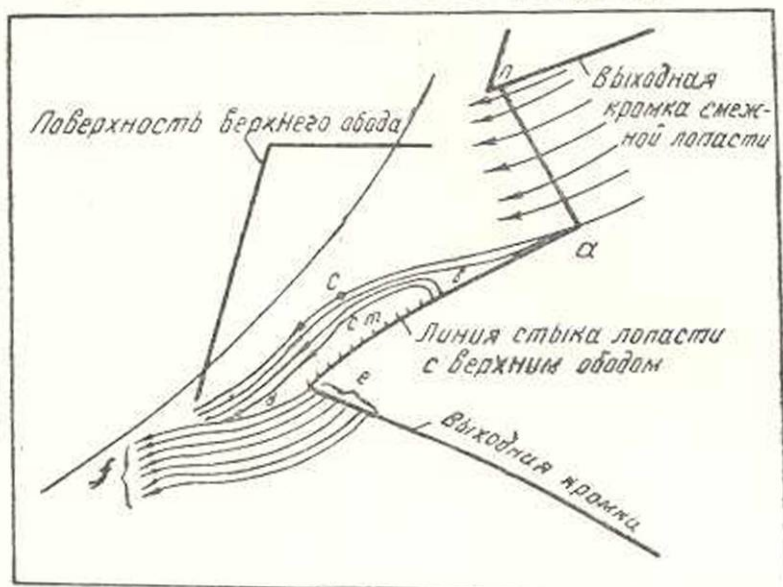


Фиг. 7. Износы у выходной кромки лопасти.

Чтобы установить характер обтекающего потока, необходимо воспроизвести линии тока по износам.

До точки *a* (фиг. 7а) на выпуклом контуре лопасти линии износов как по направлению, так и по интенсивности мало отличаются друг от друга. Иную картину мы наблюдаем за точкой *a*. Линии износов, не доходя на некоторое расстояние до выходной кромки, начинают отходить от выпуклого контура лопасти. Кривизна линий износов возрастает по мере приближения к выходной кромке лопасти. Кривизна линий износов достигает максимума в точке *c*. Затем до точки *d* следует уменьшение кривизны.

На участке между a и b износы вблизи стыка лопасти с ободом менее отчетливо выражены и нерегулярно расположены. Это обстоятельство можно объяснить нарушением ламинарности течения. В точке b линии износов заметно отходят от выпуклого контура лопасти. Вначале они направлены против движения жидкости, затем перегибаются и направляются вдоль потока $a-c-d$ (фиг. 7а).



Фиг. 7а. Линии тока на выходе потока из канала рабочего колеса, восстановленные по износам, изображенным на фиг. 6.

Пересечения линий износов, идущих от точек a и b , не наблюдается. Между линией износа $a-c'-d$ и выпуклым контуром лопасти (область Π) имеются явные следы кавитации (на фиг. 7а эта часть контура лопасти заштрихована).

По картине износов можно прийти к заключению, что линия износов вдоль вогнутого контура лопасти (фиг. 7а) у места выхода потока из каналов становится более четкой.

Эти следы наиболее ясно видны в той части области вогнутого контура, которая расположена на некотором расстоянии от выхода из каналов. До этого места нет четких следов износов. Линии износов $e-f$ вырисовываются по мере приближения к выходной кромке лопасти. Затем вдоль течения эти линии износов сгущаются. Такое явление можно объяснить тем обстоятельством, что жидкость начинает двигаться ускоренно вследствие выравнивания давления, которое, как установлено в теории профилей, наступает значительно раньше, чем разделившийся поток достигает выходной кромки лопасти.

Поток, как это видно по кривизне линий износов, по выходе из канала отклоняется в сторону выпуклого контура, что отчетливо выражено на фотографии износов (фиг. 7). Отклонение потока в сторону выпуклого контура можно объяснить тем теоретическим положением, согласно которому ускорение частичек жидкости, сходящих с

Известия VIII, № 5-7

вогнутого контура у выходной кромки, обуславливает искривление линий тока в сторону меньшего давления. Это хорошо подтверждается кривизной линий износов $e-f$ (фиг. 7а).

Линии износов на выпуклой и вогнутой сторонах лопасти у выходного сечения расположены друг от друга на достаточно большом расстоянии и соединяются в точке d , в некотором удалении от выходной кромки. Эта картина отражает движение потока.

