

УДК 621.822.5

## РАСЧЕТ РАДИАЛЬНОЙ КООРДИНАТЫ ЦЕНТРА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ САМОУСТАНОВЛИВАЮЩИХСЯ ЭЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОПЛАСТМАССОВЫХ СЕГМЕНТОВ ПОДПЯТНИКОВ С УЧЕТОМ ПОДАТЛИВОСТИ ПОКРЫТИЯ

© 2007 Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин

Самарский государственный аэрокосмический университет

В работе представлены расчеты радиальной координаты центра гидродинамических давлений с использованием трех известных методов, подтвердившие их несущественное расхождение. Рассмотрен разработанный авторами новый метод расчета радиальной координаты центра гидродинамических давлений и результаты его использования применительно к сегментам подпятников четырех ГЭС. Полученные результаты подтверждают высокую достоверность нового метода. Приведены результаты расчетов координаты центра гидродинамических давлений по разработанному авторами новому методу расчета, которые подтверждены натурными испытаниями на мощном гидроагрегате Волжской ГЭС им. В.И. Ленина.

### Расчеты радиальной координаты центра гидродинамических давлений с использованием трех известных методов

В работе [1] отмечается: "...правильное определение координат центра давления масляного слоя самоустанавливающейся подушки (сегмента) является одной из важнейших задач при её конструировании".

Именно в центре давления должен быть помещен центр шаровой опоры самоустанавливающейся подушки, рабочая поверхность которой должна расположиться под оптимальным углом (в тангенциальном направлении) к плоскости (зеркалу) опорного диска, при этом линия поверхности трения в радиальном сечении подушки, проходящем через центр опоры, должна быть параллельна рабочей плоскости диска.

При несовпадении радиальных координат центра давлений и центра шаровой опоры создается перекашивающий подушку момент, ухудшающий процесс трения. В тяжелонагруженных подпятниках это может привести к возникновению граничного трения в зоне наружной или внутренней кромок сегмента, что приведет к повышенному износу поверхности трения подушки.

В методических указаниях [2, п.5.3] дана рекомендация: "Для каждого подпятника в зависимости от его параметров (окружная скорость, конфигурация сегментов и др.) точ-

ное значение оптимальной величины радиального эксцентриситета должно быть определено специальными испытаниями".

Безусловно, такие испытания являются весьма трудоемкими и дорогостоящими. Поэтому весьма актуальным является применение метода определения радиальной координаты центра давления, обеспечивающего значение этого параметра с высокой степенью точности и позволяющего исключить специальные испытания.

Остановимся на известных из публикаций методах определения радиальной координаты опоры (центра гидродинамических давлений) [1,3,4,5,6].

С использованием известных методов расчета произведем расчет радиальной координаты центра гидродинамических давлений для баббитового сегмента подпятника гидроагрегата Плявиньской ГЭС (Латвия), конфигурация которого представлена на рис. 1.

Первый известный в хронологической последовательности метод, учитывающий конфигурацию сегмента: параметр  $Z_1 = R_2/R_1$  и центральный угол  $\beta$ , – представлен в работе [3] со ссылкой на первоисточник [4]. По этому методу радиальная координата опоры (центра давления)  $R_{\text{цд}}$  определяется в соответствии с выражением (1).

$$R_{\text{цд}} = c_0 \cdot R_1 \quad (1)$$

Исходными данными для расчета явля-

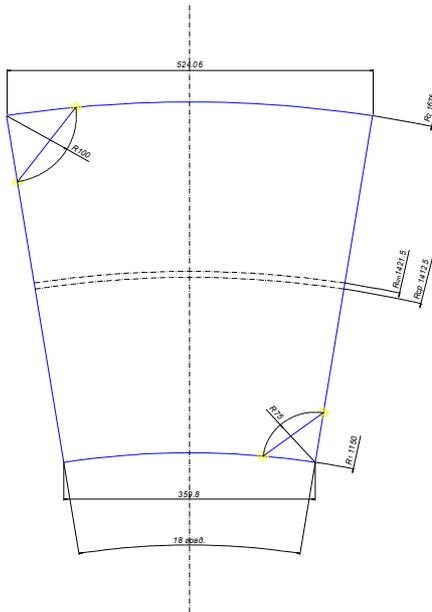


Рис. 1. Конфигурация баббитового сегмента подпятника гидроагрегата Плявиньской ГЭС

ются табличные данные коэффициента  $c_0$  в функции параметров  $Z_1$  и  $\beta$ . Для рассматриваемого баббитового сегмента, рис. 1,  $Z_1 = 1,5$  и  $\beta = 18^\circ$

В табл. 1 представлены значения безразмерного коэффициента  $c_0$  в зависимости от  $\beta$  и  $Z_1$  по приведенным в [3,4] данным.

Поскольку значения центрального угла  $\beta$  и параметра  $Z_1$  нашего сегмента находятся за пределами значений, указанных в табл. 1, строим график, представленный на рис. 2.

Таблица 1. Значения безразмерного коэффициента  $c_0$  по [3,4]

$\beta^0 \backslash Z_1$	1,5	1,7	2	2,5	3
18	-	-	-	-	-
20	-	1,36	1,58	1,88	2,30
30	-	1,39	1,58	1,91	2,28
40	-	1,385	1,58	1,9	2,25
50	-	1,38	1,57	1,9	2,23

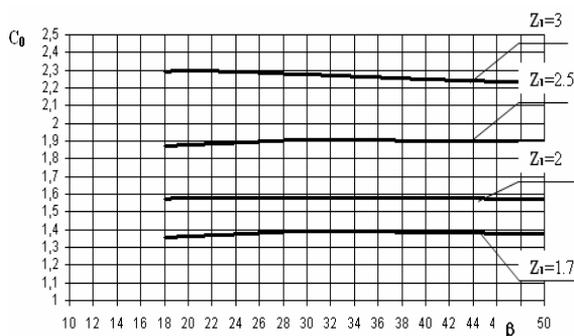


Рис. 2. График зависимости коэффициента  $c_0$  от параметров  $\beta$  и  $Z_1$

Таблица 2. Значения коэффициента  $c_0$  в зависимости от параметра  $Z_1$  при  $\beta = 18^\circ$

$Z_1 = 1,7$	$c_0 = 1,355$
$Z_1 = 2,0$	$c_0 = 1,57$
$Z_1 = 2,5$	$c_0 = 1,87$
$Z_1 = 3,0$	$c_0 = 2,29$

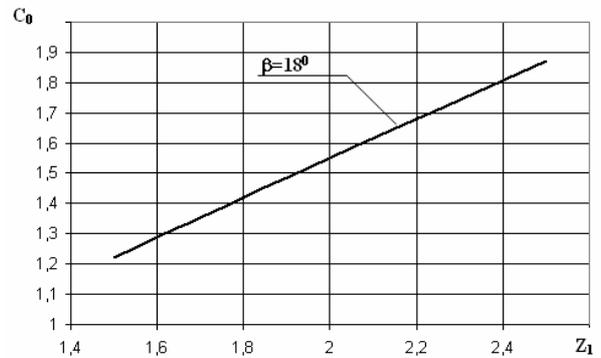


Рис. 3. График зависимости коэффициента  $c_0$  от параметра  $Z_1$  при  $\beta = 18^\circ$

По этому графику путем экстраполяции определяем значения коэффициента  $c_0$  для угла  $\beta = 18^\circ$  и для всех табличных значений параметра  $Z_1$ . Найденные значения коэффициента  $c_0$  представлены в табл. 2

По данным табл. 2 строим график, представленный на рис. 3.

По этому графику для  $Z_1 = 1,5$  путем экстраполяции находим значение коэффициента  $c_0$ , которое оказывается равным  $c_0 = 1,22$ .

В соответствии с выражением (1) определяем радиальную координату центра давления  $R_{цд}$ .

$$R_{цд} = 1403 \text{ мм.} \quad (2)$$

Для рассматриваемой конфигурации баббитового сегмента радиальная координата центра тяжести сегмента равна

$$R_{цт} = 1421,5 \text{ мм.} \quad (3)$$

Радиальный эксцентриситет согласно [[22]] равен

$$\begin{aligned} \varepsilon_R &= \frac{R_{цд} - R_{цт}}{R_2 - R_1} \cdot 100\% = \frac{1403 - 1421,5}{1675 - 1150} \cdot 100\% = \\ &= -3,52\% \end{aligned} \quad (4)$$

Как следует из выражений (2) и (4), а также из опыта эксплуатации этих сегментов, точность определения координаты центра давления и радиального эксцентриситета по этому методу не удовлетворительная. В этой

связи в методических указаниях [2, п.5.3] и дана рекомендация:

“Для каждого подпятника в зависимости от его параметров (окружная скорость, конфигурация сегментов и др.) точное значение оптимальной величины радиального эксцентриситета должно быть определено специальными испытаниями”.

Второй в хронологической последовательности метод рассмотрен в работе [1], где приведены расчет несущей способности масляного слоя подушки  $W$  и расчет координат центра давления  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ .

Координаты центра давления  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  определяются в соответствии с выражениями

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{\beta} \int_{r_1}^{r_2} (p \cdot r^2 \cdot \cos \theta) dr d\theta}{W}; \quad \bar{y} = \frac{\int_0^{\beta} \int_{r_1}^{r_2} (p \cdot r^2 \cdot \sin \theta) dr d\theta}{W} \quad (5)$$

где выражения в числителе есть сумма моментов местных давлений  $p$  по всей площади сегмента относительно осей  $\bar{y}$  и  $\bar{x}$  соответственно. Радиальная координата центра давления определяется как:

$$R_{цд} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (6)$$

Расчет координат центра давления по выражению (5) в принципе невозможен, так как не известны значения местных давлений  $p$ . В развитие этого метода автором предложены весьма громоздкие формулы расчета, учитывающие конфигурацию сегмента и форму сечения масляного клина цилиндрической поверхностью. Сложности в использовании этих формул затрудняет применение

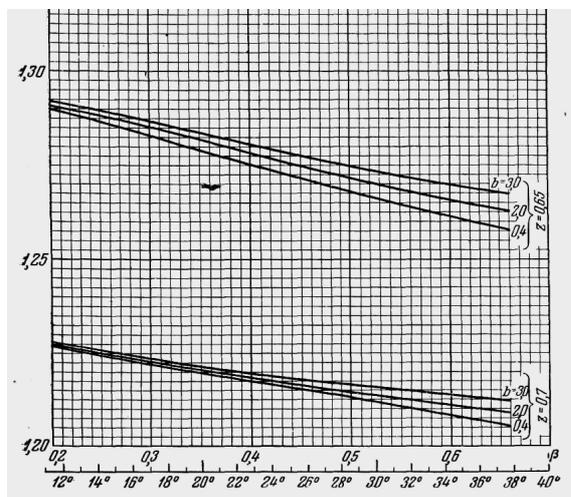


Рис. 4. График для определения коэффициента  $c_0$  ([5], стр. 86)

изложенного метода на практике. Для облегчения расчетов предложены графики, по которым с достаточной степенью точности можно найти значения искомым расчетных коэффициентов и вычислить искомый параметр, в частности радиальную координату центра давления.

На рис. 4 представлен фрагмент графика для определения коэффициента  $c_0$  в области интересующего нас значения параметра  $Z_2$ .

На графике представлены параметры:

$\beta$  – центральный угол рабочей поверхности сегмента, который принимаем равным  $18^\circ$  (0,314 радиан);

$$Z_2 = R_1/R_2 = 1150/1675 = 0,686;$$

$b \geq 4/3$  – коэффициент, определяющий форму сечения масляного клина цилиндрической поверхностью.

Значение коэффициента  $c_0$  для значения параметра  $Z_2 = 0,686$  определяем из графика путем интерполирования. При этом  $c_0 = 1,238$ .

По значению коэффициента  $c_0$  определяется радиальная координата центра давления в соответствии с выражением (1).

$$R_{цд} = 1423,7 \text{ мм.} \quad (7)$$

Радиальный эксцентриситет согласно [[22]] равен

$$\varepsilon_R = \frac{R_{цд} - R_{ум}}{R_2 - R_1} \cdot 100\% = \frac{1423,7 - 1421,5}{1675 - 1150} \cdot 100\% = 0,42\% \quad (1.8)$$

При практическом использовании второй метод отличается от первого метода введением дополнительного параметра  $b$ . Однако, как следует из графика, рис. 4, учет этого параметра вносит незначительные изменения в результат расчета коэффициента  $c_0$ .

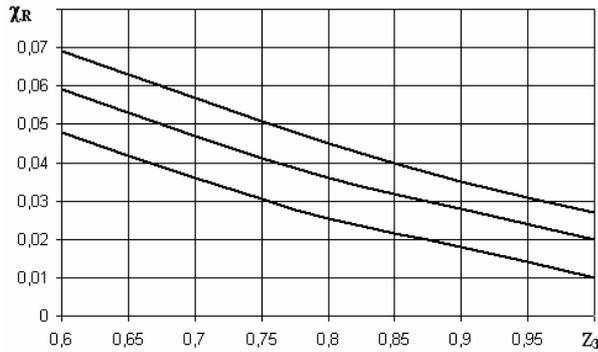
Третий метод непосредственного определения безразмерного значения радиального эксцентриситета представлен в работе [5] со ссылкой на первоисточник [6].

Исходными данными для расчета являются табличные значения безразмерного радиального эксцентриситета  $\chi_R$  в функции параметров  $Z$  и угла  $\beta$ , где  $Z_3 = L_{cp}/B$ , а  $L_{cp}$  – длина дуги по среднему радиусу сегмента,  $B = R_2 - R_1$  – ширина сегмента.

В табл. 3 представлены значения безразмерного радиального эксцентриситета  $\chi_R$  в

**Таблица 3.** Безразмерный радиальный эксцентриситет  $\chi_R$  установки сегмента

$\beta^{\circ} \backslash Z_3$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$10^{\circ}$	0,0480	0,0360	0,0255	0,0180	0,0100
$20^{\circ}$	0,059	0,047	0,036	0,028	0,020
$30^{\circ}$	0,069	0,057	0,045	0,035	0,027



**Рис. 5.** График зависимости безразмерного радиального эксцентриситета  $\chi_R$  от параметра  $Z_3$  и угла  $\beta$

функции параметра  $Z_3$  и угла  $\beta$ , по которым построен график, представленный на рис. 5.

Для рассматриваемого баббитового сегмента  $b = 18^{\circ}$ .

$$L_{cp} = \pi \cdot (R_1 + R_2) \cdot \beta / 360 = 443,7 \text{ мм};$$

$$B = 525 \text{ мм}; Z_3 = L_{cp} / B = 0,845.$$

По этому способу безразмерные значения радиального эксцентриситета  $\chi_R$  для значения параметра  $Z_3 = 0,845$  в функции трех значений угла  $\beta$  определяются из графика, рис. 5. Эти значения равны:

$$\chi_R(30^{\circ}) = 0,04; \chi_R(20^{\circ}) = 0,032;$$

$$\chi_R(10^{\circ}) = 0,022. \quad (1.9)$$

По найденным значениям  $\chi_R(\beta)$  построен график, представленный на рис. 6.

Из графика, рис. 6, находим значение эксцентриситета  $\chi_p$  и вычисляем  $\epsilon_p$  для угла  $\beta = 18^{\circ}$ .

$$\chi_R = 0,03; \epsilon_p = \chi_R \cdot 100\% = 3\% \quad (1.10)$$

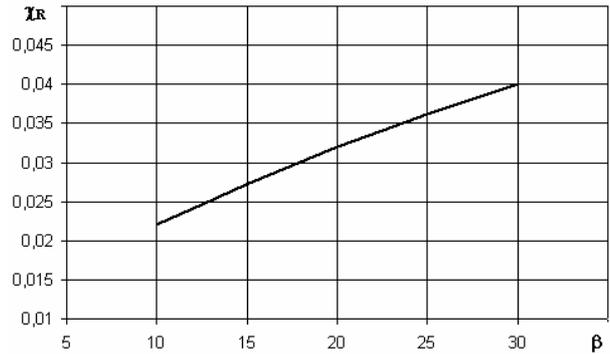
Значение радиальной координаты центра давления определим по выражению

$$R_{цд} = \chi_R \cdot (R_2 - R_1) + R_{цт}. \quad (1.11)$$

$$R_{цд} = 0,03 \cdot (1675 - 1150) + 1421,5 =$$

$$= 1437,25 \text{ мм}. \quad (1.12)$$

Найденные с использованием трех различных методов значения радиальной коор-



**Рис. 6.** График зависимости эксцентриситета  $\chi_p$  от угла  $\beta$  для значения параметра  $Z_3 = 0,845$

динаты центра давления (опоры) и радиальные эксцентриситеты

$$R_{цд} = 1403,0 \text{ мм (2); } \epsilon_p = -3,52\%; \quad (4)$$

$$R_{цд} = 1423,7 \text{ мм (7); } \epsilon_p = +0,42\%; \quad (8)$$

$$R_{цд} = 1437,5 \text{ мм (12); } \epsilon_p = +3,00\% \quad (10)$$

существенно отличаются друг от друга, что затрудняет выбор действительно необходимого значения радиальной координаты опоры сегмента подпятника.

В рассматриваемой конструкции подпятника гидроагрегата Плявиньской ГЭС значение радиальной координаты опоры сегмента принято равным

$$R_{оп} = 1402,0 \text{ мм},$$

что соответствует расчетному значению по (2).

### Расчет тангенциальной и радиальной координат центра гидродинамических давлений с использованием методик СГАУ

В связи с тем, что известные методики расчета радиальной координаты центра гидродинамических давлений имеют существенные расхождения, а также в связи с тем, что ни одна из них не учитывает податливость антифрикционного покрытия сегментов, присутствующую разработанным в СГАУ конструкциям ЭМП сегментов [8, 9] и нашедших широкое применение в гидроэнергетике, в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева была разработана методика, дающая по мнению авторов удовлетворительный результат расчета этого важного параметра.

При расчете радиальной и тангенциальной координат опоры сегментов в первую

очередь осуществляется расчет эпюры давлений в сечении сегмента на среднем радиусе, с использованием которой производится расчет тангенциальной (окружной) координаты опоры.

Найденная эпюра давлений позволяет также определить грузоподъемность среднего участка поверхности сегмента, являющейся одним из исходных параметров при последующем определении радиальной координаты опоры.

Оценка значения тангенциальной (окружной) координаты опоры и соответствующего значения эксцентриситета возможны в соответствии с принятой на основе эластогидродинамической теории смазки [10,11] методикой. Она осуществляется численным методом интегрирования (методом Рунге - Кутты) системы дифференциальных уравнений для сечения ЭМП - сегмента на среднем радиусе:

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu U \frac{h-h_0}{h^3}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{2\mu U}{cphh_0} \left[ 1 + 3 \left( \frac{h-h_0}{h} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где  $x$  – текущая линейная координата, [м];  
 $0 \leq x \leq L$ ;  
 $L$  – полная длина сечения, [м];  
 $p$  – текущее значение давления, [МПа];  
 $t$  – текущее значение температуры, [°С];  
 $\mu$  – динамическая вязкость масла, [МПа·с];  
 $U$  – скорость скольжения, [м/с];  
 $h_0$  – толщина смазочного слоя

при  $\frac{dp}{dx} = 0$ , [м];

$h$  – текущее значение толщины смазочного слоя, [м];

$c$  – удельная теплоемкость масла, [[ кдж/(кг·°С) ]];

$\rho$  – плотность масла, [кг/м³];

- дополненной уравнением сечения поверхности трения на среднем радиусе

$$h(x) = h_1(x) + v(x), \quad (13)$$

где  $v(x)$  – величина деформаций поверхности трения, [м].

Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется по разработанной

в СГАУ программе при номинальной частоте вращения ротора для различных начальных условий, в качестве которых приняты сорт масла, температура масла на входе, удельная нагрузка и другие параметры конструкции подпятника гидроагрегата Плявиньской ГЭС:

Средний радиус, мм	$R_{cp} = 1412,5$
Длина сегмента по дуге на среднем радиусе, мм	$L_{cp} = 444$
Ширина сегмента в радиальном направлении, мм	$B_{cp} = 525$
Тангенциальная координата опоры сегмента относительно оси симметрии сегмента, мм	$\Delta L = 30$
Сорт масла	T – 30

При решении системы уравнений (13) принято, что температурная зависимость динамической вязкости выражается соотношением

$$\mu(t) \cdot 10^4 = 0.572 \cdot e^{\frac{872.4}{91+t}} \text{ [Па} \cdot \text{с]}, \quad (14)$$

На рис. 7 представлен расчетный график изменения давления. Дискретные значения давлений позволяют вычислить тангенциальную координату равнодействующей относительно входной кромки, которая равна  $L_p = 251$  мм, что соответствует смещению центра давления относительно оси симметрии баббитового сегмента на  $\Delta L = 29$  мм (конструктивно  $\Delta L = 30$  мм). При этом значение тангенциального эксцентриситета равно  $\varepsilon_t = 6,53\%$  (Конструктивно  $\varepsilon_t = 6,76\%$ ). В работе [12] показано, что значения тангенциального эксцентриситета для баббитовых сегментов находятся в пределах  $\varepsilon_t = (5 \div 9)\%$ . Следовательно, и расчетное и фактическое значения тангенциального эксцентриситета находятся в допустимых пределах.

Так как эпюра давлений расположена в сечении цилиндрической поверхностью, то равнодействующая сил давления не будет находиться в этом сечении.

Радиальная координата равнодействующей может быть найдена, как

$$y_{ц.д.} = \frac{\sum_0^N M_i}{\sum_0^N P_i}, \quad (15)$$

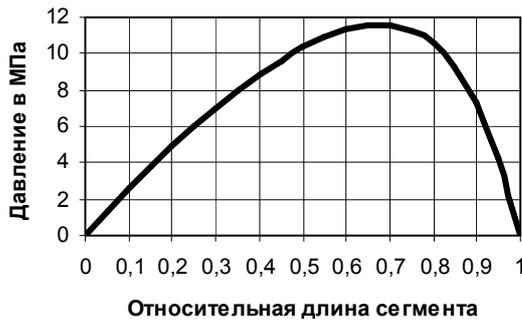


Рис. 7. Давление в смазочном слое баббитового сегмента в среднем сечении

где  $M_i$  – моменты дискретных значений давления  $P_i$  относительно оси, проходящей через центр окружности и перпендикулярной оси симметрии сегмента

$$M_i = P_i \cdot R_{cp} \cdot \cos \varphi_i, \text{ где } \varphi_i = \frac{\alpha^0}{2} - \frac{\alpha^0}{N} \cdot i \quad (16)$$

Расчет координаты центра давления дуги произведенный в соответствии с выражением (15), (16) дает следующее значение

$$y_{ц.д.} = 1408,84 \text{ мм}$$

При этом смещение координаты равнодействующей относительно окружности радиуса  $R_{cp}$  будет равно

$$\Delta y = y_{ц.д.} - R_{cp} = -3,67 \text{ мм.} \quad (17)$$

Полученное в (17) смещение будет использовано нами позднее.

Оценка значения радиальной координаты центра давления и соответствующего значения радиального эксцентриситета произведены в настоящем разделе в соответствии с разработанной в СГАУ методикой. Сущность методики заключается в замене интегралов по поверхности сегмента (5) от непрерывной функции гидродинамических давлений  $p$  в смазочном слое сегмента суммой дискретных значений моментов  $M_i$  от дискретных значений грузоподъемностей  $W_i$  цилиндрических слоев эпюры давлений относительно оси, перпендикулярной оси симметрии сегмента и проходящей через точку пересечения внутренней кромки сегмента с осью симметрии сегмента. При этом

$$y_{ц.д.} = \frac{\sum_0^N M_i}{\sum_0^N W_i}, \quad (18)$$

где  $y_{ц.д.}$  – координата центра давления относительно внутренней кромки сегмента, при условии нахождения дискретных значений грузоподъемностей  $W_i$  цилиндрических слоев на пересечении оси симметрии сегмента и окружностей радиусов цилиндрических слоев;

$N = 50$  – дискретность в радиальном направлении.

Грузоподъемность в среднем сечении определяется с учетом эпюры давлений в среднем сечении и дискретности  $N$ .

Грузоподъемность в остальных сечениях определяется с учетом грузоподъемности в среднем сечении и функции распределения давления в радиальном направлении (удельными нагрузками в соответствующих сечениях).

Эпюра гидродинамических давлений, представленная на рис. 7, получена при условии отсутствия радиального истечения смазки. При этом расчетная удельная нагрузка в среднем сечении равна  $P_{уд1}$

$$P_{уд1} = \frac{\sum_0^N P_i}{N}, \quad (19)$$

где  $P_i$  – дискретные значения давлений в среднем окружном сечении.

Для учета радиального истечения на практике обычно пользуются приближенным методом [3], вводя поправку ее (формула Шибеля  $P$  [13]),

$$\varepsilon = \frac{5}{6} \cdot \left[ \frac{1}{1 + \frac{L^2}{B^2}} \right]. \quad (20)$$

При этом удельная нагрузка на сегмент (удельная нагрузка в радиальном направлении)  $P_{уд}$  равна

$$P_{уд} = P_{уд1} \cdot \varepsilon, \quad (21)$$

Для рассматриваемого сегмента  $\varepsilon = 0,486$ , что весьма близко к  $\varepsilon = 0,5$ . При таком значении  $\varepsilon$  и при нулевых давлениях на внутренней и внешней кромках сегмента эпюра в радиальном сечении удельных давлений в окружных сечениях будет представлять собой треугольник, вершина которого находится в среднем сечении.

В действительности же в результате на-

**Таблица 4.** Результаты расчета  $W_i$  и  $M_i$  для баббитового сегмента.

№ сечения	$W_i$	$M_i$
0	0	0
5	759,0	39847,2
10	1412,2	148277,5
15	1830,0	288218,8
20	2098,3	440647,5
25	2281,7	598947,4
30	2434,8	766972,8
35	2465,0	905885,0
40	2210,0	928211,9
45	1330,7	628748,1
50	0	0
Сумма:	85000,0	24035680,0

турных испытаний [14] установлено, что эпюра давлений (функция распределения давления) в радиальной плоскости, проходящей через опору сегмента, представляет собой выпуклую плавную кривую.

С учетом этого обстоятельства рассчитаны дискретные значения грузоподъемностей в окружающих сечениях  $W_i$  и моменты  $M_i$ , представленные в табл. 4.

В соответствии с результатами расчета, представленными в табл. 4, и выражением (18) находим кажущуюся координату центра давления без учета её смещения к центру вследствие кривизны слоев

$$уц.д.к. = 282,77 \text{ мм.}$$

С учетом кривизны слоев координата центра давления будет смещена к центру подпятника. С достаточной степенью точности это смещение можно считать равным рассчитанному согласно (17) смещению для равнодействующей эпюры гидродинамических давлений на среднем радиусе. Таким образом, фактическое значение координаты центра давления относительно внутренней кромки сегмента будет равно

$$уц.д. = 282,77 - 3,67 = 279,1 \cong 279 \text{ мм, (22)}$$

а относительно центра подпятника

$$Rц.д. = R_1 + уц.д. = 1150 + 279 = 1429 \text{ мм. (23)}$$

При координате центра тяжести  $R_{цт} = 1421,5$  мм и координате центра давления  $R_{цд} = 1429$  мм радиальный эксцентриситет равен

$$\varepsilon_R = \frac{R_{цд} - R_{цт}}{R_2 - R_1} \cdot 100\% = \frac{1429 - 1421,5}{1675 - 1150} \cdot 100\% = 1,43\% \quad (24)$$

Согласно чертежу на подпятник радиальная координата опоры равна

$$R_{оп} = 1402 \text{ мм.}$$

Следовательно, смещение координаты опоры относительно координаты равнодействующей сил давления равно

$$\Delta_{см} = -27 \text{ мм, (25)}$$

что свидетельствует о неправильном расположении опоры сегментов и имеет место перекос баббитовых сегментов при работе в составе подпятника.

Отметим, что удельное давление на сегмент составляет  $P_{уд} = 3,78$  МПа, а удельное давление в среднем сечении  $P_{уд1} = 4,80$  МПа. При этом

$$\varepsilon = P_{уд} / P_{уд1} = 0,79, \quad (26)$$

что существенно выше значения, найденного по выражению (20). Это обстоятельство приводит к снижению удельной нагрузки и, следовательно, максимального давления в окружающем сечении на среднем радиусе

Известно, что в связи с податливостью ЭМП-покрытия толщина смазочного слоя на внутренней и внешней кромке ЭМП-сегмента меньше, чем у сегмента с баббитовым покрытием. Это приводит к уменьшению торцевых утечек, к иной функции распределения давления в радиальном сечении и, следовательно, к увеличению коэффициента ее по сравнению с баббитовым сегментом, т.е.  $\varepsilon \gg 0,8$ . Это обстоятельство учитывается при расчёте дискретных значения грузоподъемностей в окружающих сечениях  $W_i$  и моментов  $M_i$  для сегментов с ЭМП-покрытием.

### Результаты расчета радиальных координат центров гидродинамических давлений отдельных ГЭС

С использованием разработанной в СГАУ методики авторами были произведены расчеты радиальных координат центров гидродинамических давлений для баббитовых сегментов и сегментов с ЭМП-покрытием для следующих ГЭС: Жигулевская ГЭС, Плявиньская ГЭС (Латвия), Саяно-Шушенская ГЭС, ГЭС -2 Кубанской группы ГЭС.

Ниже приводятся результаты расчетов.

**Таблица 5.** Радиальные координаты для баббитовых сегментов

		R <sub>оп</sub> , мм	R <sub>цд</sub> , мм	ΔR, мм
Ж ГЭС	внутр	1357	1362,8	-5,8
	наружн	1905	1906,4	-1,4
СШГЭС	внутр	1612,5	1612,5	0
	наружн	2087,5	2090,2	-2,7
ПлГЭС		1402	1429	-27
ГЭС 2		555	572,7	-17,7

**Таблица 6.** Радиальные координаты для ЭМП - сегментов

		R <sub>оп</sub> , мм	R <sub>цд</sub> , мм	ΔR, мм
Ж ГЭС	внутр	1357	1383,7	-26,7
	наружн	1905	1903,5	+1,5
СШГЭС	внутр	1612,5	1604,2	+8,3
	наружн	2087,5	2086,7	+0,8
ПлГЭС		1402	1408,5	-6,5
ГЭС 2		555	564,2	-9,2

После коррекции чертежа на расположение ЭМП-покрытия относительно стального основания внутреннего сегмента Жигулевской ГЭС были проведены натурные испытания, подтвердившие отсутствие перекосов в радиальной плоскости внутреннего и наружного сегментов, что подтвердило достоверность разработанной методики.

Баббитовые сегменты гидроагрегатов Плявиньской ГЭС и ГЭС-2 Кубанской группы ГЭС работали неудовлетворительно. При переходе на сегменты с ЭМП-покрытием отмечена удовлетворительная работа гидроагрегатов Плявиньской ГЭС. Сегменты гидроагрегатов ГЭС-2 имеют повышенный износ ЭМП-покрытия со стороны внутренней кромки. Это потребовало корректировки чертежа на конфигурацию ЭМП-покрытия.

Установка сегментов в подпятники с использованием разработанной методики защищена патентом РФ [15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьячков А.К. Расчет несущей способности масляного слоя, трения и координат центра давления упорных подушек подпятника, имеющих криволинейный контур // Развитие гидродинамической теории смазки применительно к упорным подшипникам скольжения // Под редакцией Дьячкова А.К. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
2. Александров А.Е. Методические указания по эксплуатации подпятников вертикальных гидроагрегатов. РД34.31.501-9, М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1998.
3. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1963.
4. Яновский М.И. Конструирование и расчет на прочность деталей паровых турбин. М.: Изд-во АН СССР, 1947.
5. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). М.: Машиностроение, 1980.
6. Детинко Ф.М., Запольский П.П., Каплан М.Я. Вопросы расчета, конструирования, исследования и эксплуатации подпятников гидрогенераторов ЛЭО "Электросила" // Электросила. Л.: Энергия, 1973. Вып. 29.
7. Расчет радиального и тангенциального эксцентриситетов трех модификаций сегментов подпятника гидроагрегата Плявиньской ГЭС / Байбородов Ю.И., Инцин Ю.А. и др.: Отчет. Самара: СГАУ, 2005.
8. А.С. 273081 СССР. Подпятник / Ю.И. Байбородов, А.И. Данильченко.
9. А.С. № 649898 СССР. Упругий самоустанавливающийся сегмент подпятника / Байбородов Ю.И., Коднир Д.С., Савинов А.П. и др.
10. Коднир Д.С. Контактно-гидродинамическая теория смазки. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1963.
11. Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчет деталей машин. М.: Машиностроение, 1988.
12. Токарь И.Я., Сайчук И.В., Школьник М.Е. К расчету подпятников гидрогенераторов // Машиноведение. 1976. № 2.
13. Shiebel R. Die Gleitlager. Berechnung und Konstruktion. Berlin, Spr. 1933 (русский перевод, ОНТИ, 1936)
14. Опыт эксплуатации эластичных металлопластмассовых сегментов в подпятнике гидроагрегата № 9 Волжской ГЭС имени В.И. Ленина / А.А. Романов, А.В. Терещенко, А.А. Павлов и др., "Гидротехническое

строительство” № 10, 1977.  
15. Патент РФ № 2262013, F 16 C 17/08.  
Способ установки сегментов в подпят-

никах гидроагрегатов / Ю.И. Байбородов, Ю.А. Инцин. Опубликовано БИ № 28, 10.10.2005.

**CALCULATION OF THE RADIAL COORDINATE OF THE CENTER  
OF HYDRODYNAMICAL PRESSURE OF THE SELF-SET ELASTIC  
METALPLASTIC SEGMENTS IN VIEW  
OF THE PLIABILITY OF THE COVERING**

© 2007 Yu.I. Bayborodov, Yu.A. Intsin

Samara State Aerospace University

Calculations of radial coordinate of the center of hydrodynamical pressure with use of three known methods, confirmed their insignificant divergence are presented. The new method of calculation of radial coordinate of the center of hydrodynamical pressure developed by authors and results of its use with reference to bearing segments of four hydropower stations is considered. The received results confirm high reliability of the new method. Results of calculations of coordinate of the center of hydrodynamical pressure obtained by means of the new method of calculation developed by authors are presented. The results are confirmed by natural tests for the powerful hydrounit of the Volga hydropower station named after V.I. Lenin.