

## НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СУПЕРНАГРУЖЕННЫХ ПОДПЯТНИКОВ ДЛЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СИБИРСКИХ ГЭС С ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТЬЮ 1 МИЛЛИОН КВТ

© 2009 Ю. И. Байбородов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Приведены результаты натуральных испытаний эластичных металлопластмассовых (ЭМП) сегментов при удельной нагрузке 10,0 МПа, которая может иметь место в гидроагрегатах нового поколения с единичной мощностью 1 миллион киловатт в планируемых к строительству крупных ГЭС Сибири.

*Подпятник, гидродинамическое давление, грузоподъемность.*

Энергетической программой ГКНТ СССР № 0.01.05 было предусмотрено дальнейшее развитие гидроэнергетики и создание крупных гидроэлектростанций со сверхмощными гидроагрегатами единичной мощностью 1 млн. киловатт, а также строительство гидроаккумулирующих гидроэлектростанций, являющихся незаменимыми регуляторами режимов работы объединенных энергосистем [1].

Однако предварительный анализ, выполненный проектировщиками [2, 3], показал, что в сверхмощных гидроагрегатах нагрузки на подпятник будут достигать 60–70 МН, а удельные нагрузки на сегменты 8,0–10,0 МПа. Естественно, что в условиях, когда традиционно применяющиеся баббитовые сегменты становятся недостаточно надежными при удельных нагрузках 5,5–6,0 МПа [4], нельзя было ожидать их удовлетворительной работы при более высоких удельных нагрузках. Тем более, что в практике отечественного и зарубежного гидроэнергомашиностроения не имеется аналогов сегментов, надежно работающих в подпятниках действующих гидроагрегатов при удельных нагрузках 10,0 МПа.

Перед создателями гидрогенераторов-двигателей для гидроаккумулирующих гидроэлектростанций также не менее остро встала проблема создания надежных подпятников, поскольку в этих агрегатах условия работы сегментов резко осложняются необходимостью работы в реверсивном режиме

[2, 3]. Учитывая перспективность новых ЭМП опор скольжения, а также уже имеющийся опыт аналоговых испытаний таких опор скольжения в подпятнике насоса откачки Волжской ГЭС имени В. И. Ленина при удельной нагрузке 9,2 МПа, Государственный Комитет СССР по науке и технике принял постановление о создании надежных и работоспособных подпятников для сверхмощных гидроагрегатов с удельными нагрузками на сегменты 8,0–10,0 МПа, а также реверсивных подпятников для генераторов-двигателей гидроаккумулирующих электростанций, в частности для Загорской ГАЭС [2, 3].

Эти работы было поручено выполнить Головным проектным производственным предприятиям Минэнерго, Минэлектротехпрома, Минэнергомаша, ряду научно-исследовательских институтов, в том числе и Куйбышевскому авиационному институту,

Опытно-промышленную проверку предусмотренных постановлением разработок предполагалось провести на гидроагрегатах Волжской ГЭС имени В. И. Ленина и Усть-Илимской ГЭС [5].

### 1. Постановка вопроса

Анализ показал, что для получения требуемой удельной нагрузки 10,0 МПа простое уменьшение количества пар сегментов в подпятнике не даст нужных результатов, т. к. для этого потребовалось бы удалить из подпятника больше половины сегментов. Есте-

ственно, что при этом балансиры не обеспечили бы требуемую надежность и работоспособность из условий прочности.

Завод-изготовитель («Электросила») дал разрешение на удаление из подпятника 4 пар сегментов. В связи с этим пришлось в сегментах, изготовленных на имеющейся оснастке, произвести доработку поверхностей трения путем снятия материала эластичного покрытия со стороны наружных и внутренних кромок сегментов, что дало необходимое уменьшение площади поверхностей трения и возможность получить требуемую нагрузку при 14 парах сегментов.

