

УДК 621.224.7

Ю.Г.Матюшкова, К.В.Попова (5 курс, каф. ГМ), Г.И.Топаж, д.т.н., проф.

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В НАПРАВЛЯЮЩЕМ АППАРАТЕ РЕАКТИВНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ

Целью данной работы является изучение влияния формы лопатки на величину потерь энергии в направляющем аппарате (НА) и сопоставление результатов расчета потерь в НА с результатами экспериментальных исследований, выполненных в работе Никитина И.М.

Направляющий аппарат вертикальной реактивной гидротурбины можно рассматривать как круговую решетку, потери энергии в которой состоят из профильных потерь (потери на трение, кромочные и вторичные потери) и «ударных» потерь, обусловленных отрывом потока на входной кромке лопаток при их обтекании с большими углами атаки.

Профильные потери энергии определяются по формуле:

$$h_{\text{пр}} = \varphi_{\text{пр}} \cdot (V_2)^2 / 2g, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{пр}}$  – безразмерный коэффициент профильных потерь, который определяется на основе теории пограничного слоя в результате расчета обтекания круговой решетки профилей НА,  $V_2$  – радиальная (расходная) скорость на выходе из НА.

«Ударные» потери энергии определяются по формуле:

$$h_{\text{уд}} = (\text{ctg} \alpha_1 - \text{ctg} \alpha_{\text{бв}})^2 \cdot (V_1)^2 / 2g, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – угол между вектором скорости и окружным направлением на входе в НА,  $\alpha_{\text{бв}}$  – угол безударного обтекания, который определяется в результате расчета обтекания решеток профилей НА,  $V_1$  – радиальная (расходная) скорость на входе в НА.

Учитывая, что величины скоростей  $V_1$  и  $V_2$  пропорциональны расходу  $Q$  и обратно пропорциональны высоте НА  $b_0$  и диаметру осей поворота лопаток НА  $D_0$ , в работе Никитина И.М. суммарные, отнесенные к напору  $H$  потери энергии в НА, представлены в виде:

$$\underline{h} = (h_{\text{пр}} + h_{\text{уд}}) / H = \varphi_{\text{на}} \cdot (Q_1)^2 / (g \cdot (D_0 \cdot b_0)^2), \quad (3)$$

где  $Q_1 = Q / (D^2 \sqrt{H})$  – приведенный расход,  $D_0$  и  $b_0$  – безразмерные, отнесенные к диаметру рабочего колеса  $D$ ,  $\varphi_{\text{на}}$  – коэффициент суммарных потерь в НА.

Таблица 1. Результаты расчета коэффициента потерь в НА.

Лопатка положительной кривизны								
$\theta$	$\alpha_1$	$h_{\text{пр}}/H$	$h_{\text{уд}}/H$	$\underline{h}$	$\alpha_2$	$\Delta\alpha$	$\alpha_{\text{бв}}$	$\varphi_{\text{на}}$
50	32.5	0.0198	0.0117	0.0315	41.6	-9.1	43.3	0.0047
60	32.5	0.013	0.1045	0.1175	53.1	-20.6	53.5	0.0176
70	32.5	0.0098	0.2227	0.2325	64.8	-32.5	63.8	0.0349
80	32.5	0.0082	0.3448	0.353	76.7	-44.2	74.1	0.053
90	32.5	0.0075	0.47	0.4775	88.7	-56.2	84.3	0.0716
30	32.5	0.0968	0.0	0.0968	19.6	11.9	23.1	0.0145
30	42.5	0.0963	0.0030	0.0993	19.6	22.8	23.1	0.015
30	52.5	0.0959	0.0534	0.1493	19.6	32.8	23.1	0.022
30	62.5	0.0957	0.1339	0.2296	19.6	42.8	23.1	0.0344
30	72.5	0.0953	0.2654	0.3608	19.6	52.8	23.1	0.0541
Лопатка отрицательной кривизны								
$\theta$	$\alpha_1$	$h_{\text{пр}}/H$	$h_{\text{уд}}/H$	$\underline{h}$	$\alpha_2$	$\Delta\alpha$	$\alpha_{\text{бв}}$	$\varphi_{\text{на}}$
50	32.5	0.0158	0.12	0.1358	42.4	-9.9	55.0	0.0204
60	32.5	0.011	0.2401	0.2511	53.6	-21.1	65.3	0.0377

70	32.5	0.0087	0.3631	0.3718	65.1	-32.6	75.7	0.0558
80	32.5	0.0077	0.4893	0.497	76.7	-44.4	85.9	0.0745
90	32.5	0.00745	0.625	0.6335	88.9	-56.4	96.2	0.095
30	76.1	0.0589	0.1602	0.2191	21.7	54.4	23.1	0.0329
30	62.5	0.0593	0.0647	0.124	21.7	40.8	23.1	0.0186
30	52.5	0.0596	0.015	0.0746	21.6	30.9	23.1	0.0112
30	42.5	0.0601	0.0	0.0601	21.6	20.9	23.1	0.009
30	32.5	0.0607	0.0	0.0607	21.5	11.0	23.1	0.0091

В работе Никитина И.М. изложены результаты экспериментальных исследований потерь энергии в направляющем аппарате ( $D_0=1.24$ ,  $b_0=0.1$ ) с двумя вариантами профилей лопаток (нормализованные лопатки с профилями положительной и отрицательной кривизны). Результаты эксперимента представлены в этой работе в виде зависимостей  $\varphi_{на}=f(\Delta\alpha)$  коэффициента потерь от угла поворота потока в НА  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ , где  $\alpha_2$  – угол между вектором скорости за НА и окружным направлением.

В данной работе с помощью автоматизированного программного комплекса «Гранит» были выполнены расчетные исследования потерь в указанном НА, результаты которых представлены в табл. 1. Для обеспечения положительных углов поворота потока ( $\Delta\alpha \geq 0$ ), лопатки НА были установлены на постоянном открытии (лопатки повернуты на угол  $\theta=30$  градусов от закрытого положения НА). При этом расчеты проводились при задании различных углов набегающего потока  $\alpha_1$ , которые менялись в пределах  $\alpha_1=(32.5-76.1)$  градусов. Для обеспечения отрицательных углов поворота потока ( $\Delta\alpha \leq 0$ ) расчеты проводились при задании постоянного угла набегающего потока  $\alpha_1=32.5$  градуса. В этом случае задавались различные углы поворота лопаток, которые менялись в пределах  $\theta=(50-90)$  градусов. По результатам расчета были построены зависимости  $\varphi_{на}=f(\Delta\alpha)$  для НА с лопатками положительной и отрицательной кривизны. Указанные зависимости достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, полученных в работе Никитина И.М. Следует отметить, что в этой работе не указаны углы поворота  $\theta$  лопаток НА, при которых определены экспериментальные зависимости  $\varphi_{на}=f(\Delta\alpha)$ . Результаты расчетных исследований показали, что коэффициенты потерь зависят не только от угла поворота потока, но заметно меняются с изменением угла установки лопаток НА. Это обстоятельство не позволяет оценить точность выполненных расчетных исследований на основе экспериментальных данных работы Никитина И.М.

По результатам расчета и эксперимента, зависимость  $\varphi_{на}=f(\Delta\alpha)$  для лопатки отрицательной кривизны смещена на угол  $\Delta\alpha=(10-12)^\circ$  по сравнению с указанной зависимостью для лопатки положительной кривизны. Это объясняется различием углов безударного обтекания для указанных лопаток, которое также равно величине  $120$ . При больших углах установки лопаток (то есть при работе турбины на больших открытиях, на которых углы поворота потока являются отрицательными), лопатки НА положительной кривизны имеют меньшие потери по сравнению с лопатками отрицательной кривизны. Поэтому для увеличения КПД гидротурбины на больших расходах следует применять лопатки положительной кривизны и, наоборот, чтобы увеличить КПД турбины на малых расходах, следует использовать лопатки отрицательной кривизны.