

ГИДРОТУРБИНЫ

Е. И. Тараян

**Кавитационная эрозия деталей сверхвысоко-
напорной радиально-осевой гидротурбины**

В связи с аварией с импортной турбиной, имевшей место в ноябре месяце 1953 года на одной из гидростанций в Армении, нижняя крышка, рабочее колесо и лопатки направляющего аппарата турбины были демонтированы.

При этом обнаружилось, что нижняя крышка и лопатки направляющего аппарата турбины подверглись поверхностному разьедаванию, которое произошло в течение 3240 часов работы турбины (за 4,5 месяца), включая работу в пуска-наладочный период.

В течение указанного времени, как явствует из записей машинного журнала, турбина работала под нагрузкой, составлявшей 60—75% ее нормальной мощности. При нормальной нагрузке мощность турбины равна 55 200 квт, расход воды 22,5 м³/сек, напор 285 м, число оборотов 428 в мин., высота всасывания отрицательная — 1 м.

Турбина радиально-осевого типа. Она имеет литую спираль с входным диаметром 1770 мм. Всасывающая труба коленчатого типа (фиг. 1).

Состояние демонтированных деталей гидротурбины

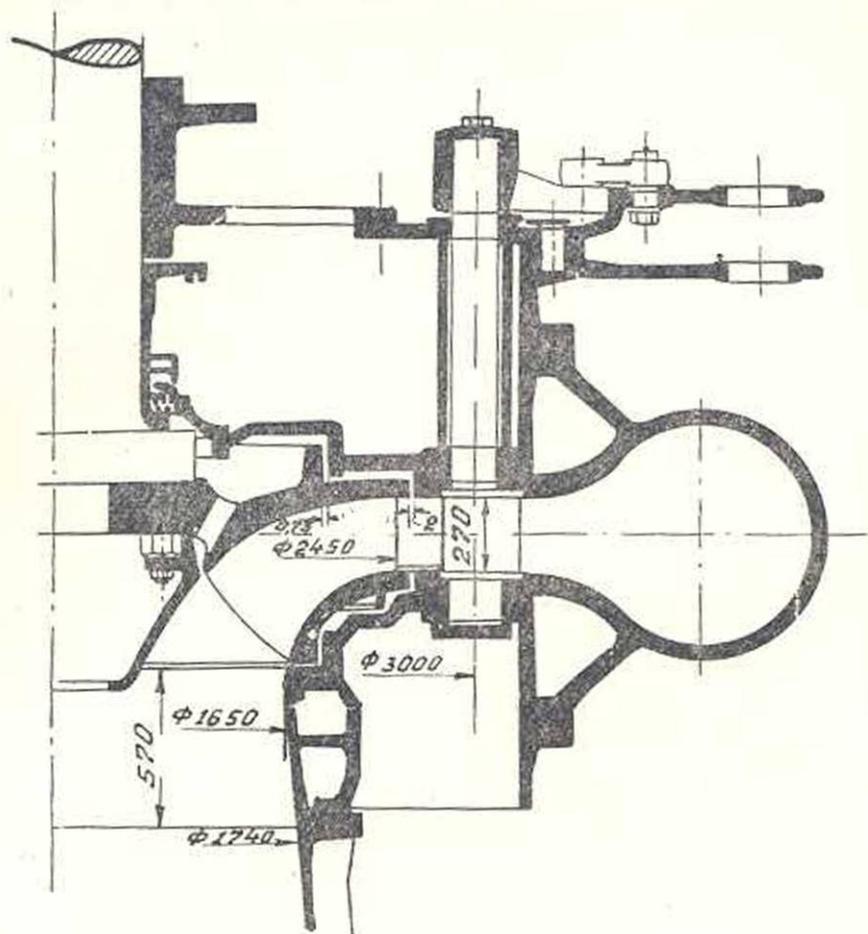
Направляющий аппарат. Направляющий аппарат турбины обычной конструкции Финка состоит из верхней и нижней крышек, облицованных листовой нержавеющей сталью, и поворотных лопаток в количестве 20 штук.

Перо лопатки, длиной 550 мм и высотой 275 мм, в плане имеет удобообтекаемую и почти симметричную форму. На расстоянии 1/3 длины от передней кромки лопатка имеет наибольшую толщину, равную 124 мм.

Лопатка в стержневой части имеет 3 шейки, которыми садится в 3 бронзовые втулки. Одна из втулок запрессована в нижнюю крышку, а две другие — в стакан верхней крышки.

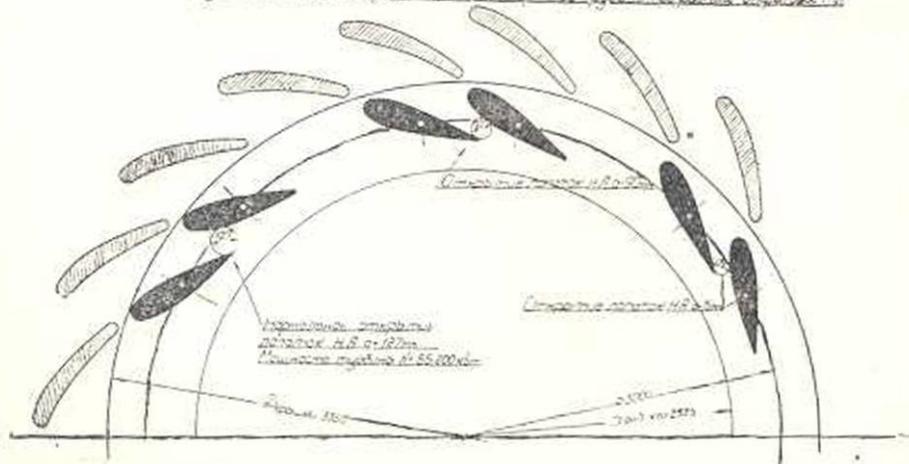
Поворот лопаток осуществляется от регулировочного кольца через серьгу и рычаг, который насаживается на хвостовик лопатки.

Лопатки направляющего аппарата располагаются относительно анкерных связей спирального корпуса таким образом, что против



Фиг. 1.

Схем
 близкого расположения люминесцентных осветительных
 приборов по отношению к поверхности стенок и дна



Фиг. 2.

каждой связи находится одна лопатка, которая при нормальном открытии направляющего аппарата является как бы продолжением связи (фиг. 2).

Заводская обработка лопатки произведена весьма тщательно. Поверхность пера лопатки чисто профрезерована, а в местах сопряжения с верхним и нижним буртами отшлифована.

Согласно данным фирмы, лопатки направляющего аппарата изготовлены из нержавеющей стали с примесью: хрома — 13,3% и никеля 0,81%.

В результате эксплуатации турбины в продолжение 3,40 часов, лопатки направляющего аппарата выгладели следующим образом.

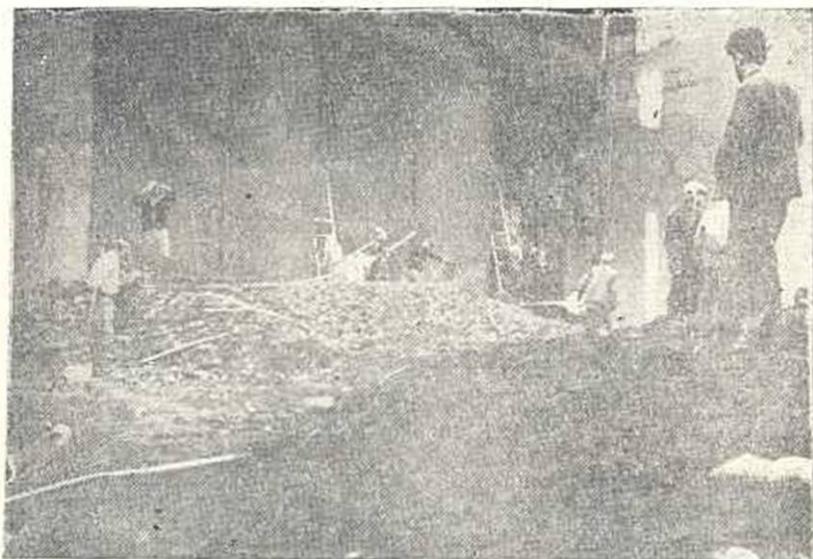
Внешняя сторона (обращенная к спиральному корпусу) всех без исключения лопаток совершенно не подверглась разьединению, сохранила металлический блеск и характерные следы фрезеровки (фиг. 3).