**2. Расчетные параметры и определение начальной геометрии эластичных сегментов при удельной нагрузке 10,0 МПа**

В соответствии с заданной осевой нагрузкой на подпятник порядка 27–29 МН суммарная площадь поверхности трения одной пары сегментов должны быть 2000 см<sup>2</sup>. С учетом этого условия были найдены исходные данные для расчета, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для гидродинамического расчета

Исходные данные	Наружный сегмент	Внутренний сегмент
1. Осевое усиление, Н	1,31 МН	0,8556 МН
2. Ширина в радиальном направлении, В, м	0,378	0,262
3. Длина в окружном направлении, L, м	0,342	0,322
4. Отношение ширины к длине, В/L	1,1	0,815
5. Окружная скорость на среднем радиусе, U, м/с	13,6	9,6
6. Температура масла в ванне, t <sub>м</sub> , °С	40	40
7. Сорт масла ТГС-30	-	-
8. Вязкость масла при 40°С, μ, кг·с /м <sup>2</sup>	0,004	0,004
9. Окружной эксцентриситет, ε, %	10	8
10. Отношение толщины масляного слоя на входе к толщине масляного слоя на выходе	4,5	2,75
11. Удельная нагрузка, P <sub>уд</sub> , МПа	10,0	10,0

Учитывая, что при столь высоких нагрузках отрицательное влияние эластоэффекта на гидродинамику существенно возрастет, нами было принято решение с целью уменьшения контактных деформаций увеличить в процессе изготовления жесткость ЭМП покрытия.

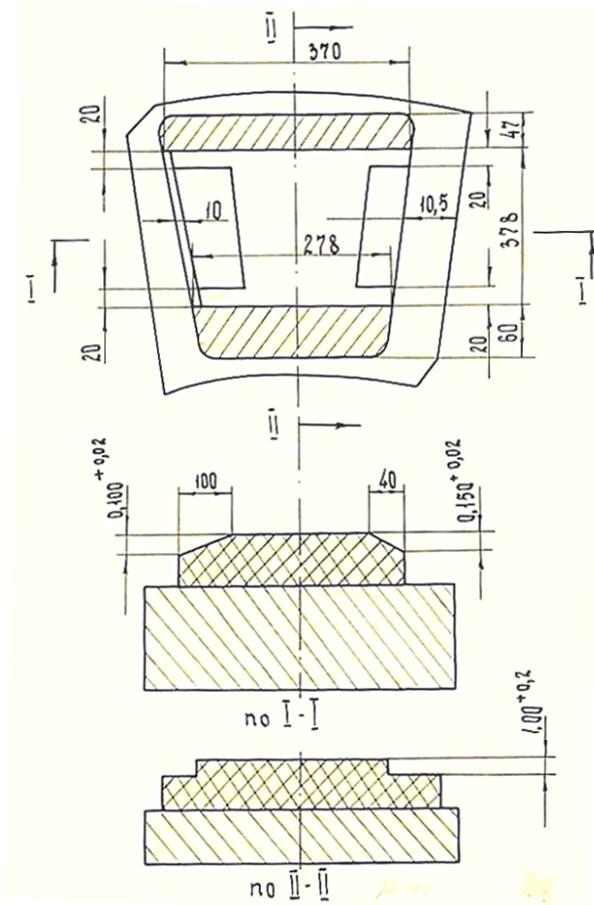
На рисунке 1 показана зависимость деформации тяжело нагруженного эластичного сегмента от удельной нагрузки. Анализ показывает, что податливость эластичных сегментов для испытаний при сверхвысоких нагрузках примерно в 3–3,5 раза меньше, чем в предыдущих испытаниях.

С учетом полученной зависимости по аналогии с принятыми методами проектирования эластичных сегментов была определена начальная макрогеометрия наружного и внутреннего сегментов, показанная на рисунках 2 и 3.

В отличие от предыдущих конструкций в данных сегментах с целью увеличения грузоподъемности на входном и выходном участках сегментов наклонные участки выполнены не на всей ширине сегмента. Вблизи внешней и внутренней кромок оставлены горизонтальные участки шириной 20 мм и выполненные заодно со средним ненаклонным участком поверхности трения сегментов. Такая конструкция, на наш взгляд, существенно ограничивает торцовые утечки в зоне наклонных участков в период пуска агрегата, а следовательно, увеличивает их несущую способность и облегчает условия возникновения жидкостного трения на всей поверхности сегментов.

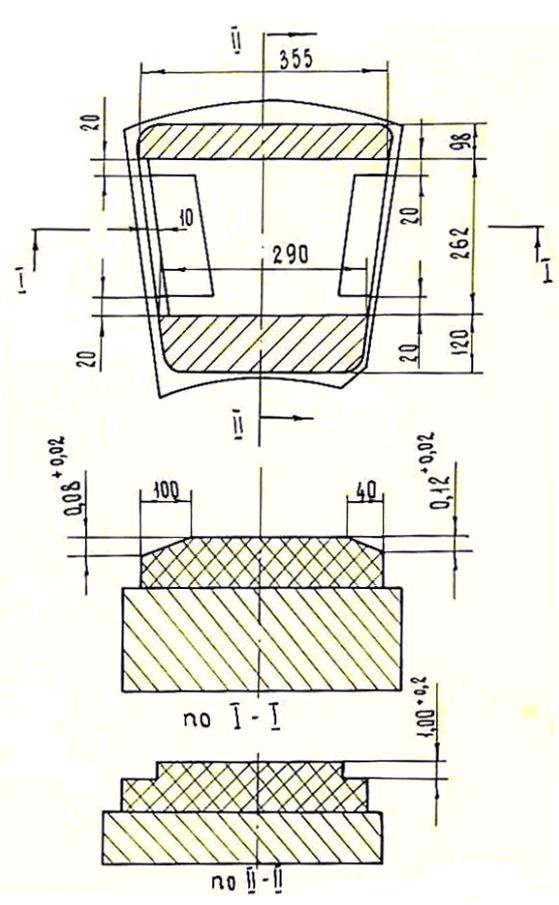


Рис. 1. Графики зависимости деформации тяжело нагруженного ЭМП сегмента от удельной нагрузки



$$\varepsilon = 10\% ; S_H = 1187 \text{ см}^2$$

Рис. 2. Начальная макрогеометрия наружного эластичного тяжело нагруженного сегмента ( $p = 10,0 \text{ МПа}$ )



$$\varepsilon = 8\% ; S_H = 818 \text{ см}^2$$

Рис. 3. Начальная макрогеометрия внутреннего эластичного тяжело нагруженного сегмента ( $p = 10,0 \text{ МПа}$ )

С целью уменьшения возможных протечек масла, находящегося под высоким давлением, в местах установки металлических корпусов термопар, как это было в предыдущих испытаниях, в данном случае была изменена заделка термопары, как это показано на рисунке 4. В данном варианте спай термопары непосредственно омывается маслом, протекающим в зазоре между трущимися поверхностями, и весьма быстро прогревается, т. к. его масса крайне мала.

По аналогии с предыдущими испытаниями в данном случае определялись следующие параметры:

- 1) температура поверхности трения сегментов;
- 2) режим трения с помощью контактных датчиков;
- 3) гидродинамические давления в нагруженной зоне трения;

4) износ трущихся поверхностей методом мерных баз;

5) температура масла в ванне подпятника.

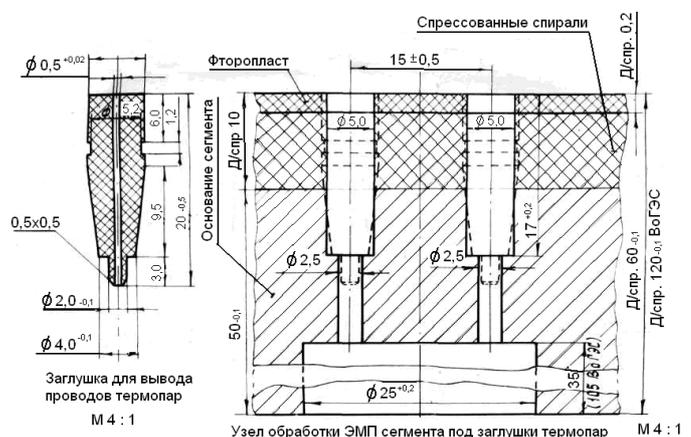


Рис. 4. Схема заделки термопары в эластичном сегменте

Испытания проводились в два этапа. Первый этап при 16 парах сегментов в подпятнике, что соответствовало удельной нагрузке 8,0 МПа. Второй этап при 14 парах сегментов в подпятнике, что соответствует удельной нагрузке 10,0 МПа.

Схема расположения сегментов в подпятнике и датчиков показана на рисунке 5.

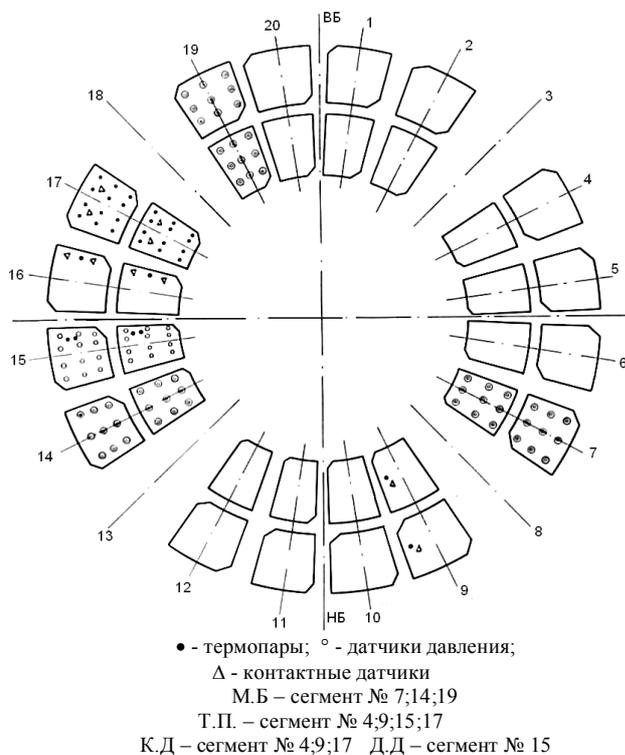


Рис. 5. Схема расположения сегментов в подпятнике А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина, термопар, датчиков гидродинамических давлений, контактных датчиков и мерных баз для определения износа поверхностей трения при испытании с удельной нагрузкой 10,15 МПа

Объектом для испытаний вновь был выбран подпятник гидроагрегата А-8 с демонтажем предыдущего комплекта эластичных сегментов и установкой его в подпятник гидроагрегата А-19 вместо поврежденных баббитовых сегментов. Буквой «С» отмечен факт сверхнагруженности сегментов. Нет необходимости приводить результаты испытаний, при которых сегменты были менее нагружены, поэтому здесь приведены данные по испытаниям эластичных сегментов при 14 парах в подпятнике и удельной нагрузке 10,0 МПа.

На рисунках 6 и 7 показано распределение температуры в среднем окружном наи-

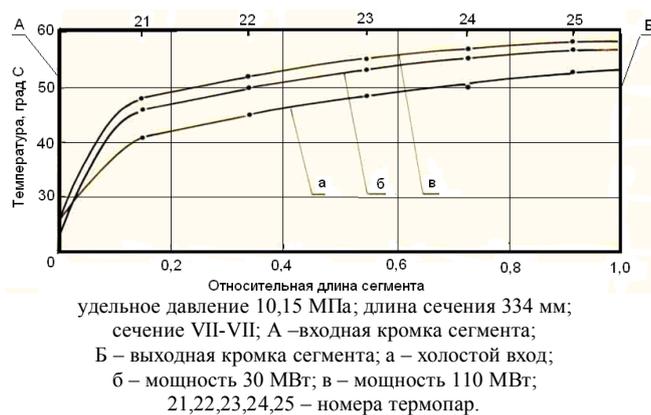


Рис. 6. Распределение температуры в среднем окружном сечении ЭМП сегмента № 17 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ( $p = 10,15$  МПа)

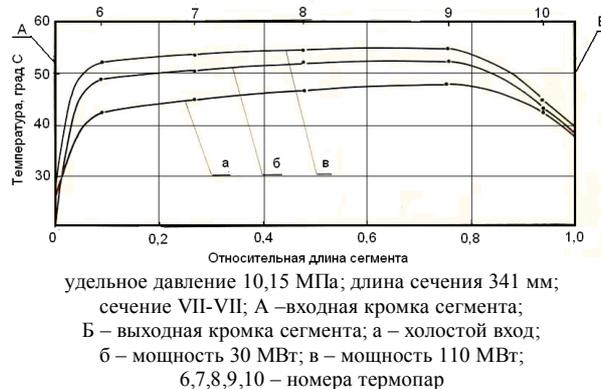


Рис. 7. Распределение температуры в среднем окружном сечении ЭМП сегмента № 17 внутреннего ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ( $p = 10,15$  МПа)

более нагруженном сечении наружного и внутреннего сегментов.

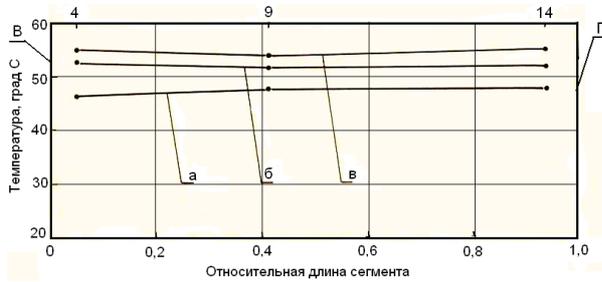
На рисунках 8 и 9 показано распределение температуры в наиболее нагруженном радиальном сечении наружного и внутреннего сегментов. Характер изменения температуры в данных испытаниях аналогичен изменению температуры в предыдущих исследованиях при удельной нагрузке 6,0 МПа.

Абсолютные значения максимальной температуры также отличаются незначительно на 2–3 °С, что указывает на удовлетворительный температурный режим подпятника. Об этом же свидетельствует картина распределения температур по площади наружного



удельное давление 10,15 МПа; длина сечения 262 мм;  
сечение I-I; В – наружная кромка сегмента;  
Г – выходная кромка сегмента; а – холостой вход;  
б – мощность 30 МВт; в – мощность 110 МВт;  
1,6,11 – номера термопар

Рис. 8. Распределение температуры в радиальном сечении наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ( $p = 10,15$  МПа)



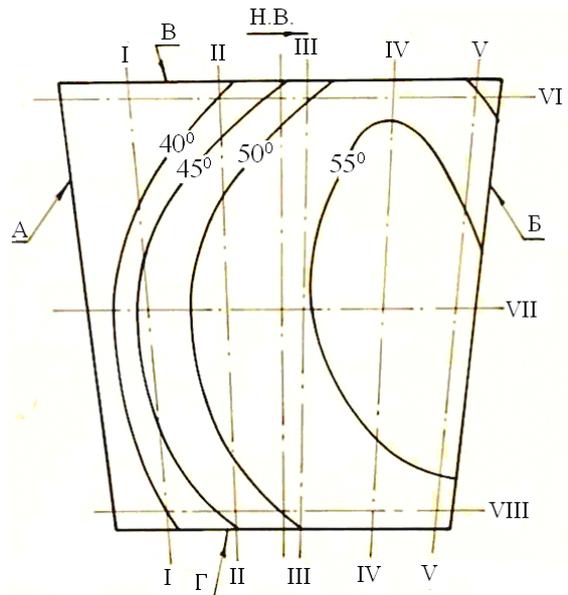
удельное давление 10,15 МПа; длина сечения 262 мм;  
сечение IV-IV; В – наружная кромка сегмента;  
Г – выходная кромка сегмента; а – холостой вход;  
б – мощность 30 МВт; в – мощность 110 МВт;  
4,9,14 – номера термопар

Рис. 9. Распределение температуры в радиальном сечении внутреннего ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ( $p = 10,15$  МПа)

сегмента № 17, приведенная на рисунке 10, а также установившаяся на относительно низком уровне температура масла в ванне подпятника.

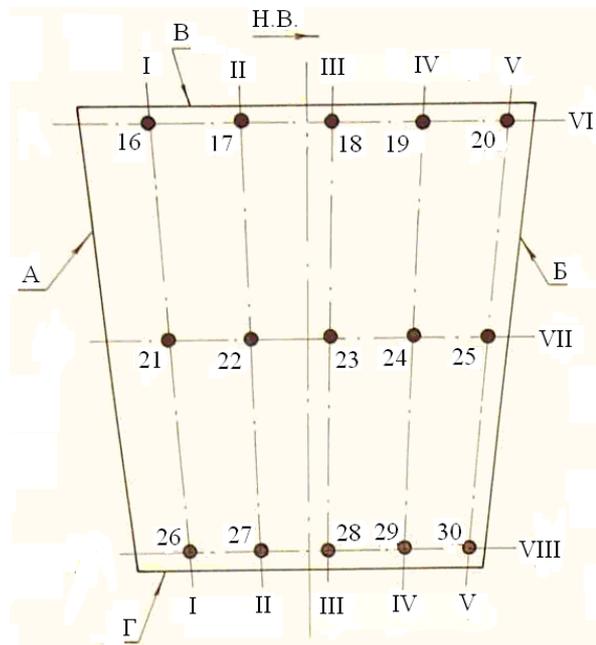
Эти факты указывают на нормальную работу подпятника в режиме жидкостного трения. Об этом же свидетельствовали показания контактных датчиков. Причем было установлено, что режим жидкостного трения в период пуска агрегата возникает на первом обороте ротора, что указывает на хорошие гидродинамические характеристики сегментов.

Схемы расположения термопар на сегментах наружного и внутреннего ряда идентичны и приведены на рисунке 11.



Н.В. – направление вращения диска пяты;  
А – входная кромка сегмента;  
Б – выходная кромка сегмента;  
В – наружная кромка сегмента;  
Г – внутренняя кромка сегмента;  
I, II, III, IV, V – продольные сечения;  
VI, VII, VIII – поперечные сечения;  
45°, 40°, 50°, 55° – изотермы

Рис. 10. Распределение температуры на поверхности трения сегмента № 17 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина



Удельное давление 10,15 МПа,  
Н.В. – направление вращения диска пяты;  
А – входная кромка сегмента;  
Б – выходная кромка сегмента;  
В – наружная кромка сегмента;  
Г – внутренняя кромка сегмента;  
• - термопара; I-V – продольные сечения;  
VI-VIII – поперечные сечения;  
16,17,... 30 – номера термопар

Рис. 11. Схема расположения термопар в сегментах наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина

На рисунках 12 и 13 показаны распределения давлений в окружном и радиальном сечениях наружного сегмента.

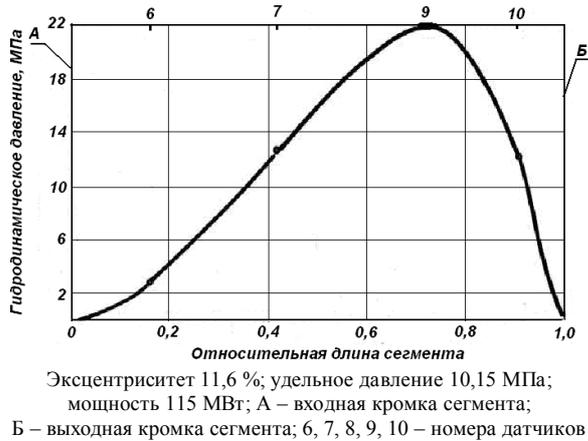


Рис. 12. Распределение гидродинамического давления в окружном направлении по среднему радиусу ЭМП сегмента № 15 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина



Рис. 13. Распределение гидродинамического давления в радиальном сечении сегмента № 15 наружного ряда гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина

Характер распределения давлений аналогичен характеру давлений в предыдущих испытаниях и прямо указывает на то, что сегменты работают в режиме жидкостного трения. Максимум давлений косвенным образом показывает, что среднее удельное давление в рассматриваемом сегменте имеет величину 10,2–10,5 МПа.

Форма зазора в окружном направлении, построенная путем наложения деформаций, определяемых эпюрой давлений и податливостью сегмента, приведена на рисунке 14 и имеет вид сужающегося трехступенчатого клина. Данное обстоятельство подтверждает правильность расчета и выбора начальной геометрии сегментов.



Рис. 14. Форма зазора в среднем окружном сечении наружного ЭМП сегмента гидроагрегата А-8 ВоГЭС им. В.И. Ленина ( $p=10,15$  МПа)

Форма зазора в радиальном сечении, полученная аналогичным образом, приведена на рисунке 15, аналогична форме зазора такого же сечения предыдущих испытаний

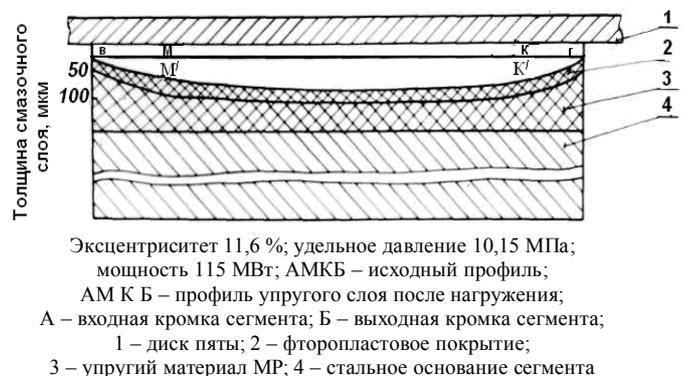


Рис. 15. Форма зазора в радиальном сечении наружного ЭМП сегмента гидроагрегата А-8 ВоГЭС имени В.И. Ленина ( $p = 10,15$  МПа)

при удельной нагрузке 6,0 МПа и так же подтверждает правильность выбора модуля упругости (податливости) спроектированных сегментов. Супернагруженные сегменты испытывались при холодных и горячих пусках и на наиболее тяжелом режиме работы агрегата 30–40 МВт.

На всех режимах работы агрегата эластичные сегменты работали надежно. Неоднократные осмотры сегментов после очередных этапов испытаний также показали, что новая конструкция обладает высокой надежностью и работоспособностью при удельных нагрузках 10,0 МПа. После наработки 10120 часов и выполнения 345 пусковых баз глубиной 0,16; 0,18; 0,24; 0,31; 0,37 мм сохранились полностью и износ был менее 0,16 мм, как показано на рисунках 16 и 17.

### Выводы

1. ЭМП сегменты обладают высокой надежностью и работоспособностью при удельных нагрузках 8,0–10,0 МПа.

2. Проведенные испытания открыли реальную перспективу для проектирования и создания гидроагрегатов нового поколения с единичной мощностью 1 млн. кВт и осевым усилием на подпятник 60–70 МН.

3. Применение тяжело нагруженных эластичных опор скольжения в проектируе-



Рис. 17. Состояние поверхности трения после наработки 10120 часов ( $p = 10,15$  МПа)

мых гидроагрегатах дает возможность уменьшать габариты и металлоемкость конструкций, снижать себестоимость изготовления, обеспечивать уменьшение потерь мощности на трение и увеличивать КПД агрегатов.

4. Способность ЭМП опор скольжения надежно работать без повреждений на относительно меньших, чем в баббитовых сегментах, толщинах смазочного слоя дает дополнительную возможность существенно уменьшить потери на трение в подпятниках и дополнительно увеличить КПД агрегатов за счет перевода работы на менее вязкие масла, например трансформаторное.

### Библиографический список

1. Обращение производственного объединения “УРАЛЭЛЕКТРОТЯЖМАШ” им. В.И. Ленина № 75/7-521-233 от 30 июня 1978 г. к Куйбышевскому авиационному институту.

2. Протокол совещания в институте “ГИДРОПРОЕКТ” по вопросу проектирования сверхмощных гидроагрегатов для ГЭС Восточной Сибири от 21-22 ноября 1979 г.



Рис. 16. Состояние поверхности трения после наработки 5722 часов ( $p = 10,15$  МПа)

3. Протокол совещания в институте “ГИДРОПРОЕКТ” по проблеме создания подпятников гидроагрегатов Енисейских ГЭС на нагрузку до 7000 т от 23 – 25 января 1980 г.

4. Коднир Д.С., Байбородов Ю.И., Терещенко А.В. и др. А.С. № 649898 СССР М кл<sup>2</sup> F16C 17/08. «Упругий самоустанавливающийся сегмент подшипника», опубли. 28.02.79 г., Бюл. № 8 за 1979 г.

5. Александров А.Е. «Подпятники гидроагрегатов». – М.: Энергия, 1975.

6. Приложение к постановлению Государственного комитета по науке и технике от 24 января 1979 г. № 21.

#### References

1. Address of the production association “Uralelectrotyazhmash” named after V. I. Lenin No. 75/7-521-233 of June 30, 1978 to Kuibyshev Aviation Institute.

2. Record of proceedings at the Institute “Gidroproect” on the matter of designing superpowerful hydroelectric units for the Eastern Siberia hydroelectric power station of November 21-22, 1979.

3. Record of proceedings at the Institute “Gidroproect” on the problem of producing thrust bearings of hydroelectric units for Yenisey hydroelectric power stations for the load of up to 7000 t of January 23-25, 1980.

4. Kodnir D. S., Baiborodov Yu. I., Tereshchenko A. V. et al. Author’s Certificate No. 649898, USSR M cl<sup>2</sup> F16C 17/08. “Elastic self-aligning bearing segment”, published 28.02.79, Bul. No. 8, 1979.

5. Alexandrov A. Ye. “Thrust bearings of hydroelectric units”. – Moscow: Energiya, 1975.

6. Supplement to the resolution of State Committee on science and technology of January 24, 1979, No. 21.

## FULL-SCALE TESTS OF SUPERLOADED THRUST BEARINGS FOR HYDRAULIC-TURBINE GENERATORS OF SIBIR HYDROELECTRIC POWER STATIONS OF THE NEW GENERATION WITH UNIT POWER OF 1 MILLION KW

© 2009 Yu. I. Baiborodov

Samara State Aerospace University

The paper presents the results of full-scale tests of elastic metal-plastic (EMP) segments at the unit load of 10.0 MPa that can take place in hydroelectric units of the new generation with unit power of 1 million kw at large hydroelectric power stations which are planned to be built in Siber.

*Thrust bearing, hydrodynamic pressure, load capacity.*

#### Информация об авторе

**Байбородов Юрий Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: контактная гидродинамика, опоры скольжения. E-mail: byui@ssau.ru.

**Baiborodov, Yuri Ivanovitch**, candidate of technical science, associate professor of the department of machine design foundations, Samara State Aerospace University. Area of research: contact hydrodynamics, sliding bearings. E-mail: byui@ssau.ru.