

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
"СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ
институт
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и
электрических сетей
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.А. Ачитаев
" ____ " _____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОТЕЧЕК ВОДЫ ЧЕРЕЗ КОНСТРУКТИВНЫЕ УЗЛЫ ГИДРОАГРЕГАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____	_____	<u>В.В. Луфференко</u>
	подпись, дата	должность	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>Д.Е. Мамышев</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	<u>К.В. Терехов</u>
	подпись, дата	должность	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>А.А. Чабанова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020

АННОТАЦИЯ

К магистерской диссертации, студента 2 курса магистратуры Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета на тему "Технический контроль протечек воды через конструктивные узлы гидроагрегата для оценки его технического состояния"

В процессе выполнения работы были изучены мероприятия по минимизации протечек воды. Выполнен расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат до вывода из ремонта и после вывода из него.

В работе была подробно описана методика расчета протечек воды, а именно метод наименьших квадратов и метод силовых машин, также их сравнение. По результатам расчета доказана практическая надежность ранее выполненных мероприятий по минимизации протечек воды.

Ключевые слова: гидроагрегат, протечки, закрытый направляющий аппарат, уплотнения вала, спиральная камера.

АВТОРЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему " Технический контроль протечек воды через конструктивные узлы гидроагрегата для оценки его технического состояния" содержит в себе 59 страниц текстового документа, 10 иллюстраций, 5 таблиц и 45 формул.

Объект исследования: основные узлы гидроагрегата.

Целью работы является анализ существующих методов расчета протечек и эффективность проведенных мероприятий по минимизации протечек

Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:

- а) изучение протечек воды в конструктивных узлах гидроагрегата
- б) минимизация протечек с помощью проведения мероприятий по улучшению состояния уплотнений и конструктивных элементов.

в) Описание методик расчета протечек воды через закрытый направляющий аппарат и их сравнение.

Протечки воды наблюдаются в проточной части гидротурбины через крышку турбины, лабиринтные уплотнения вала агрегата, закрытый направляющий аппарат, закладные части трубопроводов различного назначения. При протечках воды через лабиринтные уплотнения вала, закладные части трубопроводов различного назначения, возможно целенаправленное попадание воды на крышку турбины. Через закрытый направляющий аппарат вместе с протечками теряются кВт·ч электроэнергии в сутки.

Решением проблемы является проведение мероприятий по наладке и замене уплотнения вала и конструктивных элементов направляющего аппарата гидротурбины

Величину протечек и потерь электроэнергии определяют существующими методами расчета.

Были произведены расчеты протечек воды через закрытый направляющий аппарат после вывода из ремонта двумя методами, до вывода в

ремонт, а также сравнение полученных результатов. Величина протечек составила $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$.

В результате с протечками воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 теряется $1260,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии в сутки.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 2 работы в научных журналах и изданиях.

Структура работы состоит из аннотации, автореферата, восьми глав, заключения.

ABSTRACT

Master's thesis on "Technical control of leakage of water through structural components of the hydraulic unit to assess its technical condition" contains a 55-page text document, 10 illustrations, 5 tables and formulas 34.

The object of the research: key components of the hydraulic unit.

The aim of this work is the analysis of existing methods of calculation of leakage and the effectiveness of measures to minimize leaks

Tasks in progress:

a) the study of water leaks in a constructive hydrounit components

b) minimize leakage by implementing measures to improve the condition of the seals and constructive elements.

C) Description of methods of calculation of water leaks through the closed guide vanes and comparing them.

Leakage of water is observed in the flow path of the turbine through the cover of the turbine, labyrinth seal Assembly shaft, guide vanes closed, the embedded parts of pipelines for various purposes. When water leaks through the labyrinth seal of a shaft embedded parts of pipelines for various purposes, perhaps purposeful water gets on the cover of the turbine. Through the closed guide vanes with leakage lost kWh of electricity per day.

The solution is the implementation of the adjustment and replacement of shaft seal and structural elements of the guide apparatus turbines

The amount of leakage and power losses determine the current methods of calculation.

Calculated water leaks through the closed guide vanes after the conclusion of repair two methods to output the repair, as well as the comparison of the obtained results. The magnitude of the leakage amounted to 0.03 0,03 m^3/s

As a result, water leaks through the closed guide vanes of the hydraulic unit No. 9 is lost 1260,7 kWh of electricity per day.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 Основные узлы гидроагрегата	9
1.1 Рабочее колесо.....	9
1.2 Вал турбины	12
1.3 Направляющий аппарат	13
1.4 Крышка турбины	14
2 Основные параметры турбины и уплотнения.....	15
2.1 Основные параметры гидротурбин	15
2.2 Быстроходность гидротурбины	16
2.3 Уплотнение вала.....	18
2.4 Подшипники	19
3 Организация стока воды, учет протечек	20
3.1 Организация стока воды	20
3.2 Учет утечек (протечек) через направляющие аппараты и неплотности затворов	21
4 Оценка технического состояния гидротурбинного оборудования, мероприятия по устранению протечек воды через узлы агрегата	23
4.1 Оценка технического состояния гидротурбинного оборудования	23
4.2 Мероприятия по устранению протечек воды через узлы агрегата	24
5 Программа для измерения протечек воды через закрытый направляющий аппарат	27
6 Методы определения протечек воды через закрытый направляющий аппарат, методика расчета	31
6.1 Методы определения протечек воды	31

6.2 Подготовка к измерениям	31
6.3 Проведение предварительных измерений	33
6.4 Проведение измерения	35
6.5 Обработка результатов.....	37
6.6 Приведение к расчетному напору и вычисление относительной величины протечек	41
7 Расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 после вывода из ремонта.....	43
7.1 Расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 после вывода из ремонта по методу	43
7.2 Расчет протечек воды по методике силовых машин (линейный участок ниже 14 кгс/см ²).....	49
8 Расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата до вывода в ремонт	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	58

ВВЕДЕНИЕ

В основных узлах гидроагрегата наблюдаются протечки воды, а именно через крышку турбины, лабиринтные уплотнения вала агрегата, закрытый направляющий аппарат, закладные части трубопроводов различного назначения. При протечках воды через лабиринтные уплотнения вала, закладные части трубопроводов различного назначения, возможно целенаправленное попадание воды на крышку турбины. Через закрытый направляющий аппарат вместе с протечками теряются кВт·ч электроэнергии в сутки. Решением проблемы является проведение мероприятий по минимизации протечек воды через основные узлы агрегата. Проверить эффективность проведенных мероприятий можно с помощью существующих методов расчета протечек воды.

1 Основные узлы гидроагрегата

1.1 Рабочее колесо

Рабочее колесо гидравлического двигателя может использовать как кинетическую энергию $\frac{v^2}{2g}$, так и потенциальную $\frac{p}{\gamma} + z$, состоящую из энергии давления $\frac{p}{\gamma}$ и энергии положения z . Таким образом, в общем случае

$$H_{исп} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + z_1 - z_2 - \Delta h_{p,к} \quad (1.1)$$

где индексы 1 относятся к параметрам потока перед рабочим колесом, а индекс 2 за ним;

$\Delta h_{p,к}$ - гидравлические потери в рабочем колесе.

Рост единичных мощностей гидротурбин, их пропускной способности и размеров привел к необходимости изыскания новых конструктивных выполнений рабочих колес радиально-осевого типа. В последние годы рабочие колеса выполняются сварными или сварно-литыми. Верхний и нижний ободы, а также лопасти выполняются отдельно и затем завариваются. Соединение частей рабочего колеса также производится или с помощью сварки, или комбинированно иным способом. Для радиально-осевых рабочих колес большое значение имеют конструкция уплотнений и способы разгрузки рабочих колес с целью уменьшения гидравлического осевого усилия. Коэффициенты осевого усилия, которые обычно используются при расчетах осевых сил, соответствуют наличию хорошей разгрузки колес. Для этого должны быть предусмотрены уплотнения, обеспечивающие минимальные зазоры, также применены достаточные разгрузочные отверстия в ободе рабочего колеса или трубопроводы для отвода протечек с целью максимального снижения давления, действующего на верхний торец рабочего колеса. Различные типы радиально-осевых рабочих колес представлены на рисунке 1

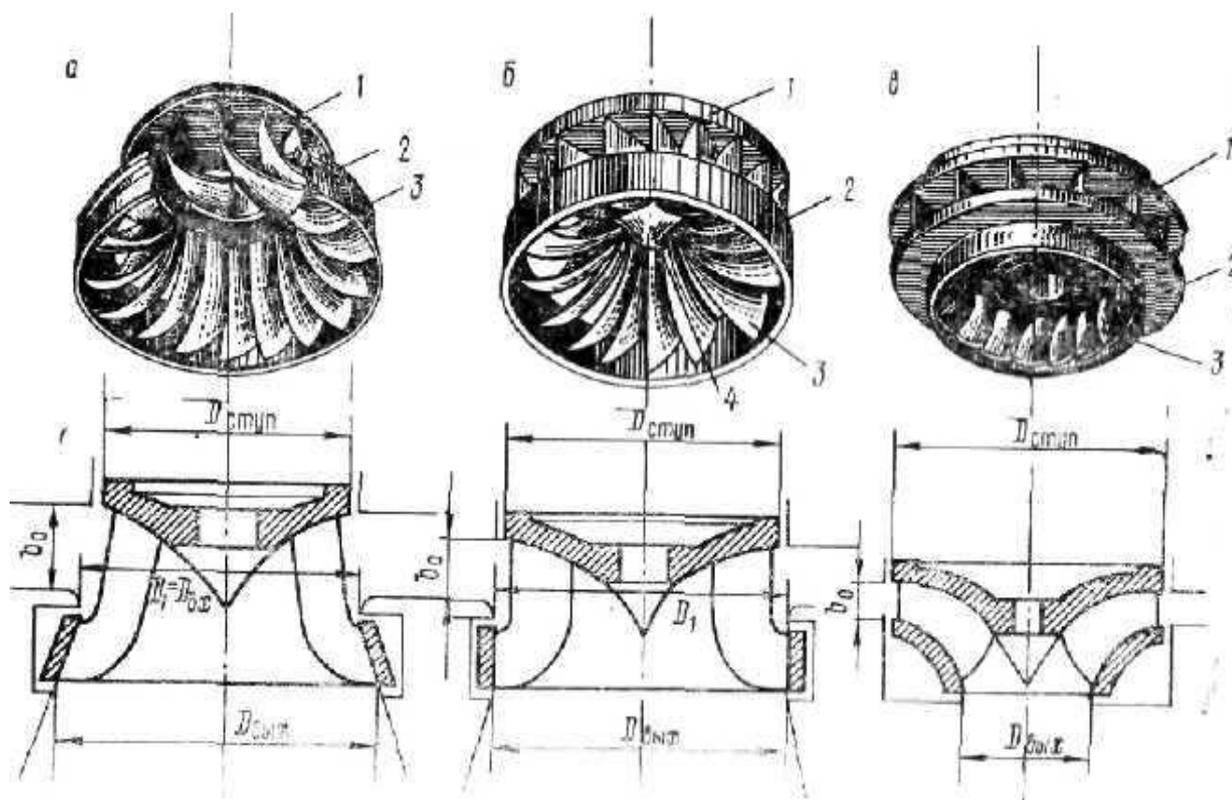


Рисунок 1 - Различные типы радиально-осевых рабочих колес

Основными элементами рабочего колеса являются: ступица (2), посредством которой колесо крепится болтами к фланцу вала; лопасти (1), закрепленные на ступице корневыми сечениями и образующие сложную обтекаемую потоком решетку профилей; обод (3), связывающий концы лопастей, обтекатель (4). Эти элементы, являясь общими для всех радиально-осевых колес, неодинаковы в турбинах разной быстроходности.