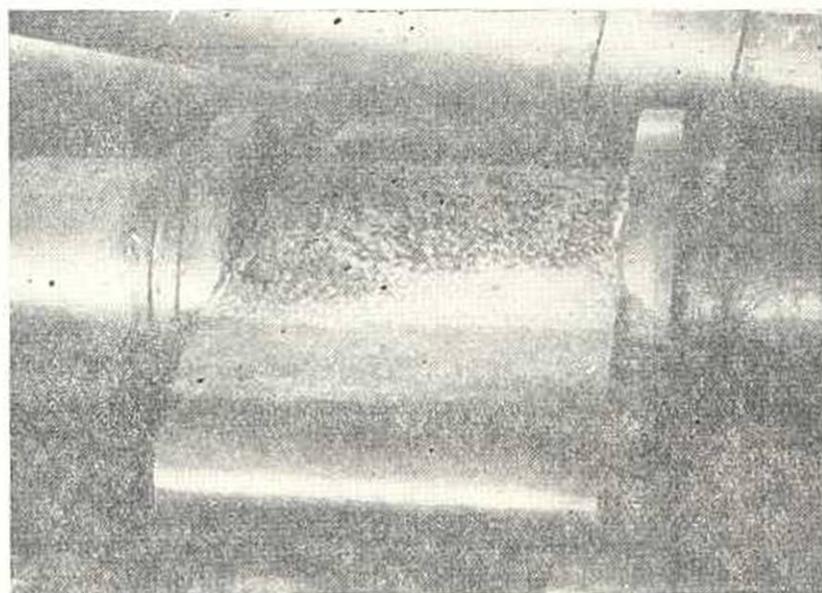
Фиг. 3.

На этой поверхности не обнаружено также царапин или царапин от воздействия щебня, в значительном количестве занесенного водой в турбину из деривации, как об этом можно судить по отложениям щебня в напорном бассейне (фиг. 4), а также по отложениям в патрубке и спиральном корпусе турбины, в которых щебень скопился, по свидетельству ш. ф.-монтера Гидромонтажа, в количестве 2—3 тонн.

Сохранилась также передняя тупая кромка лопатки и примыкающий к ней начальный участок на внутренней, обращенной к рабочему колесу, стороне лопатки, на протяжении 125 мм от входной кромки (фиг. 5).



Фиг. 4.

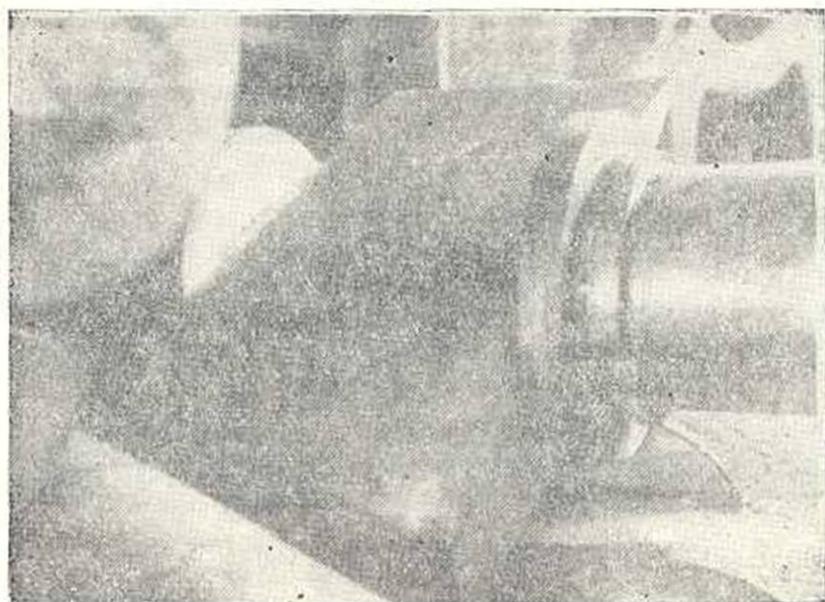


Фиг. 5.

Следует особо отметить сохранность передней кромки лопатки, наиболее подверженной воздействию наносов.

За упомянутым выше начальным участком следует узкая полоска, шириной 25—30 мм, покрытая в направлении потока рисками, напоминающими следы от полудрачевого вальщика.

От этой полоски и до задней острой кромки поверхность лопатки по всей высоте сплошь покрыта равномерно расположенными углублениями.



Фиг. 6.

Этот участок был покрыт сплошным слоем ржавчины (фиг. 6). Контуры и размеры углублений ясно определились лишь по удалении ржавчины при помощи стальной щетки. Следы, оставленные щеткой на ржавой поверхности, отпечатались на свинцовом слепке, снятом с лопатки.

Углубления имеют контур, удлинённый в направлении потока. Они напоминают ямки, насеченные ложкообразным зубилом. Ширина углублений колеблется в пределах от 5 до 8 мм, а глубина — от 0,2 до 0,6 мм. Отдельные ямки, в виде язвы с губчатой поверхностью, в количестве 2—3 штук на каждой лопатке, имеют ширину 12—15 мм и глубину, превосходящую 0,6 мм (фиг. 7).

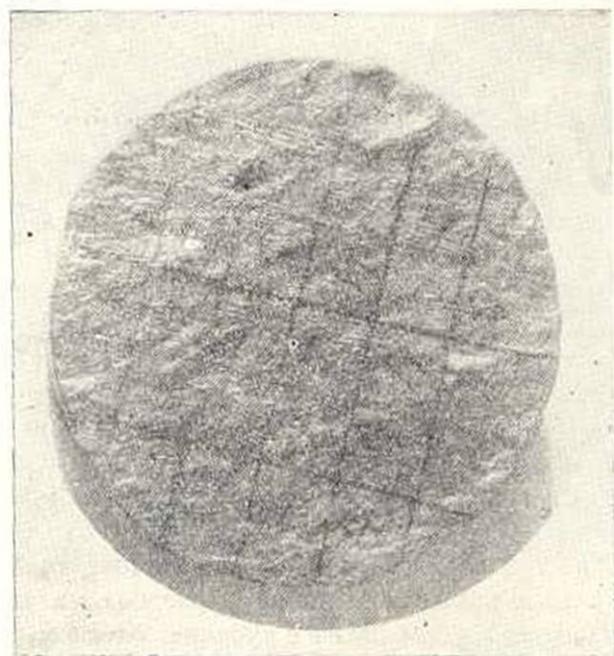
На верхнем и нижнем торцах лопаток следов разъедания не обнаружено.

На поверхностях верхнего и нижнего буртов, омываемых водой, имеются слабые кружевные пятна ржавчины, а также наблюдаются объединенные группы нитей с тусклым блеском, как бы очищенные от ржавчины. Обычно это имеет место в начальной стадии кавитационной эрозии.

Для количественной оценки результатов разъедания с поверхности одной из лопаток был снят свинцовый слепок диаметром 65 мм (фиг. 8), а несколько позже с той же лопатки снят парафиновый слепок размерах 300×120 мм.



Фиг. 7.



Фиг. 8.

Замер шероховатости поверхности лопатки был сделан со свинцового слепка. Предварительно на поверхность слепка нанесена была сетка в 1×1 см. Линии сетки располагались параллельно и перпендикулярно направлению потока.

Слепок, зажатый в тисках, был установлен на столе вертикально-фрезерного станка таким образом, чтобы направления линий на склейке соответствовали бы продольному и поперечному ходу стола.

В шпинделе станка при помощи оправки был укреплен индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм. Подъемом стола слепок подводился до соприкосновения с ножкой индикатора. Затем стол станка с закрепленным на нем слепком перемещался в горизонтальной плоскости сначала в продольном, а затем в поперечном направлении так, чтобы острие ножки индикатора скользило без отрыва по линиям, нанесенным на слепке.

Таким образом число ходов стола в обоих направлениях соответствовало числу линий (профилей) на слепке.

Показания индикатора фиксировались в точках пересечения замеряемой профильной линии с перпендикулярными к ней линиями сетки, а также в промежуточных точках, характеризующих выступы и впадины замеряемого профиля.

На основании этой записи построены профили продольных сечений слепка — в направлении потока и поперечных сечений — в направлении, перпендикулярном потоку.

На фиг. 9 эти профили изображены в виде ломаных линий вместо более плавных в натуре. Для удобства планиметрирования и большей наглядности ординаты выступов и впадин даны в масштабе 10:1, а прочие размеры — в натуральную величину.

В результате планиметрирования средняя толщина слоя металла, сошедшего с поверхности лопатки, составила 0,135 мм, а объем его, при размерах разъеденной поверхности лопатки $27,5 \times 40$ см, — 14,9 см³. Следовательно, вес сошедшего слоя металла составляет 117 г, считая удельный вес стали 7,85.

Аналогичное обследование крышки направляющего аппарата произвести не удалось. Согласно свидетельству шеф-монтера Гидромонтажа, защитное кольцо крышки, изготовленное из нержавеющей стали той же марки, что и лопатки, частично было покрыто продолговатыми углублениями, которые по размерам превосходили углубления на лопатках. Край некоторых углублений переходит в гребень, напоминающий при насечке металла тупым зубилом.

Это явление „кратерообразования“ в более слабой степени наблюдается на лопатках направляющего аппарата.

Как указано, эрозии подверглась не вся поверхность защитного кольца крышки, а часть ее по кольцевой площади, внешняя граница которой не доходит до окружности центров лопаток на 30—35 мм, а внутренней границей является окружность расточки кольца, отвечающая диаметру рабочего колеса.

Рабочее колесо. После демонтажа рабочего колеса было выявлено, что поверхность его лопастей как с рабочей, так и с тыльной стороны совершенно не подверглась разъеданию и полностью сохранила шлифовку, приданную ей на заводе (фиг. 10). Так, например,

заметно, что в месте сопряжения лопасти со ступицей и с нижним ободом колеса след обработки шлифовальным камнем относительно грубее, нежели на остальной поверхности.

Следует отметить хорошую сохранность верхнего и нижнего колец уплотнения, обычно весьма подверженных износу.

Согласно данным фирмы, рабочее колесо цельнолитое, из нержавеющей стали, с содержанием: хрома—13,3% и никеля—0,81%.

На лопастях колеса отсутствуют следы от воздействия щебня, который, как было упомянуто, проник из напорного бассейна в турбину через меалую решетку.

На фиг. 8 видны сильно поврежденные при аварии входные крошки всех лопастей рабочего колеса.

Причины разъедания деталей турбины

Известны две причины разъедания проточных органов турбины, а именно: от истирания наносами и от кавитационного воздействия.

По своему характеру и внешнему виду абразия (стирание наносами) и кавитационная эрозия значительно отличаются друг от друга в их чистом (не комбинированном) проявлении.

Абразия в начальной стадии проявляется в виде сетки небольших расплывчатых впадин, образующих рябоватую, матовую поверхность. На следующих стадиях рябины сливаются в систему борозд, которые напоминают борозды, проведенные пальцем на поверхности теста. Дно и борты борозд сглажены и хорошо начищены.

При абразии не наблюдается процесса окисления и поверхность ни в одной из стадий разрушения не приобретает губчатого строения.

Как можно усмотреть из приведенного выше описания обследованных деталей турбины, их разъедание нельзя отнести за счет абразии. Выявленная картина характеризует кавитационную эрозию. Эта эрозия, как известно, происходит вследствие совместного действия механического и химического (точнее электрохимического) факторов на поверхность деталей, работающих в кавитационных условиях [1].

Решить вопрос, какая доля разрушения деталей турбины происходит за счет электрохимического фактора и какая от механического (ударного) воздействия без постановки специальных, надо полагать довольно сложных лабораторных исследований, не представляется возможным. Весьма усложняющим обстоятельством является то, что каждый из факторов способствует усилению разрушительного действия другого, придавая процессу кавитационной эрозии прогрессирующий характер.

Здесь мы ограничимся изложением причин, вызвавших кавитацию данной турбины и, как следствие, эрозию проточных органов турбины.

Следует отметить, что интенсивность износа той или другой детали обуславливается не только интенсивностью кавитации, но и стой-

костью металла против кавитационной эрозии. Эта стойкость зависит от химического состава и структурной однородности металла.

По данным фирмы химический состав металла лопаток и защитных колец крышек направляющего аппарата, а также рабочего колеса, одинаков.

Что касается структуры, то она зависит от условий литья и дальнейшей горячей обработки. Исходя из обычной заводской технологии, в структурном отношении наименьшей однородностью должно обладать рабочее колесо, а наибольшей — лопатки направляющего аппарата. Близкое к лопаткам место по структуре должно занимать защитное кольцо.

Как будет видно из дальнейшего изложения, вопрос структурной однородности металла для рассматриваемого случая не является решающим.

Из фиг. 2 можно усмотреть, что лопатки направляющего аппарата располагаются относительно анкерных связей спирального корпуса различно при разных открытиях направляющего аппарата.

При открытиях $a = 127$ мм и $a = 90$ мм наружные стороны связи и лопатки направляющего аппарата (стороны, обращенные к спиральному корпусу) почти лежат на одной плавной кривой, являясь продолжением одна другой, и лишь при открытии $a = 75$ мм они располагаются несколько ступенчатообразно. При всех расположениях обеспечивается плавное обтекание указанной поверхности лопатки потоком.

Что касается внутренней стороны лопатки (сторона, обращенная к колесу), в особенности в части передней кромки, то уже при открытии $a = 90$ мм последняя выступает за габариты связи настолько, что нарушает удобообтекаемость цепи: связь — лопатка.

Поток, формирующийся в пространстве между двумя связями, встретив переднюю кромку лопатки направляющего аппарата, вынужден резко изменить направление, в особенности при открытиях направляющего аппарата, меньших нормальных.

Это должно неизбежно вызвать отрыв струи от поверхности лопатки [2] примерно на границе, с которой начинается эрозия. Согласно фиг. 9, эта граница расположена на расстоянии 125 мм от крайней образующей передней кромки лопатки.

Пораженная эрозией поверхность лопатки от указанной границы и до выходной кромки определяет область кавитации, являющейся следствием эжекционного эффекта, создаваемого отклонившейся струей.

Несомненно, что связи спирального корпуса играют вредную роль, в особенности при работе турбины на нагрузках ниже нормальной, т. е. при малых открытиях. В случае отсутствия связей вступление потока в межлопаточное пространство не сопровождалось бы столь интенсивной кавитацией, как это имеет место при наличии связей.

Если поток не отрывается от обтекаемой им стенки, что имеет

место на наружной стороне лопатки, передней ее кромке и начальном участке внутренней стороны, то нет и причины для возникновения интенсивной кавитации, а следовательно и эрозии. Как было упомянуто выше, на указанной поверхности совершенно отсутствуют признаки эрозии.

Характер эрозии на защитном кольце демонтированной нижней крышки, по свидетельству шеф-монтера Гидромонтажа, аналогичен эрозии на лопатках, но выражен сильнее. Несомненно, что это является следствием кавитации, вызванной также лопатками, но не защитным кольцом крышки направляющего аппарата. Защитное кольцо в данном случае является той частью кавитационной зоны, где происходит только лишь „конденсация“ некоторого количества „парогазовых пузырьков“, возникших на лопатках, в зоне отрыва струи. „Конденсация“ сопровождается частыми гидравлическими ударами высокой интенсивности, которые являются одной из причин кавитационной эрозии.

Очевидно эрозия деталей, подвергающихся „гидравлической бомбардировке“, в значительной степени усиливается в случае, если в воде содержатся твердые наносы. Появление кратерообразных углублений на кавитационных участках лопаток и защитного кольца крышки объясняется воздействием щебня, который в основном состоит из литой пемзы (порода вулканического происхождения) и занесен водой в турбину из деривации.

В то же время находящаяся вне зоны кавитации внешняя сторона лопатки, а также ее передняя кромка, которая подвержена, казалось бы, весьма активному воздействию наносов, идеально сохранились.

Таким образом, при содержании в воде наносов, кавитационная эрозия комбинируется со своеобразной интенсивной абразией, порождаемой кавитацией.

То обстоятельство, что лопатки и защитное кольцо крышки были покрыты густым слоем ржавчины, свидетельствует о том, что в течение известного промежутка времени, предшествовавшего непосредственно аварии, в турбину поступала чистая вода, свободная от наносов. Если бы станция находилась в нормальных эксплуатационных условиях, а не в условиях строительства, то вода, принимая во внимание ее озерное происхождение, не содержала бы столь значительных наносов, в особенности щебня, и интенсивность эрозии была бы ниже.

Рабочее колесо в целом, и в частности его лопасти, совершенно не подверглись эрозии, находясь, очевидно, в более благоприятных в отношении кавитации условиях, нежели защитное кольцо и лопатки направляющего аппарата. И это несмотря на то, что стойкость рабочего колеса против кавитационной эрозии ниже стойкости защитного кольца и лопаток по той причине, что при одинаковом химическом составе структурная однородность рабочего колеса, как литья весьма сложной формы, должна быть ниже.

Стойкость деталей турбины против кавитационной эрозии

Вопрос стойкости деталей, изготовленных из нержавеющей стали, против кавитационной эрозии является интересным не только для организации, эксплуатирующей турбину, но также для машиностроительных заводов и, в частности, для ЛМЗ, выпускающих мощные сверхвысоконапорные гидротурбины радиально-осевого типа.

Обследование показало, что нержавеющая сталь в условиях кавитации на сверхвысоконапорной установке ржавеет и разрушается. Характерно, что фирма-изготовитель, указывая в технической документации состав нержавеющей стали, из которой изготовлены проточные органы турбины, нигде не упоминает, что гарантирует свои турбины от кавитационной эрозии.

Поскольку детали турбины из нержавеющей стали подвержены эрозии, следует в какой-то степени характеризовать их стойкость против последней.

Если обратиться к химической промышленности, в которой применяется аппаратура из нержавеющей стали (подверженная, однако коррозионному разъеданию), то для оценки коррозионной стойкости здесь наибольшее распространение получила следующая шкала [3, стр. 300]:

Потеря в весе	Характеристика	Балл
менее 0,1 г/м ² в час	вполне стоек	1
0,1—1 в час	удовлетворительно стоек	2
1—3 в час	умеренно стоек	3
3—10 в час	малостоек	4
более 10	нестоек	5

Характеристика коррозионной устойчивости в шкале дается в зависимости от скорости коррозии, т. е. потери металла в весе на площади одного кв. метра в течение одного часа.

В рассматриваемом нами случае скорость кавитационной эрозии поверхности лопатки будет:

$$\frac{G}{FT} = \frac{117}{0,11 \cdot 3240} = 0,33 \text{ г/м}^2 \text{ в час,}$$

где $G=117$ г — вес исчезнувшего металла,

$F=0,275 \cdot 0,40=0,11$ м² — поверхность лопатки, пораженная эрозией,

$T=3240$ часов — продолжительность работы турбины с начала пуска до аварии.

Следовательно, по вышеприведенной шкале металл лопатки должен характеризоваться как удовлетворительно стойкий.

Однако, как справедливо указывается [3], для надежного суждения о коррозионной стойкости следует располагать кривой „скорость коррозии — время“. Для деталей турбины кривая „скорость эрозии —

время⁴ может быть построена по данным ряда наблюдений в течение характерного промежутка времени, например, от начала пуска турбины в эксплуатацию до первого капитального ремонта или же между двумя капитальными ремонтами.

В отношении деталей турбины следует ожидать, что, благодаря прогрессирующему характеру кавитационной эрозии, кривая „скорость эрозии — время“ должна иметь восходящий характер и поэтому полученное из нее среднее значение скорости эрозии несомненно превысит $0,33 \text{ г/м}^2$ в час, т. е. то значение, которое характеризует эрозию в начальный период эксплуатации, когда гладкая, благодаря обработке, поверхность деталей турбины сравнительно слабо подвергается разрушающему действию кавитации. Таким образом, полученная выше характеристика металла лопатки, как удовлетворительно стойкого, может оказаться преувеличенно благоприятной.

Кроме того, можно указать на следующие обстоятельства, заставляющие проявлять осторожность при применении приведенной выше шкалы для деталей гидротурбин:

1) нормы износа, допустимые для химической аппаратуры, могут быть неприемлемы для деталей турбины, ввиду того, что при этих нормах гидравлические потери в турбине могут оказаться недопустимо большими;

2) эрозия деталей гидротурбин, работающих на речной воде в условиях кавитации, невыгодно отличается по характеру от коррозии химической аппаратуры, работающей в кислотной среде и без явления кавитации.

Ввиду этого для оценки противоэрозийной стойкости металла частей гидротурбин необходима специальная шкала, разработанная на основании эксплуатационных данных по гидротурбинному оборудованию.

Основываясь на опыте эксплуатации гидротурбинного оборудования, можно заключить, что кавитационная эрозия, имеющая место в обследованной, уникальной по напору, турбине, носит интенсивный характер. Ввиду этого возникает необходимость в осуществлении следующих мероприятий:

1. В целях уменьшения кавитации в направляющем аппарате обследованная турбина должна работать на режимах, близких к нормальному, т. е. при открытиях направляющего аппарата, близких к нормальному.

2. Срок капитального ремонта турбины должен устанавливаться, исходя из состояния ее деталей, подвергшихся эрозии, т. е. исходя из состояния, при котором дальнейшая эксплуатация турбины сопровождалась бы недопустимыми гидравлическими потерями и, следовательно, недопустимым снижением коэффициента полезного действия.

3. Для установления степени износа деталей турбины в соответствии с п. 2 необходимо в эксплуатационный период между двумя капитальными ремонтами, через определенные промежутки времени

проводить весьма несложные испытания турбины для снятия режимных характеристик, т. е. кривых зависимости между открытием направляющего аппарата и мощностью турбины. Совмещение на одном графике режимных характеристик даст динамику падения мощности турбины, которая с достаточным для практики приближением может служить показателем износа турбины [1].

Для возможности количественной оценки эрозии деталей турбины не только в конечной, но и в промежуточных стадиях износа, необходимо проводить тщательное обследование деталей турбины, с производством замера шероховатости поверхности, как при постановке турбины на капитальный ремонт, так и при всяком удобном случае, когда турбина подвергается разборке.

4. Силами организации, завершающей строительство гидростанции, необходимо очистить от наносов всю систему водоподводящих сооружений станции.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 7 I 1955

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Тер-Акопов Г. Д. Борьба с износом гидротурбинного оборудования от кавитации и наносов. Госэнергоиздат, 1930.
2. Шальнев К. К. Опыт обследования кавитационной эрозии турбин и насосов большой мощности. Инженерный сборник, т. XVIII, 1954.
3. Акимов Г. В. Основы учения о коррозии и защите металлов: Metallurgizdat, 1946.

Ե. Ի. Փառայան

ԳԵՐԲԱՐՁՐՃՆՇՈՒՄԱՅԻՆ ՇԱՌԱՎՂԱ-ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՀԻԴՐՈՏՈՒՐԲԻՆԻ ԴԵՏԱԼՆԵՐԻ ԿԱՎԻՏԱՑԻՈՆ ԷՐՈԶԻԱՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում բերվում է 3240 ժամ աշխատած իմպուլսային հիդրոտուրբինի ուղղորդ սարքի և աշխատող անիվի վիճակի նկարագրերը: Հիդրոտուրբինի բևեռվածությունը նշված ժամանակամիջոցում կազմում էր նորմալ հոսքովյան 60—75%₀-ը:

Ուղղորդ սարքի թիակների և կափարիչի պաշտպանական օղակի մաշման բնույթը թույլ է տալիս եզրակացնելու, որ այդ էրոզիան ունի կավիտացիոն ծագում: Տվյալ դեպքում կավիտացիայի ծագման պատճառն այն է, որ ուղղորդ սարքի նորմալից փոքր բացվածքների դեպքում թիակի առջևի եզրակտորը դուրս է ցցվում պարույրի անկերային կապի հետևից և խիստ փոխում է հոսանքի ուղղությունը, անջատելով հոսանքը թիակի մակերևույթից մոտավորապես էրոզիայի սկզբնական սահմանում:

Կավիտացիայի պայմաններում աշխատելիս նկարագրվող դետալների մակերևույթները ենթարկվում են քիմիական և մեխանիկական գործոնների համատեղ ազդեցությանը:

Ի տարբերություն թիակի, պաշտպանական օդակը չի հանդիսանում կապիտացիայի ծագման պատճառ, այլ ծառայում է որպես կապիտացիոն գոտու այն մասը, որտեղ կատարվում է թիակից շրթի անջատման գոտում արտագաղթած շոգեգազային պղպջակների կոնցենտացիան»:

Ջրում ջրաբերուկներ, հատկապես խիճ լինելու դեպքում, էրոզիայի հարվածային գործոնը նկատելիորեն աճում է, ուղղորդ սարքի գետալների վրա առաջացնելով խառնարանաձև խոտոչներ:

Սկներե է, որ պարույրի անկերային կապերի բացակայությունը դեպքում, կապիտացիան և նրա նեղանիքով էրոզիան չեն կարող ինտենսիվ բնույթ ունենալ:

Հիդրոտուրբինի աշխատող անիվը ստրոգլուսթյամբ, և մասնավորապես, նրա թիակները լավ են պահպանվել, կապիտացիայի ակտիվացիոն գոնովելով ավելի բարենպաստ պայմաններում:

Հիդրոտուրբինի գետալների դիմացկունությունը բնութագրելու համար անհրաժեշտ է ունենալ հիդրոտուրբինային սարքավորման շահագործման ավյալների հիման վրա մշակված հատուկ ցուցնակ:

Հոգավածում բերվում են նաև հիդրոտուրբինի կապիտացիոն էրոզիան մեղմացնելու վերաբերյալ մի շարք միջոցառումներ: