

Г. Д. ТЕР-АКОПОВ

СУПЕРКАВИТИРУЮЩИЕ ГИДРОТУРБИНЫ

1. Введение

В настоящее время в мировом гидротурбостроении вполне определились следующие тенденции:

Увеличение мощности турбины в единице. Ведется подготовка к выпуску крупнейших в мире радиально-осевых гидротурбин мощностью более 200.000 квт для Братской ГЭС. Проектно проработаны гидротурбины в 300.000 квт. Для Красноярской ГЭС выбраны гидроагрегаты мощностью в 500.000 квт. Согласно решению временной комиссии по турбиноному оборудованию гидроэлектростанций при ГИТК Совета Министров СССР по вопросу «Пути снижения стоимости и повышения эффективности гидротурбин» поставлена задача о доведении мощности гидроагрегатов в единице от 600 : 1000 квт с разработкой эскизного проекта такого гидроагрегата в 1961—1962 гг.

Расширение пределов применения отдельных типов гидротурбин. За рубежом уже теперь работают поворотно-лопастные гидротурбины на напорах свыше 80 метров (гидростанция Нембья, Италия, напор 88 м) и радиально-осевые с напором свыше 400 м (гидростанция Финней-Мовуазен, Швейцария, напор 471 м — наибольший напор в мире для подобных турбин [1]). По этому же решению временной комиссии при ГИТК рекомендовано проектным организациям ориентироваться на применение поворотно-лопастных гидротурбин на гидростанциях с напором 70 : 80 метров, и на создание радиально-осевых турбин для напора до 450 метров.

Повышение КПД. Лучшие гидротурбины в настоящее время работают с КПД в оптимальном режиме до 93 : 94%. Максимальный КПД радиально-осевых турбин достигнут 94,4% — установка Шиншоу II в Канаде [1]. Совершенно естественно, что при создании таких мощных гидроагрегатов предостоят весьма ожесточенная борьба за каждую десятую долю процента повышения КПД, так как эффект от этого будет огромный. С другой стороны каждая из приведенных тенденций находится в прямом противоречии с мероприятиями по борьбе с кавитационными явлениями в гидротурбинах:

1. Повышение мощности — это повышение быстроходности гидротурбин, что увеличивает вероятность возникновения в них кавитационных явлений;

2. Расширение пределов применения гидротурбин также повышает вероятность возникновения кавитации;

3. Стремление повысить КПД заставит снизить потери в отсасывающей трубе, что, как известно, также повышает вероятность возникновения кавитации.

Короче говоря, можно сказать а priori, что создаваемые крупнейшие агрегаты с такими уникальными гидротурбинами непременно будут подвержены кавитационным явлениям со всеми сопутствующими отрицательными последствиями.

Возникает мысль — а может быть можно приоритетно к этим неизбежным кавитационным явлениям и по возможности использовать их?

Для ответа на поставленный вопрос необходимо предварительно остановиться на некоторых понятиях.

2. Суперкавитационный режим работы турбины

Если нарушение сплошности потока произойдет так, как показано на рис. 1, то в этом случае будет сжатие потоком воды и водяных паров, затем конденсация их, всегда сопровождаемая гидравлическими игольчатыми с местным повышением давления и разрушением металла, где кавитация кончается, т. е. в точке смыкания струй — точка «а».



Рис. 1.



Рис. 2.

По мере роста скорости потока кавитационные явления развиваются, линии потока воды отходят от стенки лопасти и замыкаются за пределами самой лопасти — рис. 2. Первый случай — обычная кавитация, второй — сверхкавитация для суперкавитации.

Совершенно очевидно, что эти обе стадии будут характеризоваться в части разъедания таким образом: в первом случае зона разъедания будет располагаться на спинке лопасти (точка «а»), во втором случае — разъеданий на лопасти не будет, но будет вынос факелов кавитационной эрозии на ближайший к рабочему колесу элемент отсасывающей трубы. Таким образом, суперкавитация характеризуется отрывным обтеканием и отсутствием эрозионных разъеданий на самих лопастях.

Суперкавитирующий или суперкавитационный режим работы гидротурбины является режимом, при котором кавитационные явления устойчиво достигают такой интенсивности, что почти вся тыльная сторона лопастей обтекается, так как поток рабочего канала отрывается от нее (рис. 3) и восстановление сплошности потока происходит за пределами

лопасти рабочего колеса [2]. Исходя из природы кавитационных явлений можно утверждать, что при подобном режиме работы разъедание лопастей рабочего колеса турбины не должно иметь места. При суперкавитационном режиме работы большая часть тыльной поверхности лопасти не об-

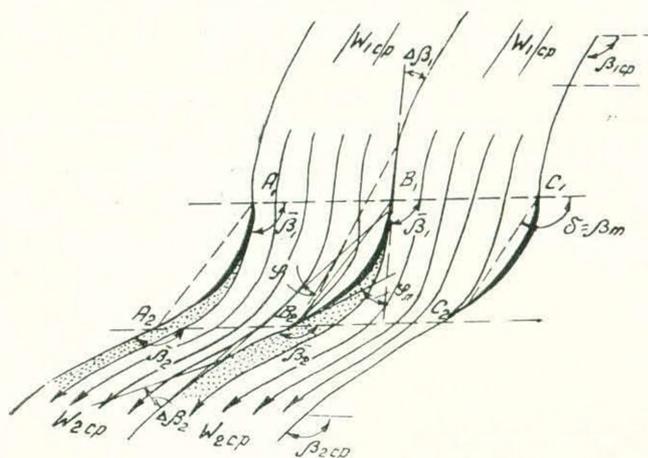


Рис. 3. Поток в канале рабочего колеса в суперкавитационном режиме работы.

текается водой, а омывается смесью паров воды и воздуха очень низкой упругости. Следовательно, разность давлений по обе стороны лопасти будет выше, а также подъемная сила, развиваемый момент вращения рабочего колеса и мощность гидротурбины при прочих равных условиях должны быть выше. При суперкавитационном режиме работы КПД гидротурбины должен быть выше, так как уменьшаются потери на трение потока между лопастями рабочего колеса в оптимальном случае примерно вдвое.

Для низконапорных установок повышение КПД будет меньшим из-за малого количества лопастей рабочего колеса. Для высоконапорных установок, наоборот, заметное влияние окажут на рост КПД меньшие потери на трение потока воды в рабочих каналах колеса.

Восстановление сплошности потока турбины будет происходить за пределами лопасти, поэтому зона расположения разъединений должна быть там, где кавитация кончается, т. е. на начальном элементе отсасывающей трубы. Здесь необходимо отметить, что чем дальше от лопасти происходит восстановление сплошности, т. е. чем «дальнее кавитационный прыжок», тем в меньшей степени будет подвергаться эрозии первый элемент отсасывающей трубы, так как толща слоя воды вращающегося потока будет до известной степени предохранять трубу от разъединений. Кроме того, эту область отсасывающей трубы легче защитить от разъединений применением специальных защитных облицовок из износоустойчивых сортов стали.

Для работы гидротурбины в суперкавитационном режиме, конечно, должны быть по возможности соблюдены условия безударного входа и

нормального выхода, однако, невидимому, будет необходимо пересмотреть гидравлику обычного режима; требуют нового анализа углы α_1 , β_1 , γ_2 , γ_2 угол атаки, а также выбор наиболее подходящего расчетного режима для вновь проектируемых турбин.

Исследовательские работы по применению суперкавитирующих гребных винтов ведутся и у нас в Советском Союзе и за рубежом. Уже сейчас в технической зарубежной литературе встречаются некоторые сведения о применении сверхкавитирующих винтов в судостроении.

Так, например, в американском журнале «Авиэшен Уик» от 8.IX—1958 г. есть сообщение, что научно-исследовательское управление военно-морского флота США провело исследовательскую работу по разработке нового сверхкавитационного гидропланирующего профиля винтов, что обеспечивает возможность резкого повышения характеристик гидросамолетов, подводных лодок, подводных управляемых снарядов и подводных кораблей. Появление винтов с лопастями такого профиля означает значительное увеличение скоростей всех перечисленных кораблей.

Математическая теория Маршалла Тулуна позволила гидродинамикам задавать геометрическую форму сверхкавитационных профилей винтов, которые обеспечат большие скорости. Характерной особенностью сверхкавитационных профилей является то, что они имеют большую тупую заднюю кромку, занимающую около 10% длины хорды. Фирмы «Эдо флоат компани» и «Груман эйркрафт корпорейшен» работают над изучением возможности создания соответствующих конструкций.

Интересно упомянуть, о том, что в 1940 г. по поручению академика Позднеева ВИГМ-ом была проделана большая работа по подбору профилей лопастей для суперкавитирующих винтов [3], причем наиболее отвечающие назначению получились профили *кловобразные* (результат напоминает американский) и эллиптически дуговые.

Интересно отметить, что на суперкавитационном режиме работали первый период после пуска в ход турбины I-й очереди Канакерской гидроэлектростанции в 1937 году. К такому выводу можно прийти на основании следующего.

Через $3\frac{1}{2}$ —4 месяца после пуска в ход агрегата № 4 КанакерГЭС-а, было произведено контрольное вскрытие турбины, которое показало полное отсутствие следов эрозионных разрушений от кавитации на выходных кромках рабочего колеса. В то же время было отмечено, что на первом элементе отсасывающей трубы (переходный патрубок) имеются следы износа кавитационных факелов (рис. 4 и рис. 5) [4 и 7]. С целью смягчения резкости кавитационных явлений тогда было решено, основываясь на заграничном и Союзном опыте, произвести дозированный выпуск воздуха под рабочее колесо турбины. Для этой цели было спроектировано и изготовлено специальное опытное устройство для выпуска воздуха. Опытный выпуск воздуха снизил резкость кавитационных явлений, поэтому было осуществлено устройство для постоянного выпуска воздуха под рабочее колесо турбины. Через $3\frac{1}{2}$ —4 месяца работы турбины с подведенным воздухом бы-

ло произведено повторное контрольное вскрытие турбины и было зафиксировано:

1. Появление эрозионных разрушений кавитационного происхождения на выходных кромках лопастей рабочего колеса;

2. Отсутствие дополнительных следов от выноса кавитационных факелов на первом элементе отсасывающей трубы (на переходном патрубке).

На рис. 4 представлен разрез турбины, на котором отмечено расположение зон эрозии от кавитации. Цифрой I отмечены зафиксированные следы выноса кавитационных факелов при первом контрольном вскрытии турбины. Цифрой II отмечено расположение зон эрозии от кавитации на выходных кромках лопастей рабочего колеса, обнаруженных при втором контрольном вскрытии турбины.

На рис. 5 представлена нижняя часть переходного патрубка отсасывающей трубы турбины № 4 со следами кавитационной эрозии после четырехмесячной работы в начальный период до впуска воздуха по рабочему колесо. Явно выражена кавитационная эрозия в отсасывающей трубе.

На рис. 6 представлена характерная кавитационная эрозия рабочего колеса турбин I-ой очереди КанакерГЭС-а, которая систематически наблюдалась после впуска воздуха под рабочее колесо в течение многих лет.

Таким образом, выпуск воздуха под рабочее колесо турбины сократил длину кавитационного прыжка и перенес зону эрозионных разрушений из переходного патрубка отсасывающей трубы (I) на выходные кромки лопастей рабочего колеса (II). Кстати, необходимо отметить, что интенсивность кавитационных явлений на турбинах I-й очереди КанакерГЭС-а, а также кавитационной эрозии по признанию специалистов оказалась непревзойденной по Советскому Союзу [5].

В свете современного понимания следует отметить, что: *суперкавитационный режим работы турбин первой очереди КанакерГЭС имел место до впуска под рабочее колесо.*

Действительно, есть целый ряд обстоятельств, косвенно подтверждающих этот вывод:

1. Как было упомянуто выше, рабочие колеса турбин I-ой очереди из-за резкости кавитационных явлений подлежали замене, согласно решению экспертизы. Для этой цели был спроектирован и испытан целый ряд новых модельных колес. Конкурирующими оказались колеса Т-13, Т-14 и Т-15.

На рис. 7 представлен разрез рабочего колеса и сравнительная длина лопастей этих колес. Незначительная длина лопастей старого рабочего колеса Т-7а по сравнению с рабочими колесами Т-13, Т-14 и Т-15 обуславливает большую удельную нагрузку колеса Т-7а, тем более при 18 лопастях, тогда как новые колеса имели по 19 лопастей.

2. Лопасти колес Т-13 и Т-15 имеют более плавное очертание в то время, как лопасти колеса Т-7а имеют гораздо большую кривизну и явно выраженные «скулы», т. е. вероятность возникновения и развития интен-

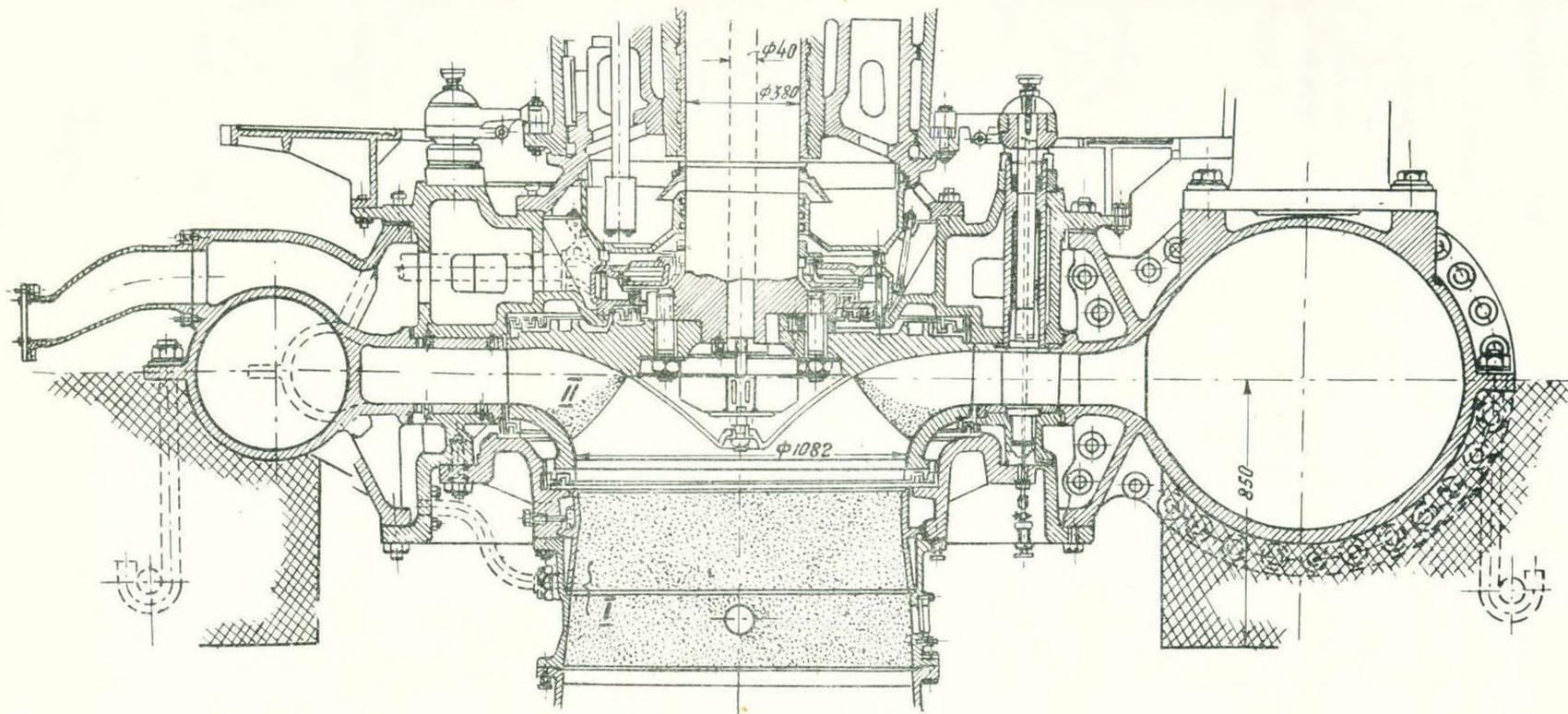


Рис. 4. Зоны расположения кавитационной эрозии на выходных кромках тыльных поверхностей лопастей рабочего колеса турбины КанакерГЭС-а после впуска воздуха и на первом элементе отсасывающей трубы до впуска воздуха.

сивных кавитационных явлений на рабочем колесе Т-7а была гораздо большая, чем на рабочих колесах Т-13 и Т-15.

Лучшая по данным испытаний ВИГМа в кавитационном отношении работа новых колес была достигнута вышеперечисленными обстоятель-

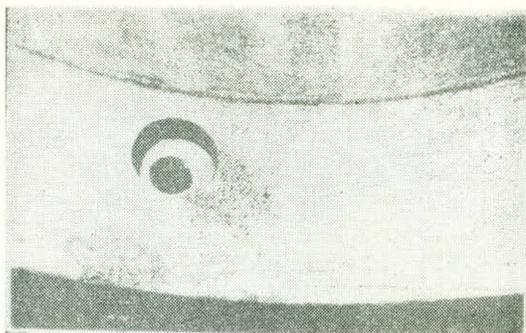


Рис. 5 Следы кавитационной эрозии на первом элементе отсасывающей трубы № 4 Камакер-ГЭС-а после 3½ месячной работы без выпуска воздуха под рабочее колесо 1937 г. Суперкавита- тания.



Рис. 6. Характерная кавитационная эрозия рабочего колеса турбины КамакерГЭС-а после выпуска воздуха под рабочие колеса.

ствами и соответствующим снижением КПД. Другим примером также длинного кавитационного прыжка, т. е. режима, когда восстановление сплошности водного потока происходит за пределами лопастей рабочего колеса, иначе говоря, суперкавитационного, могут послужить приводимые снимки другой гидроэлектростанции ЕрГЭС-1.

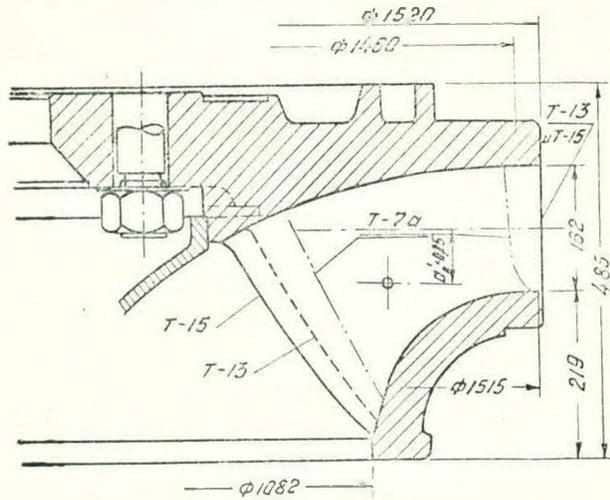


Рис. 7. Длина лопасти рабочих колес турбины Капакер-ЭС-а типов Т-7а, Т-13, Т-15 и Т-7а.



Рис. 8. Рабочее колесо турбины № 1 Ер-ЭС-а. Лопасти после работы в течение 15000 ч. совершенно не тронуты кавитационной эрозией. На ободе следы абразивного износа от наносов и эрозии от кавитации. Суперкавитация.

К этому выводу можно прийти на основании следующих данных.

На рис. 8 видно совершенно отчетливо, что лопасти рабочего колеса не имеют никаких следов кавитационной эрозии, хотя турбина работала продолжительное время. На венце рабочего колеса имеются следы как механического (абразивного) износа от наносов, так и износа кавитационного.

На рис. 9 представлены части отсасывающей трубы (первого элемента — турбина горизонтальная) той-же турбины, где разъединенные кавитацией места заварены, т. е. кавитационный прыжок выходил за пределы лопастей рабочего колеса и сплошность потока восстанавливалась в области отсасывающей трубы, где расположилась зона кавитационной эрозии.



Рис. 9. Турбина № 1 ЕрГЭС-а. Разъединенные места на примыкающем элементе отсасывающей трубы заварены. Суперкавитация.

В Америке на гидростанции «Big Creek» № 3 на гидротурбинах фирмы «Wellman Seaver and Morgan Co» также по тем или иным причинам был суперкавитационный режим, так как несмотря на то, что кавитационные явления выражались весьма ярко (шум, треск и вибрация) при вскрытии турбины лопасти рабочего колеса были совершенно свободны от кавитационной эрозии [6].

З а к л ю ч е н и е

Суперкавитационный режим работы гидротурбины может быть достигнут увеличением положительной высоты отсасывания. Для этой цели необходимо для каждой установки устройство для регулирования отметки нижнего бьефа турбины.

Сначала, например, для высоконапорных турбин, открытием направляющего аппарата производится пуск и нагрузочный режим гидроагрегата, а затем увеличением положительной высоты отсасывания, т. е. понижением

нием уровня нижнего бьефа, устанавливается суперкавитационный режим. Устройство для регулирования уровня нижнего бьефа не представляет какой-либо трудности.

Следует иметь в виду, что при суперкавитационном режиме работы турбины создаются благоприятные условия гидравлического удара от обратной волны при сбросе нагрузки. Поэтому, клапаны срыва вакуума должны в данном случае работать безукоризненно.

Для того, чтобы получить максимальный эффект от суперкавитационного режима необходимо провести большую исследовательскую работу по подбору профиля лопасти рабочего колеса, по пересмотру некоторых на сегодня незыблемых положений гидравлики гидротурбин.

Аналогичное положение было с гребными винтами. Еще в 1908—1909 году Тейлор, наблюдая развитие кавитационных явлений на тыльной и лицевой сторонах лопастей винтов посредством стробоскопа, установил, что катастрофическое падение упорного давления включительно до нулевого значения имеет место при одновременном развитии как тыльной, так и лицевой кавитации.

Экспериментальные диаграммы моделей кавитирующих винтов Мэмфорда (1925), Смиса (1937) говорят о том, что могут быть случаи, когда при увеличении числа оборотов после резкого падения давления упорное давление на длительном диапазоне изменения числа оборотов остается постоянным, либо обнаруживает тенденцию к вторичному возрастанию. Этому случаю всегда отвечает сильное развитие тыльной кавитации при полном отсутствии лицевой кавитации.

Иначе говоря, было обнаружено, что при некоторой конструкции винтов при развитой кавитации можно получить вторичный рост упорного давления после его первоначального падения.

Опыты академика Поздюнина в 1940 году также подтверждают возможность существования режима развитой кавитации, отвечающей при некоторой конструкции винта вторичному росту упорного давления [3].

Многие вопросы суперкавитационного режима, сейчас же неясные, могут быть разрешены при проведении комплексных модельных и натуральных испытаний. Для этого необходима организация исследовательской работы на любой модельной установке, придав ей некоторые специфические свойства: прозрачную отсасывающую трубу, возможность стробоскопических наблюдений и т. д.

По получении предварительных результатов на модельной установке исследования следует перенести также и на натурные установки.

Автору настоящих строк предствляется, что потенциальные возможности для проведения всего комплекса вопросов данной работы имеются в Армянской Академии наук.

Գ. Գ. ՏԵՐ-ԱՆՈՊՈՎ

ՍՈՒՊԵՐԿԱՎԻՏԱՑՆՈՎ ՀԻԳՐՈՏՈՒՐԲԻՆՆԵՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հիդրոտուրբինաշինության ժամանակակից տեղեկեցներից հատկապես միավորի մեջ հզորության ավելացումը մինչև 1000 000 կվտ, ճեղման ուղղությամբ օգտագործման սահմանների ընդլայնումը (պտտատակա-թիակավորները մինչև 80 մ ավելի, շտապվա-տանցքայինը մինչև 470 մետր) և, վերջապես, ՍԳԳ-ի բարձրացումը (լավագույն հիդրոտուրբինները ունեն մինչև 94 տոկոսի հասնող ՕԳԳ), հիդրոտուրբիններում կավիտացիոն երևույթը դարձնում են անխուսափելի այնքանով, որ նշված տեղեկեցներից յուրաքանչյուր կավիտացիայի հետ գտնվում է ուղղակի հակասություն մեջ: Այստեղից միտք է հղանում այս անխուսափելի երևույթը օգտագործել սուպերկավիտացիոն կամ դերկավիտացիոն հիդրոտուրբինների ստեղծման միջոցով:

Սուպերկավիտացիոն սեծիմը կարող ենք անվանել հիդրոտուրբինների աշխատանքի այն սեծիմը, որի ժամանակ կավիտացիայի ինտենսիվությունը հասնում է մի աստիճանի, երբ անիվի աշխատանքային կանալում հոսքը համառոտ ամբողջությամբ անջատվում է թիակի թիկունքային մակերևույթից, սրը ալյուրի սով ողողվում է ջրի դուրըշու և օդի խառնուրդով:

Շիթի միացումը և հոսքի ամբողջության վերականգնումը այս դեպքում կարող է ընթանալ թիակի սահմաններից դուրս: Աշխատանքի նման սեծիմը կուղեկցվի անմիջականորեն թիակների վրա կավիտացիոն էսողիայի բացակայությամբ և այդ էսողիայի առաջացումը ներծծող խողովակի սահմաններում, որտեղ կերամաշման զեմ պաշարը նշանակալիորեն դյուրին է: Աշխատանքի այդ սեծիմը պետք է ուղեկցվի ՍԳԳ-ի բարձրացմամբ ի հաշիվ շփման վրա ծախսվող կորուստի փոքրացման:

Աշխատանքի սուպերկավիտացիոն սեծիմին կաշիլի է հասնել ներքին բյեֆի հորիզոնի իջեցմամբ՝ այսինքն, ներծծման զրական բարձրության մեծացմամբ:

Հողվածում բերված է հիդրոտուրբինների բնական զործող կայանքների սուպերկավիտացիոն սեծիմով աշխատանքի մի քանի օրինակներ:

Եզրակացության մեջ նշվում է այն հետաքրքրական հետազոտական աշխատանքի պոստնցիալ հնարավորության մասին, որը կարելի է տանել Հայկական ՍՍԽ Գիտությունների ակադեմիայի էներգետիկայի ինստիտուտում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Золотарев Т. Л. Основные проблемы зарубежной гидроэнергетики, 1998.
2. Поздюнин В. Л. Суперкавитирующие винты. Известия ОНН АН СССР, № 1—2, 1944.
3. Поздюнин В. Л. Основы теории устройства и действия суперкавитирующих гребных винтов. Известия ОНН АН СССР, № 10—11, 1945.
4. Экспертиза по турбинам КанакерГЭС ст. инженера ТО Главэнергостроя инженера Л. А. Артемова и руководителя группы гидротурбины ВНГМа инженера В. С. Квятковского, 1937.

5. Экспертиза по проекту модернизации турбин КанакерГЭС-а начальника отдела комплектации Спецуправления № 2 треста Спирьстрой инженера М. А. Барковского. 1942.
6. Письмо о гидростанции в Америке „Big Creek“ начальника Спецгидромонтажа Министерства строительства электростанций инженера Барковского М. А. 1960.

Тер-Акопов Г. Д. Кавитационные явления на высоконапорных турбинах Канакер-ГЭС-а. АН Армянской ССР. Водно-энергетический институт, 1954.

Г. Д. ТЕР-АКОПОВ

Н е к р о л о г

Георгий Данилович Тер-Акопов родился 16 декабря 1899 г. в г. Баку. В 1917 г. оканчивает бакинскую вторую мужскую гимназию, а в марте следующего года принимает участие в боях против мусаватистов за победу Советской власти в г. Баку. С 1921—1932 гг. Г. Д. Тер-Акопов работал на предприятиях Азнефти и одновременно учился в Азербайджанском политехническом институте, который окончил в 1930 г.

Переехав в Армению, Г. Д. Тер-Акопов в 1932—1934 гг. занимал руководящие должности в Дзорагэсе, Канакергэсе и Кироваканской районной подстанции. В 1943—1957 гг. работал главным инженером Арменэнерго, в 1957—1961 гг.—главным инженером и заместителем начальника энергетического управления Совнархоза Армянской ССР.

Г. Д. Тер-Акоповым была проведена большая работа по созданию Армянской Энергосистемы и подготовки кадров энергетиков. Под его непосредственным руководством была осуществлена автоматизация всех гидростанций и телемеханизация всей системы в целом.

Свою многогранную общественную и производственную деятельность Г. Д. Тер-Акопов успешно совмещал с плодотворной научной и педагогической деятельностью, преподавая в Ереванском политехническом институте. Его перу принадлежит ряд научных работ.