За диаметр рабочего колеса D_1 радиально-осевой турбины принимается наибольший диаметр расположения лопастей по входным кромкам, т.е. диаметр, ограничивающий входные кромки лопастей на входе в обод. Размеры рабочих колес радиально-осевых турбин представлены на рисунке 2.

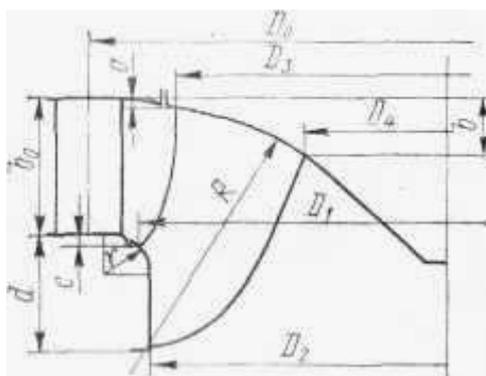


Рисунок 2 - Размеры рабочих колес РО турбин

Радиально-осевое колесо оказывает значительно большее препятствие потоку, чем осевое, и относительные скорости течения в нем меньше; отсюда меньше его пропускная способность, оборотность и быстроходность. Степень изменения этих показателей в большой мере зависит от формы взаимного расположения и размеров отдельных элементов рабочего колеса.

Различие формы проточной части и лопастей радиально-осевых колес определяет тип гидротурбины. Профили рабочих колес радиально-осевого типа в зависимости от быстроходности показаны на рисунке 3.

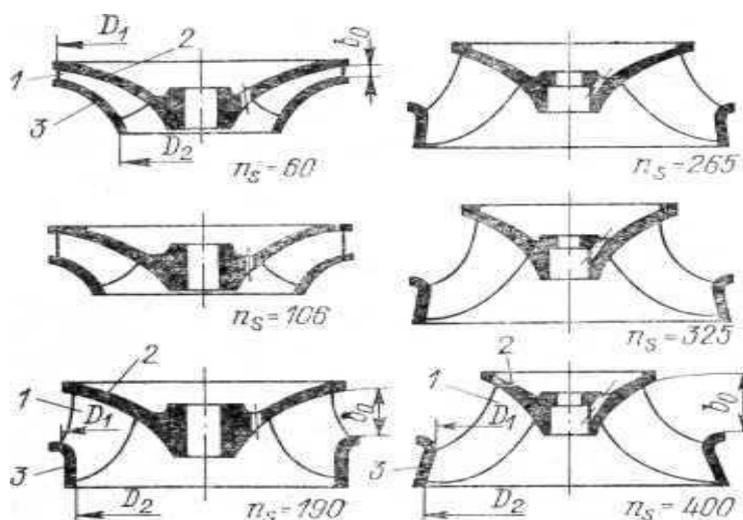


Рисунок 3 - Профили рабочих колес радиально-осевого типа в зависимости от быстроходности, $n_s = 60 \div 400$, (1 – лопасти, 2 – ступица, 3 – обод)

Рабочие колеса радиально-осевого типа применяются для широкого диапазона напоров и коэффициентов быстроходности n_s . Форма проточной части их меняется в зависимости от быстроходности в пределах $n_s = 60 \div 400$

При $n_s = 60 - 106$, входная кромка лопасти обычно располагается в вертикальной плоскости на большем диаметре, чем выходная кромка, т. е. $D_1 > D_2$.

Радиально-осевые колеса с быстроходностью $n_s = 190 \div 265$, применяют при напорах от 100 до 250 м. Радиально-осевые колеса этого типа с менее развитым ободом, практически не имеющим диффузорного расширения, и вертикально расположенными пониженными лопастями.

Кроме перечисленных типов колес с малой и большой быстроходностью существует еще много переходных вариантов, но общий характер изменения параметров рабочего колеса по мере уменьшения или увеличения напора остается закономерным. Количество лопастей в колесах этого типа больше, чем в поворотно-лопастных, что обеспечивает повышение кавитационных качеств радиально-осевых и соответственно уменьшает величину H_s .

1.2 Вал турбины

Вал турбины вертикального агрегата воспринимает нагрузку в виде крутящего момента, передаваемого от рабочего колеса ротору генератора, и в виде осевых сил, определяемых весом вращающихся частей (рабочее колесо, сам вал) и гидродинамическими осевыми усилиями на рабочее колесо от потока воды. Таким образом вал в основном работает на кручение и растяжение. В горизонтальных агрегатах вал дополнительно воспринимает и нагрузку от изгибающего момента. Валы могут быть составными: тогда вал турбины и вал генератора жестко соединяются фланцем. В некоторых случаях агрегат имеет единый вал, что способствует уменьшению общей высоты агрегата. Валы турбин всегда делают полыми. Изготавливаются валы либо цельноковаными

вместе с фланцами , либо сварно-литыми— цилиндрическая часть вала осуществляется в виде поковки из отливки, а литые или кованные фланцы привариваются к цилиндрической части; либо цельносварными— основная часть вала сваривается из двух полуцилиндров («корыт»), изготовленных из толстых листов проката путем изгиба, затем к ней привариваются фланцы. Наибольшее распространение получили первые два способа, но цельнокованные валы применяются при сравнительно небольших диаметрах (менее 1400 мм).

Конструкция валов представлена на рисунке 4

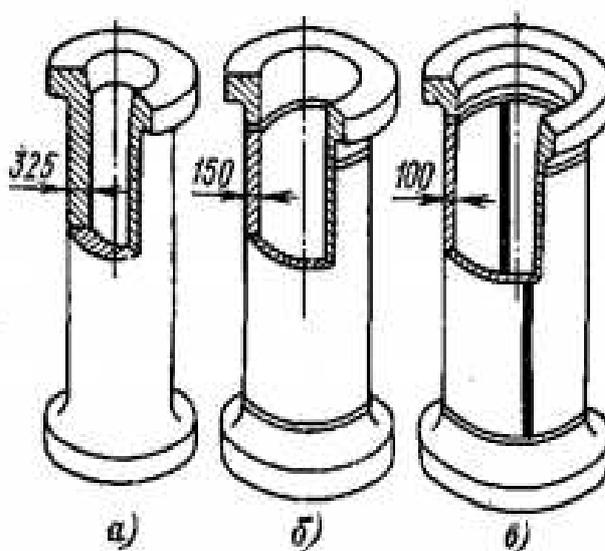


Рисунок 4 - Конструкция валов

1.3 Направляющий аппарат

Направляющий аппарат – запорно-регулирующий орган, который обеспечивает изменение режима работы гидротурбины, путем изменения величины расхода и циркуляции потока, поступающего из спиральной камеры.

В реактивных гидротурбинах направляющий аппарат служит для:

1. регулирования расхода через турбину и создания необходимой циркуляции перед рабочим колесом в соответствии с нагрузкой на агрегат;
2. прекращения доступа воды к рабочему колесу, и остановки турбины;
3. защиты агрегата от разгона при сбросе нагрузки.

Направляющий аппарат включает в себя лопатки, механизмы поворота лопаток, регулирующее кольцо, крышку турбины, нижнее кольцо и опору подпятника.

Направляющий аппарат состоит из кольцевого ряда лопаток обтекаемой формы, которые поворачиваются вокруг собственной оси и устанавливаются под определенным(в зависимости от режима работы) углом, одинаковым для всех лопаток. Цапфы лопаток имеют направляющие втулки, закрепленные в верхнем кольце направляющего аппарата и крышке турбины, и в нижнем кольце направляющего аппарата. Для предотвращения протечек через закрытый направляющий аппарат необходима тщательная пригонка лопаток или применение упругих уплотнений. Специальный механизм, действующий от маслянных сервомоторов, осуществляет управление направляющим аппаратом . Правильно выбранная и хорошо выполненная конструкция направляющего аппарата имеет большое значение для экономичной и надежной работы агрегата. Направляющий аппарат оказывает значительное влияние на величину КПД турбины. Большие протечки воды через уплотнения рабочего колеса при неудачной конструкции могут значительно снизить КПД турбины и, кроме того, явиться причиной вибрации агрегата.

1.4 Крышка турбины

Сварная конструкция из четырех частей, скрепленных болтовыми фланцевыми соединениями, выполнена из листовой углеродистой стали. Для удаления протечек из крышки предусмотрен самослив.

2 Основные параметры турбины и уплотнения

2.1 Основные параметры гидротурбин

Основными энергетическими и конструктивными параметрами гидротурбин являются:

H – рабочий напор, м;

Q – расход воды, $\frac{м^3}{с}$;

N_T – мощность на валу турбины, кВт;

$\eta_{дТ}$ – коэффициент полезного действия турбины;

n – скорость вращения, об/мин;

D_1 – номинальный диаметр рабочего колеса, м;

n_s – коэффициент быстроходности;

σ – коэффициент кавитации.

Рабочий напор определяется:

для реактивных турбин - разностью удельных энергий потока при входе в турбинную камеру и на выходе из турбины в нижний бьеф.

Расход воды - количество воды, протекающей через входное сечение турбины в единицу времени.

Мощность турбины на валу - полезная мощность, получаемая в турбине и используемая в гидрогенераторе.

Кпд- определяется потерями мощности:

объемными потерями, вызываемыми утечкой некоторого объема воды через зазоры в турбине между рабочим колесом и неподвижной ее частью;

гидравлическими потерями, обусловленными вязкостью воды и являющимися потерями энергии потока по его пути в проточной части турбины;

механическими потерями, состоящими из потерь мощности на механическое трение в подшипниках турбины и в подпятнике, и на

гидравлическое трение в зазорах между рабочим колесом и неподвижными частями турбины.

Скорость вращения турбин - число оборотов вала турбины в одну минуту.

Номинальный диаметр рабочего колеса в радиально-осевых турбинах - наибольший диаметр рабочего колеса по входным кромкам его лопастей

Коэффициент быстроходности характеризует гидравлические качества турбины

Коэффициент кавитации определяет начало возникновения в турбине явления кавитации

2.2 Быстроходность гидротурбины

Для характеристики гидравлических качеств турбины по скорости вращения и пропускной способности, а также для сравнения между собой турбин различных типов используется коэффициент быстроходности.

Коэффициент быстроходности равен скорости вращения турбины данного типа, которая работая под напором в 1 м, развивает мощность в 1 л.с.

Этот коэффициент имеет большое значение для выбора турбин, так как дает возможность производить сравнение всех типов и серий турбин, и классифицировать их по скорости вращения, и пропускной способности.

При измерении мощности турбины в киловаттах коэффициент быстроходности будет равен:

$$n_s = 1,167 \frac{n \sqrt{N}}{H \sqrt[4]{H}} \quad (2.1)$$

Определяя быстроходность турбины через расход воды получаем:

$$n_s = 3,65n \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (2.2)$$

В приведенных величинах и с учетом КПД коэффициент быстроходности равен:

$$n_s = 3,65n'_1\sqrt{Q'_1\eta\eta\delta} \quad (2.3)$$

В связи с тем, что коэффициент быстроходности зависит от мощности, скорости вращения и напора, и меняет свою величину при их изменениях, сравнивать турбины одного типа по коэффициенту быстроходности следует, вычисляя его для соответствующих режимов. Обычно коэффициент быстроходности определяют для номинальной мощности турбины при расчетном напоре и нормальной скорости вращения.

Увеличение коэффициента быстроходности при неизменных заданных мощности и напоре позволяют создать турбину с большей скоростью вращения, меньшими габаритами и весом. Из формулы (2.3) видно, что повышение быстроходности можно осуществить увеличением как скорости вращения, так и пропускной способности турбины.

Поэтому основной тенденцией в современном гидротурбостроении является стремление к повышению быстроходности турбин. Однако при повышении быстроходности турбины следует учитывать, что осуществлять это целесообразнее увеличением пропускной способности, так как в этом случае достигается уменьшение диаметра рабочего колеса пропорционально корню квадратному из приведенного расхода и увеличение скорости турбины пропорционально коэффициенту быстроходности, тогда при повышении быстроходности только увеличением приведенной скорости вращения достигается лишь рост скорости вращения турбины

2.3 Уплотнение вала

Уплотнение вала служит для предотвращения попадания воды из проточного тракта в крышку турбины как при работающей, так и при остановленной турбине. Оно состоит из двух уплотнений: рабочего и ремонтного

Для рабочего уплотнения воротникового типа, уплотняющим элементом являются две резиновые или полиуретановые манжеты. Ответной поверхностью трения является поверхность цилиндрической нержавеющей наплавки вала турбины. Для смазки поверхностей трения в уплотнение осуществляется подвод чистой воды в пространство между резиновыми манжетами. Расход и давление воды контролируется расходомерами и датчиками давления, установленными на каждой ветке подводящего трубопровода и манометром, установленным в щите измерительных приборов. Для обеспечения смазки в верхней резиновой манжете выполнены 12 наклонных треугольных пропилов. Незначительная часть чистой воды попадает в крышку турбины в виде протечек. Компоновка уплотнения вала турбины выполнена с учетом доступности ко всем его узлам, нуждающимся в обслуживании при наладке и эксплуатации.

Ремонтное уплотнение используется только при остановленной турбине. Оно позволяет производить ревизию и замену деталей рабочего уплотнения без опорожнения проточного тракта турбины, а также осуществлять герметизацию при возможных аварийных ситуациях с рабочим уплотнением после остановки турбины. Уплотняющим элементом служит резиновый шланг, в который подается сжатый воздух под давлением.

Для работы уплотнения используется вода из трубопровода системы технического водоснабжения. Забор осуществляется от коллектора в шахте турбины. Контроль давления и расхода подводимой воды осуществляется манометром, установленным в щите измерительных приборов и датчиками-реле расхода и давления, установленным на подводящих патрубках. Для

обеспечения качества подводимой воды, на подводящем трубопроводе(в шахте) установлен двухкамерный фильтр тонкой очистки.

2.4 Подшипники

В вертикальных гидроагрегатах применяются два главных направляющих подшипника, один из которых принадлежит турбине, другой генератору. В современных гидротурбинах применяются в основном два вида подшипников: баббитовые на жидкой или густой масляной смазке и резиновые на водяной смазке. В тех случаях, когда для подшипников может быть обеспечена достаточно чистая смазочная вода, в практике больше применяют резиновые подшипники - более простые, экономичные и удобные в эксплуатации

3 Организация стока воды, учет протечек

3.1 Организация стока воды

Основными задачами организации учета стока воды на гидроэлектростанциях являются контроль использования водных ресурсов гидроэлектростанциями, получение оперативных данных для регулирования водного стока через створ гидроузла, а также получение информации для расширения гидрологической изученности и уточнения гидрологических характеристик водотока.

Организация учета стока через гидротурбины должна отвечать требованиям оперативного управления режимами работы гидроагрегатов и гидроэлектростанции в целом и повышению энергетической эффективности гидроэлектростанции в соответствии с нормами СТО РусГидро 04.02.75-2012.

Учитываемыми компонентами стока воды через створ гидроузла являются:

- расход воды через гидротурбины;
- расходы через все входящие в состав гидроузла водосливные и водосбросные сооружения, включая сооружения специального назначения (рыбопропускные устройства, шугосбросы, промывные устройства, транспортные устройства: шлюзы, плотоходы, бревноспуски);
- расход воды через водозаборные сооружения системы технического водоснабжения на собственные (производственные) нужды гидроэлектростанции;
- фильтрационный расход (через основание и тело грунтовых, бетонных сооружений и береговых примыканий);
- расход (протечки, утечки) через неплотности затворов, закрытые направляющие аппараты гидротурбин

Для организации учета стока воды через гидроагрегаты гидроэлектростанции требуется:

- наличие заводских эксплуатационных характеристик гидроагрегатов, уточненных натурными испытаниями или скорректированных на основании опыта эксплуатации;

- оборудование гидротурбин автоматическими средствами измерения расхода воды с показывающими и суммирующими устройствами;

- наличие средств измерения уровней воды в верхнем и нижнем бьефах;

- наличие средств измерения перепадов на сороудерживающих решетках.

Учет стока на гидроэлектростанциях осуществляется непрерывно, среднесуточный расход воды определяется за каждые без исключения сутки с соблюдением требуемой точности измерений.

Расход воды через гидроагрегаты измеряется автоматическими средствами измерения, до их установки расход воды следует определять по эксплуатационным характеристикам гидроагрегатов.

Расходы через неплотности затворов и закрытые направляющие аппараты гидротурбин (протечки, утечки) измеряются или определяются расчетным способом.

3.2 Учет утечек (протечек) через направляющие аппараты и неплотности затворов

На гидроэлектростанции подлежат учету утечки через закрытые направляющие аппараты гидроагрегатов за время нахождения их в резерве, ремонте, а также протечки через неплотности затворов.

Расход утечек через закрытые направляющие аппараты гидроагрегатов следует периодически измерять.

Среднесуточный расход утечек через направляющие аппараты гидроагрегатов $Q_{ум}$ определяется по формуле:

$$Q_{ум} = q \times \Pi_{рез}, \quad (3.1)$$

где q – измеренный расход утечек через закрытый направляющий аппарат агрегата, м³/с;

$P_{рез}$ – число часов простоя всех агрегатов в резерве или ремонте.

Уплотнения затворов должны быть тщательно пригнаны по всему контуру к закладным частям и соприкасающимся кромкам секции.

Оценка состояния уплотнения затворов (боковых, верхнего, нижнего) обязательна при техническом контроле состояния плоских и сегментных затворов.

4 Оценка технического состояния гидротурбинного оборудования, мероприятия по устранению протечек воды через узлы агрегата

4.1 Оценка технического состояния гидротурбинного оборудования

Оценке технического состояния подлежат:

- Закладные части;
 - Рабочее колесо;
 - Вал турбины:
 - Износ шейки вала в зоне рабочего уплотнения;
 - Направляющий аппарат:
 - Плотность прилегания лопаток друг к другу при закрытом с натягом направляющем аппарате;
 - Торцевые зазоры между лопатками и крышкой, лопатками и нижним кольцом направляющего аппарата;
 - Состояние поверхностей крышки турбины и нижнего кольца направляющего аппарата;
 - Состояние уплотнений торцов лопаток в крышке турбины и нижнем кольце направляющего аппарата;
 - Уплотнение вала:
 - Состояние и величину износа уплотнительных колец;
 - Состояние шланга ремонтного уплотнения(проверить давлением 0,5 - МПа(5кгм/см²);
 - Концентричность зазоров между неподвижными элементами уплотнения и рабочей поверхностью вала;
 - Состояние крепежных элементов, их затяг и стопорение;
- Трубопроводы:
- Герметичность соединений трубопроводов.

4.2 Мероприятия по устранению протечек воды через узлы агрегата

Мероприятия по минимизации протечек воды через закрытый направляющий аппарат представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Мероприятия по минимизации протечек воды через закрытый направляющий аппарат

Конструктивные элементы направляющего аппарата	Мероприятия по устранению протечек
1) Механические повреждения, трещины нижнего кольца направляющего аппарата, лопатки направляющего аппарата	Выборка дефекта с контролем полноты его удаления и заварка однородным электродом.
2) торцевой зазор между нижним кольцом и лопаткой направляющего аппарата	Регулировка высотного положения лопатки
3) Торцевой зазор между крышкой турбины и лопаткой направляющего аппарата	Регулировка высотного положения лопатки
4) Повышенный износ лопаток направляющего аппарата	Заменить изношенные подшипники при плановом ремонте
5) Протечки через уплотнения верхних цапф лопаток направляющего аппарата	Замена на новые
6) Протечки через уплотнения лопаток по торцам закрытого направляющего аппарата	Замена на новые

Мероприятия по минимизации протечек воды через уплотнения вала представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Мероприятия по минимизации протечек воды через уплотнения вала

Контролируемые параметры и узлы	Мероприятия по устранению протечек
1) Давление воды в подводящем трубопроводе	Наладить систему технического водоснабжения
2) Расход воды через уплотнения вала	Отрегулировать расход
3)) Торцевой зазор между крышкой турбины и лопаткой направляющего аппарата	Регулировка высотного положения лопатки
4) износ уплотнительных элементов	Заменить на новые
5) Износ шейки вала	Установить подставку под уплотнение
6) Концентричность неподвижных элементов уплотнения вала относительно рабочей поверхности вала	Отрегулировать зазоры

Протечки на крышке турбины определяют визуально. При повышении уровня воды на крышке, оперативный персонал выполняет действия в следующем порядке:

-учесть какие события предшествовали появлению сигнала о повышении уровня воды.

-осмотреть состояние крышки турбины, установить причину появления воды.

-при угрозе затопления лекажного агрегата отключить лекажный насос.

-при необходимости установить передвижной дренажный насос и организовать откачку воды с крышки турбины.

В случае дальнейшего повышения воды уровня воды на крышке турбины(по показаниям не менее двух датчиков воды) или в случае повреждения крышки турбины или цапф направляющем аппарате, начальник смены станции

должен, после согласования с диспетчером ОДУ, произвести разгрузку(без изменения диспетчерского графика нагрузки) и аварийный останов гидроагрегата. При повышении уровня воды до уставки аварийно-высокого уровня гидроагрегат должен быть отключен.

5 Программа для измерения протечек воды через закрытый направляющий аппарат

Измерение протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 при выводе в ремонт:

- Цель измерений:
- Эксплуатационный контроль объема протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата.
- Условия проведения измерений:
- Гидроагрегат в ремонте;
- Аварийно-ремонтный затвор опущен;
- Водовод заполнен до уровня верхнего бьефа;
- Направляющий аппарат закрыт;
- Порядок проведения измерений:
- Изменить настройки записи показаний датчика давления воды в спиральной камере;
- В колонке торможения гидроагрегата включить пневмотормоза;
- Снять давление в спиральной камере гидроагрегата до 14 кгс/см²;
- Установить ключ управления в "режим управления" в положение "ручное";
- Ключом управления электронным ограничителем открыть направляющий аппарат на 3 %;
- На панельном компьютере контролировать процесс опорожнения водовода по показаниям датчика давления воды в спиральной камере;
- При давлении воды в спиральной камере 14 кгс/см²;
- Ключом управления закрыть электронный ограничитель до нуля;
- Установить ключ управления "режим управления" в положение "местное" для предотвращения случайного открытия направляющего аппарата от ключей и кнопок;

- В течении часа контролировать снижение давления в спиральной камер;
- Снять давление в спиральной камере гидроагрегата до уровня нижнего бьефа:

- Установить ключ управления в "режим управления" в положение "ручное";

- Ключом управления электронным ограничителем открыть направляющий аппарат на 3 %;

- На панельном компьютере контролировать процесс опорожнения водовода по показаниям датчика давления воды в спиральной камере;

- По окончании процесса опорожнения водовода:

- Ключом управления закрыть электронный ограничитель до нуля;

- Установить ключ управления "режим управления" в положение "местное" для предотвращения случайного открытия направляющего аппарата от ключей и кнопок;

- Отключить пневмотормоза в колонке торможения гидроагрегата;

- В шахте турбины гидроагрегата наложить стопоры направляющего аппарата;

- Окончание работ:

- Сделать запись об окончании измерений в журнале ремонтов;

- Вернуть исходные настройки;

- Собрать данные по давлению воды в спиральной камере гидроагрегата;

- Используя "Методику определения протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата" определить величину протечек методом наименьших квадратов;

- Предоставить результаты измерения в группу режимов оперативной службы.

Измерение протечек воды через закрытый направляющий аппарат ГА №9 СШГЭС после ремонта:

- Цель измерений:

- Эксплуатационный контроль объема протечек воды через закрытый

направляющий аппарат;

- Условия проведения измерений:
- гидроагрегат №9 в ремонте;
- Водовод заполнен до уровня нижнего бьефа;
- Направляющий аппарат закрыт;
- Проведение измерений:
- Установить запись показаний датчика давления воды в спиральной камере в базу данных сервера блока Т1 с интервалом 30 секунд;
- Проверить наличие записей, разрешающих заполнение водовода до уровня бьефа;
- Открыть байпас аварийно-ремонтного затвора;
- Заполнить водовод до давления в спиральной камере 14 кгс/см²;
- В течении 1 часа контролировать падение давления в спиральной камере;
- Открыть байпас аварийно-ремонтного затвора;
- Заполнить водовод до уровня верхнего бьефа;
- Сделать запись об окончании измерений в журнале ремонтов;
- Вернуть исходные настройки;
- Собрать данные по давлению;
- Используя "Методику определения протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата" определить величину протечек методом наименьших квадратов;
- Предоставить результаты измерения в группу режимов оперативной службы.

Алгоритм расчета протечек через закрытый направляющий аппарат:

1. Оперативный персонал проводит испытание по программе и в идеале повышает дискретность записи;
2. Служба мониторинга оборудования выгружает параметр «давление воды в спиральной камере», берется линейный участок ниже 14 кгс/см² и до конца испытаний (обычно около часа, давление на разных гидроагрегатах

падает до разной величины). Параллельно смотрит по трендам, что аварийно-ремонтный затвор опущен, направляющий аппарат закрыт.

3. Служба мониторинга оборудования делает предобработку выгруженных данных (выбирает 68 значений с одинаковым интервалом);

4. Служба мониторинга оборудования вставляет данные в шаблон xlsx файла, и по разработанной силовыми машинами методике автоматически идет расчет (из перепада давления в расход).

Важно, что расчет не учитывает протечки через аварийно-ремонтный затвор (они никак не контролируются). Т.е. при больших протечках через аварийно-ремонтный затвор, можно «насчитать» маленькие протечки через закрытый направляющий аппарат (т.к. давление будет падать очень медленно).

6 Методы определения протечек воды через закрытый направляющий аппарат, методика расчета

6.1 Методы определения протечек воды

Предсматривается два метода измерения протечек через закрытый направляющий аппарат:

- Метод опорожнения напорного водовода (метод 1);
- Метод заполнения отсасывающей трубы (метод 2);

Метод 1 устанавливается для гидромашин, имеющих напорный водовод с прямолинейным участком длиной не менее двух диаметров водовода

Метод 2 устанавливается для гидромашин, не имеющих напорного водовода или имеющих короткие напорные водоводы длиной не менее двух диаметров водовода

Измерение протечек воды по методу 1 производится при опущенных щитах верхнего бьефа по изменению объема воды в напорном водоводе с предварительным измерением протечек через щит верхнего бьефа или может производиться без предварительного измерения протечек через щит верхнего бьефа

Измерение протечек воды по методу 2 производится при опущенных щитах нижнего бьефа по изменению объема воды в отсасывающей трубе с предварительным измерением протечек через щит нижнего бьефа или может производиться без предварительного измерения протечек через щит нижнего бьефа.

6.2 Подготовка к измерениям

Предварительные работы и предварительные измерения протечек воды следует проводить только при осушенной проточной части гидромашин, при

максимально уплотненных затворах верхнего и нижнего бьефа, и при опущенном на подпятник роторе агрегата в следующем объеме:

- осмотр лопаток и уплотнений лопаток направляющего аппарата, замена поврежденных уплотнений;

- измерение зазоров между смежными лопатками при закрытом с натягом направляющем аппарате и устранение увеличенных зазоров (при натуральных испытаниях во время эксплуатации регулировку направляющего аппарата допускается не производить);

- измерение и регулировка торцевых зазоров при закрытом направляющем аппарате;

- установка кронштейна с индикатором на облицовке шахты гидромашинны для измерения прогиба крышки на диаметре расположения осей поворота лопаток;

- продувка воздухом пьезометрических отводов от спиральной камеры или отсасывающей трубы, установка манометра и проверка отметки установки манометра;

- определение угла наклона и диаметра напорного водовода на мерном участке;

- определение основных размеров отсасывающей трубы;

- проверка исправностей всех клапанов, задвижек и вентилей забора и слива воды из проточной части и установка их в положения, препятствующие появлению во время измерений дополнительных погрешностей из-за протечек воды через запорную арматуру.

После заполнения водой проточной части необходимо удалить воздух из пьезометрических отводов.

Требования безопасности при проведении работ:

- К проведению подготовительных работ и измерений допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности, о чем должна быть сделана запись в соответствующем журнале.

6.3 Проведение предварительных измерений

При наличии протечек через щит верхнего бьефа их измерение рекомендуется производить при постоянной отметке верхнего бьефа. Клапан опорожнения спиральной камеры должен быть открыт.

При наличии протечек через щит нижнего бьефа их измерение рекомендуется производить при постоянной отметке нижнего бьефа.

Во время измерения не допускается перелив воды из спиральной камеры в отсасывающую трубу через нижнее кольцо направляющего аппарата.

При определении протечек через щит верхнего бьефа или нижнего бьефа объемными методом величину протечек определяют по времени заполнения мерной емкости. Измерение протечек воды через щит нижнего бьефа допускается производить по заполнению отсасывающей трубы с помощью поплавкового устройства или манометра и секундомера через равные интервалы времени.

При измерении протечек через щит верхнего бьефа или нижнего бьефа с помощью водослива величину протечек вычисляют по формуле:

$$Q = 1,4h^{2,5}, \quad (6.1)$$

где Q – расход через водослив, m^3/c ;

h – высота слоя воды от уровня поверхности воды до вершины треугольника, м.

Водослив должен быть установлен в напорном водоводе или отсасывающей трубе и уплотнен по кромкам прилегания к водоводу или отсасывающей трубе

Схема измерения протечек через щит нижнего бьефа показана на рисунке

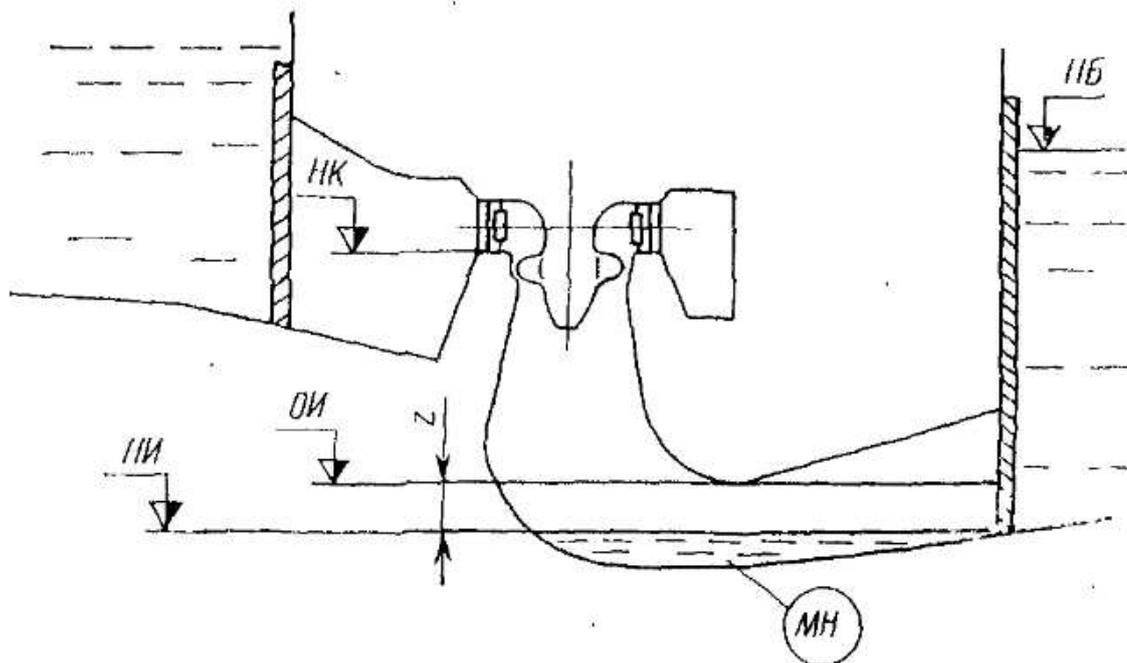


Рисунок 5 - Схема измерения протечек через щит нижнего бьефа

ИБ - отметка нижнего бьефа; НИ - отметка начала измерения; ОИ - отметка окончания измерения; НК - отметка нижнего кольца НА; МН - манометр; z - координата уровня свободной поверхности воды в отсасывающей трубе.

Допускается производить измерение протечек через щит верхнего бьефа или нижнего бьефа по скорости потока.

После предварительных измерений не допускается изменять положение затвора верхнего или нижнего бьефа.

Перед заполнением проточной части гидромашинного аппарата для проведения измерений протечек через закрытый направляющий аппарат по любому из двух методов следует отметить положение крышки гидромашинного аппарата по индикатору, установленному в шахте гидромашинного аппарата.

6.4 Проведение измерения

Измерение протечек воды через закрытый с натягом направляющий аппарат гидромашин по методу 1 следует проводить при заполненной (не выше порога водоприемника) проточной части и при поднятом щите нижнего бьефа.

Схема измерения протечек через направляющий аппарат по методу 1 представлена на рисунке 6

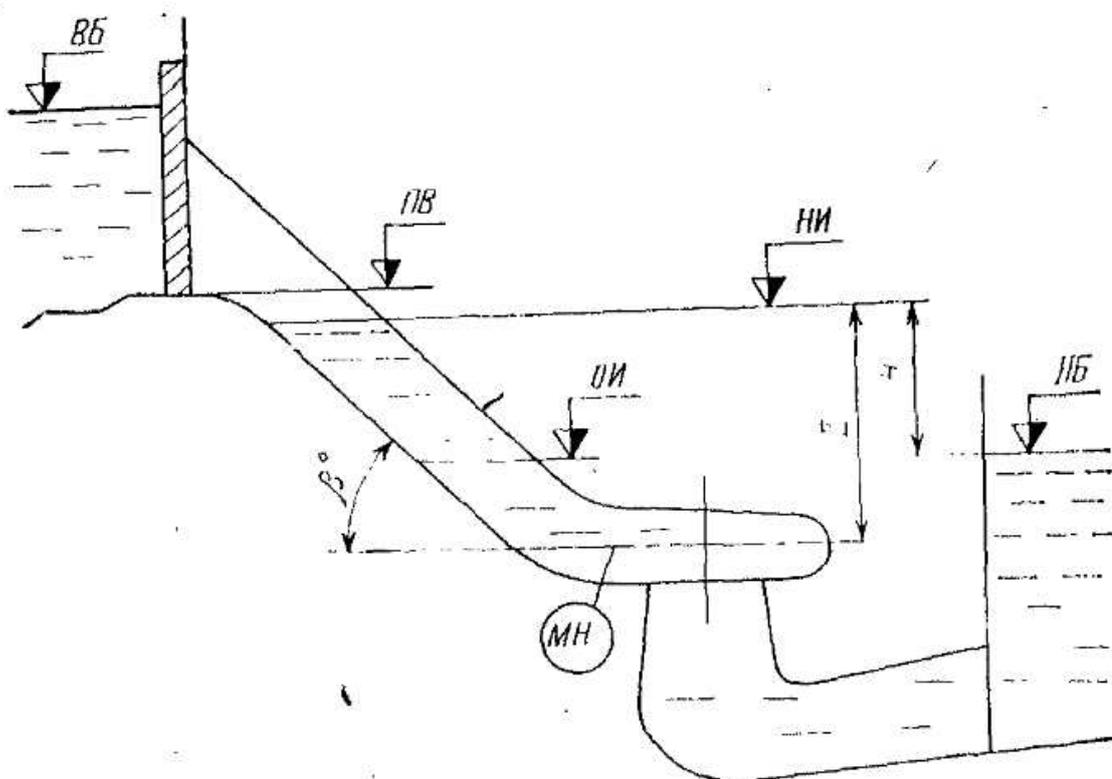


Рисунок 6 - схема измерения протечек через направляющий аппарат по методу 1

β – угол наклона напорного водова к горизонтали; ВБ - отметка верхнего бьефа; НБ - отметка нижнего бьефа; ПВ - отметка порога водоприемника; НИ - отметка начала измерения; ОИ - отметка окончания измерения; z - координата уровня свободной поверхности в напорном водоводе; H - напор, создающий протечки через закрытый НА; МН - манометр.

Измерение уровня свободной поверхности в напорном водоводе следует производить по манометру и секундомеру через равные интервалы времени, при этом необходимо получать не менее 20 замеров.

Одновременно необходимо измерять величину прогиба крышки по индикатору и уровни верхнего и нижнего бьефов по стационарным устройствам.

Измерение протечек воды через закрытый с натягом направляющий аппарат гидромашин по методу 2 следует проводить при заполненной камере и осушенной отсасывающей трубе. Щит верхнего бьефа должен быть поднят полностью или частично.

Измерение уровня свободной поверхности в отсасывающей трубе следует проводить по манометру и секундомеру через равные интервалы времени, при этом необходимо получать не менее 20 замеров.

Схема измерения протечек через направляющий аппарат по методу 2 представлена на рисунке 7

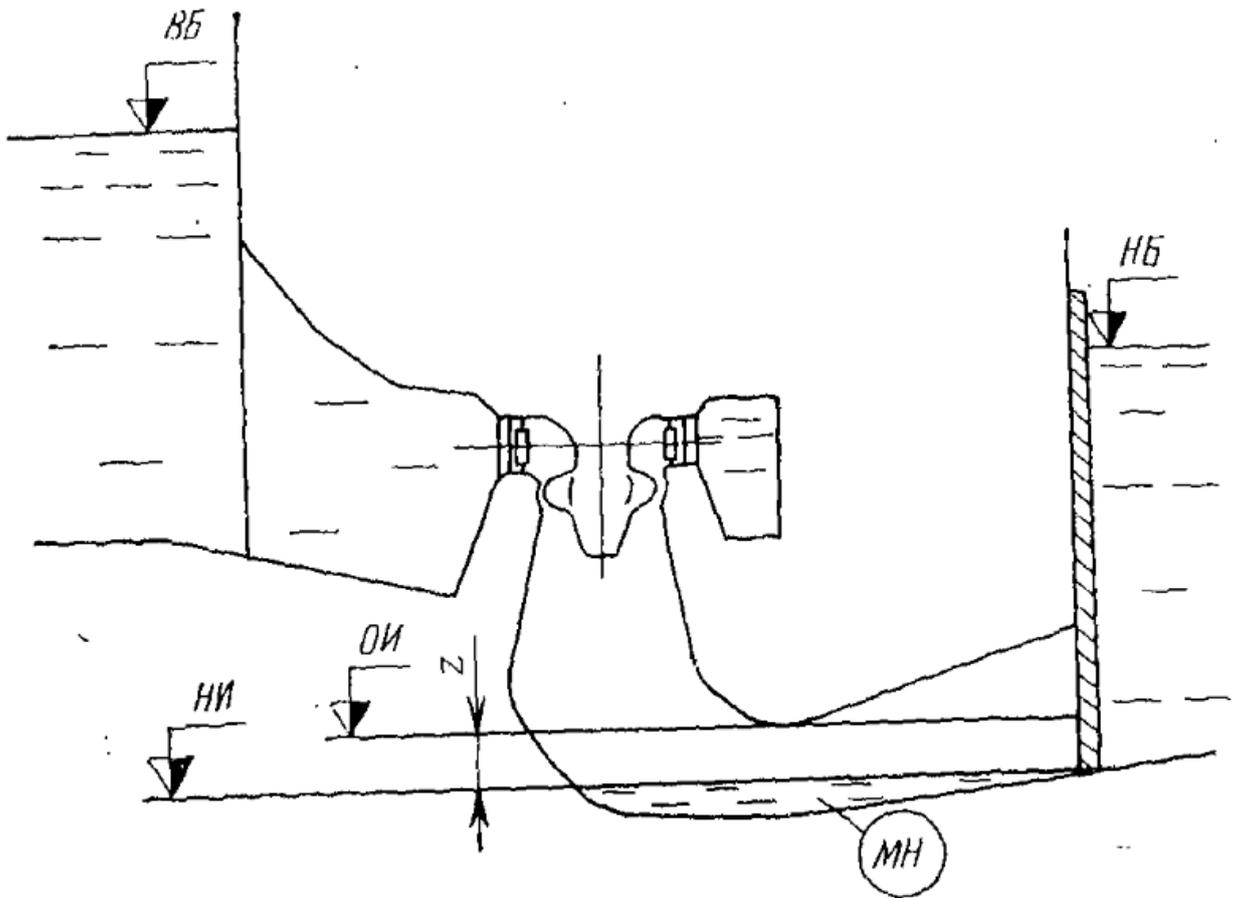


Рисунок 7 - схема измерения протечек через направляющий аппарат по методу 2

ВБ - отметка верхнего бьефа; НБ - отметка нижнего бьефа; НИ - отметка начала измерения; ОИ - отметка окончания измерения; МН - манометр; z - координата уровня свободной поверхности воды в отсасывающей трубе.

6.5 Обработка результатов

Вычисление величины протечек, измеренных по методу 1

На прямолинейном участке напорного водовода с постоянной площадью свободной поверхности изменение объема воды можно представить в виде:

$$\Delta V = dzS = (Q_{ВБ} - Q_{НА})dt, \quad (6.2)$$

где V – объем, m^3 ;

z – координата уровня свободной поверхности воды в напорном водоводе, м;

$S = \frac{\pi D^2}{\sin\beta}$ – площадь свободной поверхности, m^2 ;

D – диаметр напорного водовода, м;

β – угол наклона напорного водова к горизонтали;

Q_{BB} – величина протечек через щит ВБ, m^3/c ;

Q_{HA} – величина протечек через НА, m^3/c ;

t – время, с.

При условии $Q_{BB} > Q_{HA}$ уровень воды в напорном водоводе повышается и dz имеет положительное значение;

при условии $Q_{BB} < Q_{HA}$ уровень воды в напорном водоводе снижается и dz имеет отрицательное значение;

при условии $Q_{BB} = Q_{HA}$ уровень воды в напорном водоводе не меняется и $dz = 0$, т.е. является постоянной величиной.

Из формулы 6.2 следует:

$$Q_{HA} = Q_{BB} - S \frac{dz}{dt} \quad (6.3)$$

По экспериментальной зависимости $z=f(t)$ можно получить ряд значений dz/dt . Тогда имея величину протечек Q_{BB} через щит верхнего бьефа и зная площадь свободной поверхности воды в напорном водоводе S , можно определить искомое значение Q_{HA} для соответствующих значений z .

При измерении протечек воды по методу 1 без предварительного измерения протечек через щит верхнего бьефа величину протечек Q_{HA} через закрытый направляющий аппарат можно выразить величиной напора H , при котором проводят измерения:

$$Q_{HA} = \mu F \sqrt{2gH}, \quad (6.4)$$

где H – напор, создающий протечки при измерениях, м;

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

μ – коэффициент расхода;

F – суммарная площадь зазоров, m^2

Из формул 6.3 и 6.4 получаем:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_{BB}}{S} - \frac{\mu F \sqrt{2g}}{S} \sqrt{H}. \quad (6.5)$$

Проводя одновременные измерения отметок в водоводе и нижнем бьефе через равные интервалы времени, получают зависимость изменения уровня в водоводе z и напора H от времени t .

После этого в первом приближении строится график зависимости

$$\frac{dz}{dt} = f(\sqrt{H})$$

В виде

$$\frac{z_{i+1} - z_i}{t_{i+1} - t_i} = f\left(\sqrt{\frac{H_{i+1} - H_i}{2}}\right) \quad (6.6)$$

Если величины μ , F и S считать постоянными, приближенная формула будет иметь вид:

$$\frac{dz}{dt} = a - b\sqrt{H} \quad (6.7)$$

Коэффициенты a и b определяется из графика прямой, описывающей уравнением, полученным графическим осреднением или по методу наименьших квадратов. График прямой представлен на рисунке 8

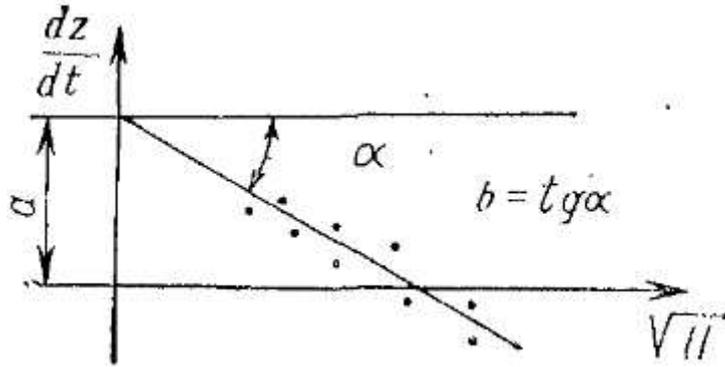


Рисунок 8 - график зависимости $\frac{dz}{dt} = f(\sqrt{H})$

$$Q_{BB} = aS \quad (6.8)$$

$$Q_{HA} = bS\sqrt{H} \quad (6.9)$$

Вычисление величины протечек, измеренных по методу 2.

Изменение объема воды в отсасывающей трубе можно представить в виде:

$$\Delta V = dz \left(S + \frac{dS}{2} \right) = (Q_{HA} + Q_{HB})dt, \quad (6.10)$$

где V — объем, m^3 ;

z — координата уровня свободной поверхности воды в отсасывающей трубе, м;

$S = \frac{\pi D^2}{4 \sin \beta}$ — площадь свободной поверхности воды в начале измерения, m^2 ;

Q_{BB} — величина протечек через щит ВБ, m^3/c ;

Q_{HA} — величина протечек через НА, m^3/c ;

t — время, с.

Из формулы 6.8 получаем:

$$Q_{HA} = \left(S + \frac{dS}{2}\right) \frac{dz}{dt} - Q_{HB} \quad (6.11)$$

По экспериментальной зависимости $z=f(t)$ можно получить ряд значений dz/dt . Тогда имея величину протечек Q_{HB} через щит нижнего бьефа и зная зависимость измерения площади свободной поверхности воды S от уровня воды z , можно определить искомую величину протечек Q_{HA} для ряда значений z . При этом для разных значений z должны получаться одинаковые величины протечек Q_{HA} . На рисунке 9 представлен график зависимости $Q_{HA} = f(z)$

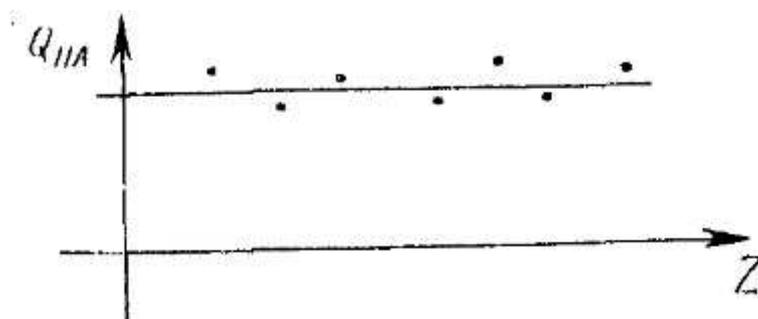


Рисунок 9 - график зависимости $Q_{HA} = f(z)$

При измерении протечек воды по методу 2 без предварительного измерения протечек через щит нижнего бьефа для определения величины протечек Q_{HA} через закрытый НА по формуле могут быть использованы результаты любых трех соседних измерений $z=f(t)$. При разных сочетаниях уровней z должны получаться одинаковые величины протечек Q_{HA} .

6.6 Приведение к расчетному напору и вычисление относительной величины протечек

Для приведения к расчетному напору без учета изменения торцевых зазоров лопаток направляющего аппарата при $H_{расч}$ приближенная формула примет вид

$$Q_{HA}^* = \frac{Q_{HA} \sqrt{H_{расч}}}{\sqrt{H}}, \quad (6.12)$$

где Q_{HA}^* — величина протечек через НА при расчетном напоре, $м^3/с$;

Q_{HA} — протечки через НА измеренные, $м^3/с$;

$H_{расч}$ — расчетный напор, м;

H — напор, при котором проводят измерение протечек через НА, м.

Относительная величина протечек через НА определяется по расходу воды при расчетном напоре и номинальной мощности гидромашины;

$$Q_{HA}^- = \frac{Q_{HA}^*}{Q_{расч}}, \quad (6.13)$$

где Q_{HA}^- — относительная величина протечек через НА, $м^3/с$;

Q_{HA}^* — величина протечек через НА при расчетном напоре, $м^3/с$;

$Q_{расч}$ — расход воды через гидромашину при расчетном напоре и номинальной мощности.

7 Расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 после вывода из ремонта

7.1 Расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 после вывода из ремонта по методу 1

Для расчета протечек воды через направляющий аппарат гидроагрегатов СШГЭС вводятся исходные

Исходные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Исходные данные

Наименование параметра	Значение	Ед. измерения	Примечание
Номер гидроагрегата	9	-	Вводится вручную
Дата	04.02.2020	-	Вводится вручную
Уровень ВБ	520,27	м	Вводится вручную
Уровень НБ	323,72	м	Вводится вручную
Напор	196,55	м	Рассчитывается автоматически
Площадь свободной поверхности водовода	45,76	м ²	Постоянная величина
Расчетный напор турбины	194	м	Постоянная величина
Номинальный расход турбины	357,2	м ³ /с	Постоянная величина
Разница отметок манометра и НБ	-2,72	м	Рассчитывается автоматически

Пояснение к порядку ввода исходных данных:

1. Протечки определяются по изменению давления в спиральной камере при закрытом направляющем аппарате, опущенном на порог затворе верхнего бьефа и отсутствии отбора воды из проточной части гидроагрегата

2. Запись показаний давления в спиральной камере осуществляется на линейном участке водовода, то есть с 14 кгс/см² до 9 кгс/см²

3. Далее снимают показания давления с манометра расположенного в спиральной камере.

Показания давления снятые с помощью манометра представлены в таблице 4

Таблица 4 - Опытные данные давление в спиральной камере

№ измерения	Время	Отсчет	P кгс/см ²	мин	dt,с
1	22:44:27	0	13,93		0,00
2	22:45:33	1	13,95	0	66,00
3	22:46:39	2	13,94	1	66,00
4	22:47:45	3	13,94	2	66,00
5	22:48:51	4	13,93	3	66,00
6	22:49:57	5	13,90	4	66,00
7	22:51:03	6	13,91	5	66,00
8	22:52:09	7	13,88	7	66,00
9	22:53:15	8	13,89	8	66,00
10	22:54:21	9	13,89	9	66,00
11	22:55:27	10	13,89	10	66,00
12	22:56:33	11	13,88	11	66,00
13	22:57:39	12	13,88	12	66,00
14	22:58:45	13	13,88	13	66,00
15	22:59:51	14	13,86	14	66,00
16	23:00:57	15	13,84	15	66,00
17	23:02:03	16	13,85	16	66,00
18	23:03:09	17	13,84	18	66,00
19	23:04:15	18	13,84	19	66,00
20	23:05:21	19	13,84	20	66,00
21	23:06:27	20	13,84	21	66,00
22	23:07:33	21	13,83	22	66,00
23	23:08:39	22	13,83	23	66,00
24	23:09:45	23	13,83	24	66,00
25	23:10:51	24	13,83	25	66,00
26	23:11:57	25	13,83	26	66,00
27	23:13:03	26	13,83	27	66,00
28	23:14:09	27	13,83	29	66,00
29	23:15:15	28	13,83	30	66,00
30	23:16:21	29	13,83	31	66,00
31	23:17:27	30	13,82	32	66,00
32	23:18:33	31	13,82	33	66,00

Продолжение таблицы 4

№ измерения	Время	Отсчет	P кгс/см ²	мин	dt,с
33	23:19:39	32	13,81	34	66,00
34	23:20:45	33	13,80	35	66,00
35	23:21:51	34	13,79	36	66,00
36	23:22:57	35	13,80	37	66,00
37	23:24:03	36	13,78	38	66,00
38	23:25:09	37	13,78	40	66,00
39	23:26:15	38	13,77	41	66,00
40	23:27:21	39	13,77	42	66,00
41	23:28:27	40	13,76	43	66,00
42	23:29:33	41	13,76	44	66,00
43	23:30:39	42	13,74	45	66,00
44	23:31:45	43	13,75	46	66,00
45	23:32:51	44	13,73	47	66,00
46	23:33:57	45	13,75	48	66,00
47	23:35:03	46	13,73	49	66,00
48	23:36:09	47	13,74	51	66,00
49	23:37:15	48	13,74	52	66,00
50	23:38:21	49	13,73	53	66,00
51	23:39:27	50	13,73	54	66,00
52	23:40:33	51	13,73	55	66,00
53	23:41:39	52	13,72	56	66,00
54	23:42:45	53	13,72	57	66,00
55	23:43:51	54	13,72	58	66,00
56	23:44:57	55	13,72	59	66,00
57	23:46:03	56	13,71	60	66,00
58	23:47:09	57	13,71	62	66,00
59	23:48:15	58	13,67	63	66,00
60	23:49:21	59	13,69	64	66,00
61	23:50:27	60	13,68	65	66,00
64	23:53:45	63	13,68	68	66,00
65	23:54:51	64	13,67	69	66,00
66	23:55:57	65	13,67	70	66,00
67	23:57:03	66	13,67	71	66,00
68	23:58:09	67	13,65	73	66,00

По опытным данным давления рассчитывают напор

$$H = P \cdot 10 + P_{\text{раз}} = 13,94 \cdot 10 - 2,72 = 136,64 \text{ м}, \quad (7.1)$$

где H – напор

$P_{\text{раз}}$ – разница отметок манометра и нижнего бьефа

Находим уровень свободной поверхности в напорном водоводе:

$$dz = H_2 - H_1 = 136,64 - 136,77 = -0,1 \text{ м}, \quad (7.2)$$

где dz – уровень свободной поверхности в напорном водоводе

Определим число x

$$x = \sqrt{dz} = \sqrt{-0,1} = 0 \quad (7.3)$$

Определим число y

$$y = \frac{dz}{dt} = -\frac{0,1}{66} = -0,0021 \quad (7.4)$$

Полученные данные сводим в таблицу 5

Таблица 5 - Расчет

Р, кгс/см ²	Отсчет	корень Н, м ^{0,5}	Напор, м	Напор, м	dt	дельта м	корень из Н	dz/dt
						dz	x	y
13,94	0	11,69	136,64					
13,95	1	11,70	136,77	136,77	66,00	-0,138	-	-0,0021
13,94	2	11,69	136,71	136,71	66,00	0,062	0,125	0,0009
13,94	3	11,69	136,68	136,68	66,00	0,030	0,087	0,0005
13,93	4	11,69	136,55	136,55	66,00	0,135	0,184	0,0020
13,90	5	11,68	136,32	136,32	66,00	0,232	0,241	0,0035

Продолжение таблицы 5

Р, кгс/см ²	Отсчет	корень Н, м ^{0,5}	Напор, м	Напор, м	dt	дельта м	корень из Н	dz/dt
13,91	6	11,68	136,35	136,35	66,00	-0,037	-	-0,0006
13,89	7	11,67	136,14	136,14	66,00	0,213	0,231	0,0032
13,89	8	11,67	136,22	136,22	66,00	-0,080	-	-0,0012
13,89	9	11,67	136,17	136,17	66,00	0,051	0,113	0,0008
13,89	10	11,67	136,15	136,15	66,00	0,021	0,073	0,0003
13,89	11	11,67	136,13	136,13	66,00	0,014	0,059	0,0002
13,88	12	11,66	136,06	136,06	66,00	0,068	0,131	0,0010
13,88	13	11,66	136,06	136,06	66,00	0,001	0,018	0,0000
13,86	14	11,66	135,89	135,89	66,00	0,171	0,207	0,0026
13,84	15	11,65	135,68	135,68	66,00	0,210	0,229	0,0032
13,85	16	11,65	135,77	135,77	66,00	-0,090	-	-0,0014
13,84	17	11,65	135,70	135,70	66,00	0,069	0,131	0,0010
13,84	18	11,65	135,71	135,71	66,00	-0,011	-	-0,0002
13,84	19	11,65	135,69	135,69	66,00	0,021	0,072	0,0003
13,84	20	11,65	135,65	135,65	66,00	0,040	0,100	0,0006
13,83	21	11,64	135,57	135,57	66,00	0,088	0,148	0,0013
13,83	22	11,64	135,55	135,55	66,00	0,020	0,070	0,0003
13,83	23	11,64	135,55	135,55	66,00	-0,001	-	0,0000
13,83	24	11,64	135,54	135,54	66,00	0,003	0,027	0,0000
13,83	25	11,64	135,54	135,54	66,00	0,005	0,037	0,0001
13,83	26	11,64	135,54	135,54	66,00	-0,005	-	-0,0001
13,83	27	11,64	135,54	135,54	66,00	0,000	-	0,0000
13,83	28	11,64	135,54	135,54	66,00	0,002	0,024	0,0000
13,83	29	11,64	135,54	135,54	66,00	-0,002	-	0,0000
13,82	30	11,64	135,50	135,50	66,00	0,047	0,108	0,0007
13,82	31	11,64	135,47	135,47	66,00	0,032	0,089	0,0005
13,81	32	11,63	135,35	135,35	66,00	0,117	0,171	0,0018
13,80	33	11,63	135,30	135,30	66,00	0,044	0,105	0,0007
13,80	34	11,63	135,24	135,24	66,00	0,060	0,122	0,0009
13,80	35	11,63	135,28	135,28	66,00	-0,037	-	-0,0006
13,78	36	11,62	135,10	135,10	66,00	0,185	0,215	0,0028
13,78	37	11,62	135,09	135,09	66,00	0,002	0,022	0,0000
13,78	38	11,62	135,04	135,04	66,00	0,057	0,119	0,0009
13,77	39	11,62	135,02	135,02	66,00	0,015	0,061	0,0002
13,76	40	11,61	134,89	134,89	66,00	0,129	0,180	0,0020
13,76	41	11,61	134,88	134,88	66,00	0,008	0,045	0,0001
13,74	42	11,60	134,65	134,65	66,00	0,233	0,241	0,0035
13,75	43	11,61	134,74	134,74	66,00	-0,092	-	-0,0014
13,73	44	11,60	134,57	134,57	66,00	0,178	0,211	0,0027
13,75	45	11,61	134,78	134,78	66,00	-0,211	-	-0,0032
13,73	46	11,60	134,59	134,59	66,00	0,188	0,217	0,0029
13,75	47	11,61	134,73	134,73	66,00	-0,146	-	-0,0022
13,74	48	11,60	134,65	134,65	66,00	0,087	0,148	0,0013
13,74	49	11,60	134,63	134,63	66,00	0,014	0,060	0,0002
13,74	50	11,60	134,64	134,64	66,00	-0,005	-	-0,0001
13,73	51	11,60	134,61	134,61	66,00	0,028	0,084	0,0004

Продолжение таблицы 5

Р, кгс/см ²	Отсчет	корень Н, м ^{0,5}	Напор, м	Напор, м	dt	дельта м	корень из Н	dz/dt
13,72	52	11,60	134,50	134,50	66,00	0,111	0,166	0,0017
13,72	53	11,60	134,51	134,51	66,00	-0,010	-	-0,0001
13,72	54	11,60	134,50	134,50	66,00	0,008	0,044	0,0001
13,72	55	11,60	134,50	134,50	66,00	0,004	0,030	0,0001
13,71	56	11,59	134,36	134,36	66,00	0,139	0,187	0,0021
13,71	57	11,59	134,37	134,37	66,00	-0,012	-	-0,0002
13,67	58	11,58	134,01	134,01	66,00	0,358	0,299	0,0054
13,70	59	11,59	134,23	134,23	66,00	-0,219	-	-0,0033
13,68	60	11,58	134,11	134,11	66,00	0,117	0,171	0,0018
13,68	61	11,58	134,08	134,08	66,00	0,030	0,086	0,0005
13,68	62	11,58	134,10	134,10	66,00	-0,015	-	-0,0002
13,68	63	11,58	134,04	134,04	66,00	0,057	0,119	0,0009
13,67	64	11,58	133,99	133,99	66,00	0,055	0,117	0,0008
13,67	65	11,57	133,97	133,97	66,00	0,017	0,065	0,0003
13,67	66	11,57	133,97	133,97	66,00	-0,004	-	-0,0001
13,65	67	11,57	133,81	133,81	66,00	0,160	0,200	0,0024

Коэффициент b определяем по графику представленном на рисунке 8

$$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{0,0026}{0,234} = 0,011 \quad (7.5)$$

$$a = 0,0026$$

Зная коэффициенты a и b определим протечки воды при среднем значении \sqrt{H}

$$Q_{HA} = \frac{bS\sqrt{H}}{dt} = \frac{0,011 \cdot 45,76 \cdot 11,46}{66} = 0,026 \text{ м}^3/\text{с} \quad (7.6)$$

Протечки через щит НБ равен:

$$Q_{BB} = \frac{aS}{dt} = \frac{0,0026 \cdot 45,76}{66} = 0,0018 \text{ м}^3/\text{с} \quad (7.7)$$

Протечки при величине напора 194 м равны:

$$Q_{HA}^* = \frac{Q_{HA} \sqrt{H_{расч}}}{\sqrt{H}} = \frac{0,026 \cdot \sqrt{194}}{11,46} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с} \quad (7.8)$$

Относительная величина протечек через закрытый направляющий аппарат:

$$Q_{HA}^- = \frac{Q_{HA}^*}{Q_{расч}} = \frac{0,032}{357,2} \cdot 100 = 0,01\% \quad (7.9)$$

По методу наименьших квадратов протечки определяются следующим образом:

определяют $x_{ср}$ и $y_{ср}$

По формуле 7.10 определяют коэффициент b :

$$b = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (7.10)$$

коэффициент a определяется по уравнению:

$$a = y_{ср} - bx_{ср} \quad (7.11)$$

И после этого определяют протечки.

7.2 Расчет протечек воды по методике силовых машин (линейный участок ниже 14 кгс/см²)

Протечки воды по методике силовых машин определяют по формуле:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (7.12)$$

где Q – расход воды,

V – объем,

t – время

Объем цилиндра (на участке водовода)

$$V = S_{осн} \cdot \Delta h = 45,76 \cdot 2,82 = 129,11 \text{ м}^3, \quad (7.13)$$

где $S_{осн}$ – площадь основания,

V – объем,

Δh – высота цилиндра

$$S_{осн} = \pi R^2, \quad (7.14)$$

где $S_{осн}$ – площадь основания,

π – константа,

R – радиус водовода на линейном участке

$$S_{осн} = 3,1415 \cdot 3,816^2 = 45,76 \text{ м}^2$$

Давление воды:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 = 13,9 \text{ кг/см}^2 \quad (7.15)$$

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h_2 = 13,65 \text{ кг/см}^2 \quad (7.16)$$

Высота цилиндра из перепада давления:

$$h_1 = \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{13,9 \cdot 98000}{1000 \cdot 9,8} = 139,35 \text{ м/с}$$

$$h_2 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} = \frac{13,65 \cdot 98000}{1000 \cdot 9800} = 136,53 \text{ м/с}$$

$$\text{Высота цилиндра } \Delta h = h_1 - h_2 = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = 2,82 \text{ м/с} \quad (7.17)$$

Протечки воды через закрытый направляющий аппарат

$$Q = \frac{S_{\text{очн}} \cdot (P_1 - P_2) \cdot 9800}{dt \cdot \rho \cdot g} \quad (7.18)$$

$$Q = \frac{45,76 \cdot (13,9 - 13,65) \cdot 98000}{4422 \cdot 1000 \cdot 9,8} = 0,029 \text{ м}^3/\text{с}$$

Время dt:

$$dt = t_2 - t_1 \quad (7.19)$$

$$dt = ((23 - 22) \cdot 3600) + ((58 - 44) \cdot 60) + 9 - 27 = 4422$$

Относительная величина протечек через закрытый направляющий аппарат:

$$Q_{\text{НА}}^- = \frac{Q}{Z_{\text{м}}} = \frac{0,029}{321} \cdot 100 = 0,009, \quad (7.20)$$

где $Z_{\text{м}}$ — отметка установки манометра.

Полученные данные сводят в протокол

Ниже на рисунке 10 представлен график изменения давления в спиральной камере

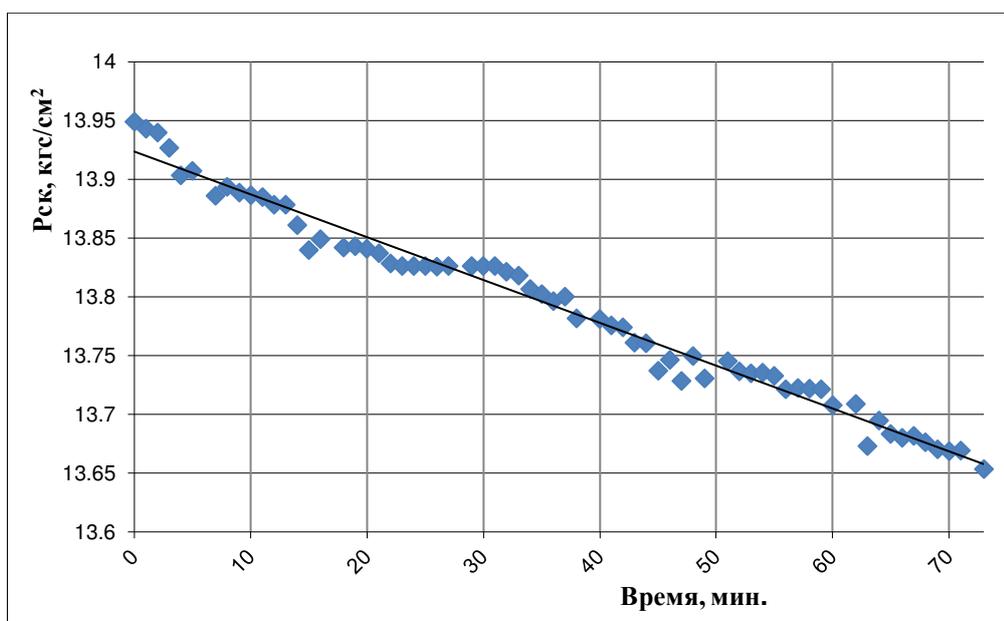


Рисунок 10 - График изменения давления в спиральной камере

В протоколе указываются опытные данные давления в спиральной камере

Опытные данные представлены на в таблице 6.

Таблица 6 - Опытные данные давления в спиральной камере

Время	Рск, кгс/см ²	Время	Рск, кгс/см ²	Время	Рск, кгс/см ²
22:44:27	13,94	23:05:21	13,84	23:24:03	13,78
22:45:33	13,95	23:06:27	13,84	23:25:09	13,78
22:46:39	13,94	23:07:33	13,83	23:26:15	13,78
22:47:45	13,94	23:08:39	13,83	23:27:21	13,77
22:48:51	13,93	23:09:45	13,83	23:28:27	13,76
22:49:57	13,89	23:10:51	13,83	23:29:33	13,76
22:53:15	13,89	23:11:57	13,83	23:30:39	13,74
22:54:21	13,89	23:13:03	13,83	23:31:45	13,75
22:55:27	13,89	23:14:09	13,83	23:32:51	13,73
22:56:33	13,89	23:15:15	13,83	23:33:57	13,75
22:57:39	13,88	23:16:21	13,83	23:35:03	13,73
22:58:45	13,88	23:17:27	13,82	23:36:09	13,75
22:59:51	13,86	23:18:33	13,82	23:37:15	13,74
23:00:57	13,84	23:19:39	13,81	23:38:21	13,74
23:02:03	13,85	23:20:45	13,80	23:39:27	13,74
23:03:09	13,84	23:21:51	13,80	23:40:33	13,73
23:04:15	13,84	23:22:57	13,80	23:41:39	13,72

Результат измерений протечек представлен в таблице 7

Таблица 7 - Результаты расчетов

Параметр	Ед. измерения	Значение
1) Протечки через закрытый НА ГА9	m^3/c	0,03
2) Относительная величина протечек	%	0,01

Зная протечки, можно определить потери электроэнергии через закрытый направляющий аппарата гидроагрегата №9 в сутки.

Рассчитаем удельный расход, чтобы определить, сколько нужно пропустить расхода через турбину для выработки одного кВт·ч электроэнергии.

$$q_{уд} = \frac{Q_m \cdot 3600}{9,81 \cdot Q_m \cdot H \cdot \eta_{ген}} = \frac{3600}{9,81 \cdot 194 \cdot 0,92} = 2,056 \text{ м}^3/\text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (7.21)$$

Зная удельный расход определим потери электроэнергии в сутки

$$\Delta P = \frac{Q_{протечки}}{q_{уд}} \cdot 24 \cdot 3600 = \frac{0,03}{2,056} \cdot 24 \cdot 3600 = 1260,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (7.22)$$

С протечками воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 теряется 1260,7 кВт·ч электроэнергии в сутки.

8 Расчет протечек воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата до вывода в ремонт

Протечки воды по методике силовых машин определяют по формуле:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (8.1)$$

где Q – расход воды,

V – объем,

t – время

Объем цилиндра (на участке водовода)

$$V = S_{осн} \cdot \Delta h = 45,76 \cdot 2,82 = 129,11 \text{ м}^3, \quad (8.2)$$

где $S_{осн}$ – площадь основания,

V – объем,

Δh – высота цилиндра

$$S_{осн} = \pi R^2, \quad (8.3)$$

где $S_{осн}$ – площадь основания,

π – константа,

R – радиус водовода на линейном участке

$$S_{осн} = 3,1415 \cdot 3,816^2 = 1780,064 \text{ м}^2$$

Давление воды:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 = 13,97 \text{ кг/см}^2 \quad (8.4)$$

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h_2 = 10,08 \text{ кг/см}^2 \quad (8.5)$$

Высота цилиндра из перепада давления:

$$h_1 = \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{13,97 \cdot 98000}{1000 \cdot 9,8} = 139,7 \text{ м/с}$$

$$h_2 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} = \frac{10,08 \cdot 98000}{1000 \cdot 9800} = 100,8 \text{ м/с}$$

$$\text{Высота цилиндра } \Delta h = h_1 - h_2 = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = 38,9 \text{ м/с} \quad (8.6)$$

Протечки воды через закрытый направляющий аппарат

$$Q = \frac{S_{\text{осн}} \cdot (P_1 - P_2) \cdot 9800}{dt \cdot \rho \cdot g} \quad (8.7)$$

$$Q = \frac{45,76 \cdot (13,97 - 10,08) \cdot 98000}{3022 \cdot 1000 \cdot 9,8} = 0,589 \text{ м}^3/\text{с}$$

Время dt:

$$dt = t_2 - t_1 = ((5 - 4) \cdot 3600) + ((40 - 49) \cdot 60) + 4 - 42 = 3022 \quad (8.8)$$

Относительная величина протечек через закрытый НА:

$$Q_{\text{НА}}^- = \frac{Q}{Z_M} = \frac{0,589}{321} \cdot 100 = 0,165\% \quad (8.9)$$

где Z_M – отметка установки манометра

Зная протечки, можно определить потери электроэнергии через закрытый направляющий аппарата гидроагрегата в сутки.

Рассчитаем удельный расход, чтобы определить, сколько нужно пропустить расхода через турбину для выработки одного кВт·ч электроэнергии

$$q_{уд} = \frac{Q_m \cdot 3600}{9,81 \cdot Q_m \cdot H \cdot \eta_{ген}} = \frac{3600}{9,81 \cdot 194 \cdot 0,92} = 2,056 \text{ м}^3 / \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (8.10)$$

Зная удельный расход определим потери электроэнергии в сутки

$$\Delta P = \frac{Q_{протечки}}{q_{уд}} \cdot 24 \cdot 3600 = \frac{0,589}{2,056} \cdot 24 \cdot 3600 = 24777 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (8.11)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен расчет протечек методом наименьших квадратов и методом силовых машин (линейный участок ниже 14 кгс/см^2) Протечки через закрытый направляющий аппарат полученные двумя методами отличаются, но незначительно. Абсолютная погрешность составляет $-0,002$. До вывода в ремонт протечки через направляющий аппарат составляли $0,589 \text{ м}^3/\text{с}$. После проведения мероприятий по минимизации протечек воды, величина протечек составила $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$, что показывает адекватность принятых мер. С протечками воды через закрытый направляющий аппарат гидроагрегата №9 теряется $1260,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии в сутки. Также при протечках воды выполнить останов гидроагрегата является сложной задачей. Если гидроагрегат находится в работе при уровне мертвого объема, то возможен перегрев конструктивных частей направляющего аппарата и повреждение лабиринтных уплотнений вала. Из-за перегрева увеличивается торцевой зазор между нижним кольцом и лопаткой направляющего аппарата, в следствии чего в торцевом зазоре могут застрять чужеродные тела древесного и иного происхождения. Повреждаются уплотнения верхних цапф лопаток и по торцам направляющего аппарата. Иногда возникают механические повреждения, трещины нижнего кольца и лопатки направляющего аппарата. Для высоконапорных радиально-осевых турбин статор, как правило, конструктивно объединяется со спиральной камерой, так как высота направляющего аппарата невелика. При возникновении трещин или повреждений статора турбины в спиральной камере наблюдаются протечки. Протечки в спиральной камере также наблюдаются и при трещинах в бетоне. Их можно определить с помощью расходомера, установленного в камере.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кривченко Г.И.. Гидравлические машины: Турбины и насосы. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. - М. : Энергоатомиздат, 1983. - 320 с.
2. Грановский С.А. Конструкция и расчет гидротурбин. 2-е изд., доп. и переработ. Л. : Машиностроение, 1974.- 408 с.
3. Бронковский Г.А. Технология гидротурбостроения : науч. изд. - Москва : Машиностроение, 1970. - 378 с.
4. Васильев Ю.С. Машиностроение. IV-20 : науч. изд. - Москва : Машиностроение, 1984. - 584 с.
5. СТО330282.27.140.001-2006. Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций [Электронный ресурс] : утв. ОАО РАО "ЕЭС России" 13.07.2006. - Режим доступа: <http://www.gostrf.com/Basicdoc/50/50534/index.htm>.
6. СТО РусГидро 06.01.99-2013 "Гидроэлектростанции. Методические указания по учету стока воды" [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/055/097_STO-RusGidro-06.01.99-2013_MU-po-uchetu-stoka-vodi.pdf
7. ОСТ 108.023.16-82 "Аппарат направляющий вертикальных гидротурбин и насос-турбин. Методы определения протечек воды" [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.iprosoft.ru/docs/?nd=1200073307>

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
"СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ"
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ
институт
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и
электрических сетей
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 А.А. Ачитаев

" 02 " 07 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОТЕЧЕК ВОДЫ ЧЕРЕЗ
КОНСТРУКТИВНЫЕ УЗЛЫ ГИДРОАГРЕГАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	 25.06.2020	заместитель главного инженера по эксплуатации Филиала ПАО "РусГидро" "Саяно-Шушенский ГЭС" имени П.С. Нелюбожицын	<u>В.В. Луференко</u>
	подпись, дата	должность	инициалы, фамилия
Выпускник	<u>Мамышев</u> 25.06.2020		<u>Д.Е. Мамышев</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	 25.06.2020	руководитель группы режимов ОС Филиала ПАО "РусГидро" "Саяно- Шушенский ГЭС" имени П.С. Нелюбожицын	<u>К.В. Терехов</u>
	подпись, дата	должность	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	<u>Чабанова</u> 02.07.20		<u>А.А. Чабанова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020