Между двумя группами износов, начинающихся на вогнутой и выпуклой сторонах, вблизи выходной кромки лопасти, существует область, где износы расположены бессистемно. Эта область является зоной между двумя потоками. Линии износов на некотором расстоянии за выходной кромкой сближаются. За точкой d (фиг. 7) как кривизна, так и направление этих линий износов напоминают линии износов при входе потока в каналы.

Последнее обстоятельство вполне подтверждает существующее в теории профиля представление о движении жидкости при обтекании лопасти. Теория утверждает, что воздействие лопасти на поток практически прекращается на конечном расстоянии от выходной кромки лопасти.

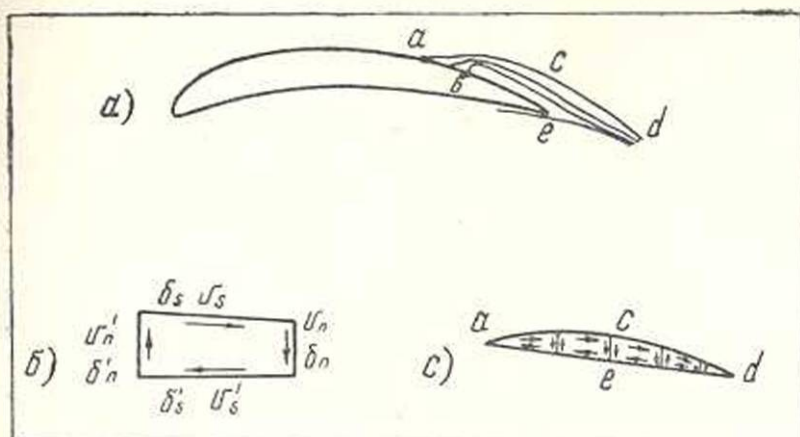
Таким образом, в результате анализа износов можно установить следующее положение. До линии $n-a$ (фиг. 7а) осредненные векторы скоростей совпадают с направлением касательной к средней линии канала. На этом же участке канала линии износов плотно прилегают к выпуклому контуру лопасти. Начиная от точки a , линии износов отходят от выпуклого контура лопасти.

Относительная протяженность ламинарного, переходного и турбулентного пограничного слоев и положение места отрыва (если отрыв происходит) зависят от формы профиля, от угла атаки, от числа Рейнольдса, от шероховатости поверхности и от турбулентности основного потока.

В теории профиля отрыв турбулентного пограничного слоя характеризуется условием, что в этой точке производная от составляющей продольной скорости по нормали к контуру равна нулю: $\frac{\partial v_x}{\partial y} = 0$.

За точкой отрыва производная $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ есть величина отрицательная, т. е. скорость частиц, движущихся в непосредственной близости к контуру тела, направлена против основного потока. Это видно из износов, показанных на фиг. 7 и 7а, где линии износов в точке b вначале направлены против движения жидкости.

Рассмотрим элемент области m (фиг. 7а), ограниченный контуром лопасти длиной δ'_s и толщиной слоя δ_n (фиг. 8). Пусть δ'_s — элемент выпуклого контура лопасти, δ_n — элемент нормали к некоторой средней линии области, v_s и v_n — абсолютные значения скорости на



Фиг. 8. Возникновение поверхности раздела у выходной кромки лопасти, установленное по износам, изображенным на фиг. 7.

обеих сторонах выделенного элемента, а v_n и v'_n — скорости вдоль нормалей. Циркуляция по замкнутому контуру будет равна:

$$\Gamma = \delta_s v_s + \delta_n v_n + \delta'_s v'_s + \delta'_n v'_n. \quad (1)$$

Так как скорости v_n на смежных гранях двух элементов области равны по величине и противоположно направлены, то суммарная циркуляция, при суммировании циркуляций элементов, на которые разбита область m , ограниченная контуром $b-c-d$ (фиг. 7а), вдоль нормалей будет равна нулю. Тогда циркуляция по замкнутому контуру m будет равна

$$\Gamma = \delta_s v_s + \delta'_s v'_s. \quad (2)$$

Таким образом, обтекание потоком лопасти со срывом струй, приведенное на фиг. 7, если рассматривать линии износов как следы линий тока, возможно при наличии вихревого слоя в области с полностью развитой турбулентностью.

Наибольший угол атак при одном и том же числе оборотов соответствует наименьшему открытию. Следовательно, точка отрыва линий токов перемещается ближе к передней кромке. С увеличением открытия угол наклона потока к лопасти уменьшается, и область m (фиг. 7), в которой возможно формирование вихря, перемещается ближе к выходной кромке.

В таблице 1 приведены часы работы турбины за весь период ее эксплуатации при разных режимах.

Таблица 1

Открытые	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Работа в часах	1385	1311	1439	4051	10801	7168	4580	1610
$B \text{ } \frac{\%}{\%}$	4,3	4,0	4,4	12,6	33,4	22,2	14,2	4,9

Из этих данных видно, что изучаемое рабочее колесо работало при 8 режимах.

Фотографии износов (фиг. 2 и 3) показывают, что число канавок, образованных кавитационными износами такого же порядка, как и число режимов работы турбины (на фото канавки заметны в виде черных полос, расположенных вдоль лопасти). Между второй сверху канавкой и третьей существует широкая полоса более равномерного и сплошного разрушения поверхности лопасти.

Такое совпадение числа режимов работы агрегата и канавок, вызванных кавитационным разрушением, нельзя считать случайностью, так как это совпадение наблюдается на всех колесах.

Так как малым открытиям соответствует большой угол наклона потока к хорде лопасти, то срыв струй должен происходить вблизи точки перегиба выпуклого контура лопасти (точка *a*, фиг. 7а). Иначе говоря, режиму малых открытий будут соответствовать канавки, расположенные вблизи точки минимального давления на выпуклом контуре лопасти. На фотографиях износов (фиг. 2 и 3) эти канавки видны в верхней части снимка.

Интенсивность износов рабочего колеса в общем случае зависит от количества часов, проработанных турбиной. Но интенсивность износов одной и той же лопасти не объясняется только количеством часов, проработанных турбиной на данном режиме. Если бы существовала простая зависимость между количеством проработанных часов и интенсивностью износов, то интенсивность износа в пределах пятой канавки (считая сверху) должна быть больше, чем интенсивность в пределах третьей канавки, так как количество часов, проработанных турбиной на пятом режиме, почти в 7 раз больше, чем на третьем. На фотографии износов (фиг. 2, 3) мы видим другую картину, т. е. интенсивность износов при работе турбины на третьем режиме значительно больше интенсивности износов при работе турбины на пятом режиме.

Если канавки, образованные кавитационными износами и расположенные на тыльной стороне лопасти, по ее длине, объяснить образованием вихрей в результате турбулентного пограничного слоя, то можно притти к системе вихревых нитей, как это показано на фиг. 2а.

Однако эти вихревые нити возникают не одновременно, а каждому открытию может соответствовать только одна вихревая нить.

На фиг. 2а представлены все вихревые нити, каждая из которых соответствует определенному открытию направляющего аппарата.

Характер износов и проведенный анализ на основании теории профиля, а также характер канавок и область образования кавитационных износов, позволяют установить связь между явлениями вихреобразования и кавитации.

Выводы

В данной работе изучены износы поверхности каналов рабочего колеса и даны, на основании существующей теории профиля, следующие качественные характеристики этих износов.

1. Исследования кавитационных разрушений лопасти рабочего колеса показывают, что повреждается кавитацией та часть поверхности лопасти, которая обтекается потоком со срывом, т. е. которая граничит с местом отрыва пограничного слоя, возникающим обычно в вихревых течениях в области выходной кромки лопасти. Отсюда следует, что для того, чтобы заранее определить область кавитационного разрушения, необходимо рассчитать отрыв пограничного слоя в проточной части исследуемого рабочего колеса.

2. Точки отрыва струй от выпуклого контура лопасти в области турбулентного пограничного слоя для каждого угла атаки разные и их положение зависит от открытия направляющего аппарата.

3. Интенсивность износов рабочего колеса в общем случае зависит от количества часов, проработанных турбиной, но отсутствует прямая связь между количеством часов, проработанных турбиной, и интенсивностью износов, что хорошо подтверждается разрушениями, вызванными кавитационными явлениями, различными для разных лопастей одного и того же колеса. Интенсивность как эрозийных, так и кавитационных износов объясняется гидродинамикой потока.

4. Так как интенсивность и характер износов разных частей канала рабочего колеса определяется в основном гидродинамикой потока, то и о величине подъемной силы лопасти можно будет судить по интенсивности износов.

5. Износы поверхности каналов рабочего колеса в пределах ламинарного пограничного слоя в области отрицательного градиента давления можно рассматривать как эрозию поверхности, вызванную механической примесью воды во взвешенном состоянии.

6. Интенсивность износов связана с силами, которые возникают на лопастях рабочего колеса, поэтому неравномерность износов разных лопастей должна определяться гидродинамической неуравновешенностью рабочего колеса, что приводит также к вибрации агрегата, как и кавитация.

Анализ износов рабочих колес дает возможность определить кинематику движения жидкости в решетке профилей. Эта задача большая, и разрешение ее требует дальнейших опытных и теоретических исследований.

Последующие работы по исследованию износов эксплуатируемых агрегатов должны вестись с целью:

1. Определения условий гидродинамической уравновешенности колеса, исходя из интенсивности кавитационных износов на выпуклом контуре лопасти.

Как было отмечено, при анализе износов нельзя сделать коли-

качественных выводов, но можно, на основании качественной характеристики явлений, подойти к вопросу вибрации агрегата и дать производству определенные рекомендации.

2. Определения тех открытий, при которых наиболее неуравновешенно работает агрегат, по интенсивности износов канавок отдельных лопастей, так как каждому открытию направляющего аппарата соответствует определенная линия отрыва пограничного слоя. На этом основании можно рекомендовать режимы, при которых работа турбины будет наиболее устойчивой.

Анализ износов представляет также теоретический интерес в смысле определения структуры потока в каналах рабочего колеса турбины.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 31 I 1955

Ս. Ս. Ավետիսով

ՀԻԳՐՈՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐԻ ՍՇԽԱՏՈՂ ԱՆԻՎՆԵՐԻ ԿԱՆԱԼՆԵՐԻ ՄԱՇՎԱԾՔՆԵՐԸ ՈՐՊԵՍ ՇՈՍՔԻ ԳԾԵՐԻ ՇԵՏՔԵՐ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ձևայած որ հիդրոտուրբինների աշխատող անիվների թիակների և միջթիակային տարածությունների պատերի վրա առաջացող կավիտացիոն քայքայումների և այլ մաշվածությունների վերաբերյալ կան մի շարք փորձնական տվյալներ, այնուամենայնիվ դրանք մինչև այժմ չեն համեմատվել գոյություն ունեցող թեորիայի հետ և տեսականորեն չի բացահայտվել էրոզիայի առաջացման պատճառները:

Հոգվածում քննարկվում է հոսքի գծերի վերականգնման հարցը, որպես հիմք ընդունելով աշխատող անիվի թիակների վրա եղած մաշվածությունների հետքերը:

Անիվի թիակների հաշվման տեսությունից ստացված արդյունքները համեմատվում են Հայկական ՍՍՌ-ում երկար տարիների ընթացքում չահագործվող հիդրոկայաններից մեկի տուրբինի աշխատող անիվի թիակների վրա եղած մաշվածության տեսքի հետ:

Այդ համեմատությունից երևում է, որ թիակի վերջավոր մասերում, որ հոսանքի եզրային շերտը պոկվում է թիակից, առաջանում են կավիտացիոն քայքայումներ, իսկ սկզբնական մասերում և ճնշման կողմում, ուր հոսանքի եզրային շերտը թիակից չի պոկվում, առաջանում են դժավոր մաշվածքներ: Այդ մաշվածքներն արդյունք են հոսող հեղուկի հոսքի գծերի կայունություն և նրանց մեջ եղած մանրահատիկ բերվածքների, որոնք մաշում են թիակը քստ իրենց շարժման հետագծի:

Կավիտացիոն քայքայումները, ինչպես նաև հոսքի գծերից առաջացած մաշվածքների ինտենսիվությունը, զնայած կախված են տուրբինի աշխատած ժամերի թվից, քայքայ և այնպես միևնույն անիվի տարբեր

թիակների մաշվածությունները տարբեր են: Այդ րացատրվում է նրանով, որ ամենձին թիակների վրա ազդող հիդրոդինամիկ ուժերն իրենց մեծությամբ տարբերվում են:

Հիդրոդինամիկ ուժերի այդ տարբերության պատճառով ազդեցաբար աշխատելիս ունենում է ցնցումներ, որոնց վերացման համար անհրաժեշտ են լրացուցիչ հետազոտություններ: