

## ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

621.438

### ВЛИЯНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ФАЗ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ГИДРОПАРОВОЙ ТУРБИНЫ РАБОТАЮЩЕЙ ПО ПРИНЦИПУ СЕГНЕРОВА КОЛЕСА

Канд. техн. наук *КАРЫШЕВ А.К.*, доктор техн. наук *МИЛЬМАН О.О.*, асп. *ШЕВЕЛЁВ Д.В.*

*На основании теоретического анализа гидродинамических процессов истечения вскипающей жидкости из сопел гидропаровой турбины получена зависимость окружного к.п.д. от параметра  $(u/c_0)$  и величины скольжения фаз  $\nu = \frac{w_{ж}}{w_n}$ . Отмечено существенное влияние скольжения фаз на оптимальное значение  $(u/c_0)$ , соответствующее максимальному к.п.д. Предлагаемая методика позволяет прогнозировать основные показатели гидропаровой турбины, работающей по принципу сегнера колеса (к.п.д.,  $u/c_0$  и другие) на стадиях проектирования и разработки.*

*Efficiency dependence on the parameter  $(u/c_0)$  and a phase sliding value  $\nu = \frac{w_{ж}}{w_n}$  were obtained on the basis of hydrodynamic process theoretical analysis of boiled liquid out of hydro steam turbine nozzles. There is a considerable phase sliding influence on the optimal value  $(u/c_0)$  corresponding to maximum efficiency. The proposed method allowing to predict main parameters of hydro steam turbine, operating on segner wheel principle through the design and development stages.*

В рамках внедрения энергосберегающих технологий представляет интерес использование низкопотенциальных энергоресурсов, в частности, энергии горячей воды геотермального или промышленного происхождения.

Одним из направлений утилизации тепла воды низкого потенциала ( $t = 100 \div 150^\circ\text{C}$ ) является преобразование его в механическую энергию в гидропаровых турбинах (ГПТ) работающих по принципу сегнера колеса (рис. 1).

Теория сегнера колеса при течении в нем однокомпонентного рабочего тела без фазовых переходов хорошо известна. В частности, в [1] отмечается зависимость окруж-

ного к.п.д. от отношения скоростей  $\frac{u_2}{c_0}$  и коэффициента сохранения скорости  $\varphi$ . Умень-

шение  $\varphi$  приводит к смещению максимума к.п.д. в сторону меньшего значения  $\frac{u_2}{c_0}$ . Это

объясняется эффектом повышения давления за счет действия кориолисовых сил при движении рабочего тела от центра к периферии. Данный эффект в большей мере проявляется при течении жидкости с высокой плотностью.

В соплах гидропаровой турбины движется вскипающая вода, при этом разгон парокпельного потока сопровождается дополнительными потерями кинетической энергии. Эти потери энергии будут зависеть от структуры потока и размеров капель и, в общем случае,

характеризуются отношением средних скоростей жидкой фазы и пара —  $\nu = \frac{A_{ж}}{A_{п}}$ .

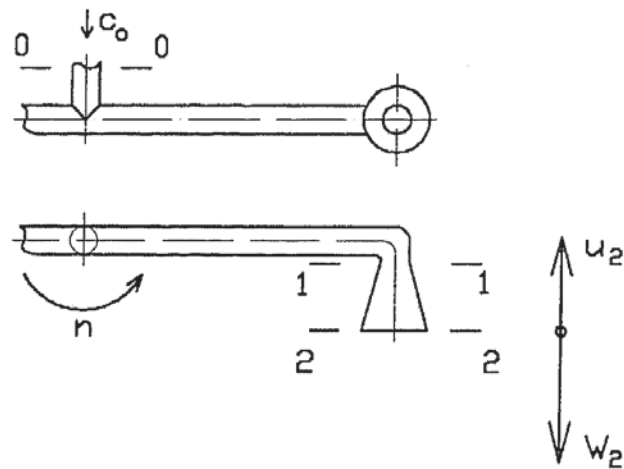
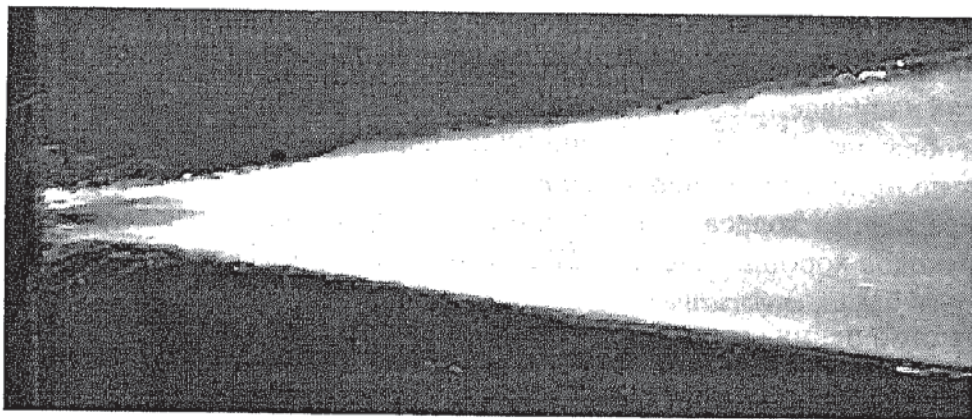


Рис. 1 Схема сегнера колеса

Следовательно, перед разработчиками ГПТ ставятся вопросы оценки к.п.д. не только в зависимости от  $\frac{u_2}{c_0}$ , но и от скольжения фаз —  $\nu$ . Поэтому, основной задачей насто-

ящей работы является получение необходимых данных для расчета и проектирования элементов ГПТ и других устройств, основанных на термодинамических и газодинамических методах анализа.

Исследование структуры потока внутри сопла, выполненное авторами на прозрачной модели [2,3], в условиях, близких к проектируемой ГПТ подтвердило, что основную роль в процессе парообразования играет механизм гетерогенной нуклеации. Вскипание начинается на стенках канала при сохранении в центральной части сопла жидкого метастабильного ядра (рис. 2).

Рис. 2. Структура вскипающего потока  $t_0=118^\circ\text{C}$ ,  $p_0=0.34\text{ МПа}$ 

В диапазоне температур и давлений  $t_0=100\div 130^\circ\text{C}$ ,  $p_0=0,1\div 0,4\text{ МПа}$  гомогенного вскипания жидкости в ядре потока не наблюдалось. Это подтверждается и результатами термометрирования потока в поперечном сечении струи, из которого следует, что в ядре струи температура на  $2\div 3^\circ\text{C}$  выше температуры насыщения и только далее на расстоянии  $2\div 3$  калибров метастабильное состояние разрушается и в выходном сечении сопла формируется парокapельный поток.

Исследование тяговых характеристик сопл ГПТ, выполненное при статических продувках [4], позволило определить в указанном диапазоне параметров коэффициент сохранения скорости  $\varphi_c = 0,55 \div 0,6$  и вычислить коэффициент скольжения фаз  $\nu = 0,2 \div 0,45$ .

Коэффициент сохранения скорости сопл, работающих на вскипающих рабочих телах, оказался меньше соответствующих его значений при течении жидкости без вскипания, что, несомненно, должно привести к снижению к.п.д. установки.

По аналогии с [1] определим окружной к.п.д. ГПТ, работающей по принципу сегнурова колеса, отношением

$$\eta_{\text{ГПТ}} = \frac{h_{\text{ГПТ}}}{h_0},$$

где  $h_{\text{ГПТ}}$  — удельная работа на ободе рабочего колеса;  $h_0 = i_0 - i_{2a}$  — располагаемый теплорезерв;  $i_0$  — энтальпия торможения рабочего тела на входе в турбину;  $i_{2a}$  — энтальпия рабочего тела на выходе из сопла при расширении его без потерь.

Удельная работа рабочего тела в соплах ГПТ может быть представлена алгебраической суммой следующих составляющих: работа расширения, определенная по параметрам до и за соплом —  $h_p$ ; работа кориолисовых сил —  $h_k = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}$ ; потери энергии с

выходной скоростью —  $\Delta h_{2,a} = \frac{c_2^2}{2}$ .

Работа расширения, в свою очередь, определяется так:

$$h_p = \left( \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \eta_n + h_0 \right) \eta_c,$$

где  $\left( \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \right) \eta_n \eta_c$  — часть работы кориолисовых сил, полезно используемых для преобразования в механическую энергию вращения рабочего колеса;  $\eta_n$  — к.п.д. «насосного» эффекта, характеризующий эффективность преобразования работы кориолисовых сил в потенциальную энергию повышения давления рабочего тела;  $\eta_c = \varphi_c^2$  — к.п.д. сопла;  $u_1, u_2$  — окружные скорости на входе и выходе из рабочего колеса;  $c_2$  — абсолютная скорость потока на выходе из рабочего колеса.

Путем несложных математических преобразований получим к.п.д. ГПТ в виде

$$\eta_{\text{ГПТ}} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{c_0^2} (\eta_n \eta_c - 1) + \eta_c - \frac{c_2^2}{c_0^2} \quad (1)$$

и представив абсолютную скорость потока на выходе из сопла, как сумму скоростей в относительном и переносном движении  $c_2 = w_2 - u_2$  получим

$$\eta_{\text{ГПТ}} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{c_0^2} (\eta_n \eta_c - 1) + \eta_c - \frac{(w_2 - u_2)^2}{c_0^2}, \quad (2)$$

где  $w_2 = \varphi_c \sqrt{2(i_1 - i_2'x - i_2'(1-x))}$  — относительная скорость парок капельной смеси на выходе из сопла. Здесь индекс «1» соответствует параметрам потока на входе в сопло, а «2» — на выходе,  $x$  — степень сухости на выходе из сопла.

Для учета эффекта скольжения фаз представим скорость  $c_2$ , определяющую потерю с выходной скоростью, через скорости паровой  $c_{2n}$  и жидкой  $c_{2ж}$  фаз введем коэффициент скольжения как отношение их относительных скоростей:

$$v = \frac{w_{2ж}}{w_{2n}}, \quad (3)$$

$$c_2 = xc_{2n} + (1-x)c_{2ж}, \quad (4)$$

$$c_{2n} = w_{2n} - u_2, \quad (5)$$

$$c_{2ж} = w_{2ж} - u_2. \quad (6)$$

Тогда выражение для  $c_2$  примет вид:

$$c_2 = x(w_{2n} - u_2) + (1-x)(vw_{2n} - u_2) \quad (7)$$

Введём понятие условной среднеэнергетической скорости потока, определив её как

$$w_{2срэн} = \sqrt{\eta_c 2h_p}. \quad (8)$$

С другой стороны удельная кинетическая энергия для двухфазного потока выражается суммой соответствующих энергий фаз

$$w_{2срэн}^2 = xw_{2n}^2 + (1-x)w_{2ж}^2, \quad (9)$$

$$w_{2срэн}^2 = w_{2n}^2 [x + (1-x)v^2]. \quad (10)$$

Тогда выражение к.п.д. ГПТ (1) с учетом соотношений (4) — (7) запишется в виде

$$\eta_{ГПТ} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{c_0^2} (\eta_n \eta_c - 1) + \eta_c - x \frac{(w_{2n} - u_2)^2}{c_0^2} - (1-x) \frac{(vw_{2n} - u_2)^2}{c_0^2}, \quad (11)$$

где  $w_{2n} = \sqrt{\frac{w_{2срэн}^2}{(x + (1-x)v^2)}} = \sqrt{\frac{\eta_c 2(i_1 - i_2''x - i_2'(1-x))}{(x + (1-x)v^2)}}$  — относительная скорость паровой фазы полученная из (10) и (8).

На рис. 3 представлена теоретическая характеристика ГПТ, рассчитанная по (11) с учетом скольжения фаз.

Видно, что с уменьшением коэффициента скольжения падает максимальное значение

окружного к.п.д., а оптимальная величина параметра  $\frac{u_2}{c_0}$  смещается в сторону меньших

значений. Не принятие в расчет коэффициента скольжения фаз (при  $v = 0,3$ ) и расчет к.п.д. по классической теории сегнера колеса привело бы к завышению максимального значения окружного к.п.д. более чем на 35% и выбору неоптимального значения параметра  $\frac{u_2}{c_0}$ .

Ориентируясь на экспериментально полученные к.п.д. сопл, работающих на вскипающей жидкости, а также - на коэффициенты скольжения фаз в них, можно оценить

окружной к.п.д. ГПТ значением порядка 12...17% и  $\left(\frac{u}{c_0}\right)_{опт} = 0,3 \div 0,35$ .

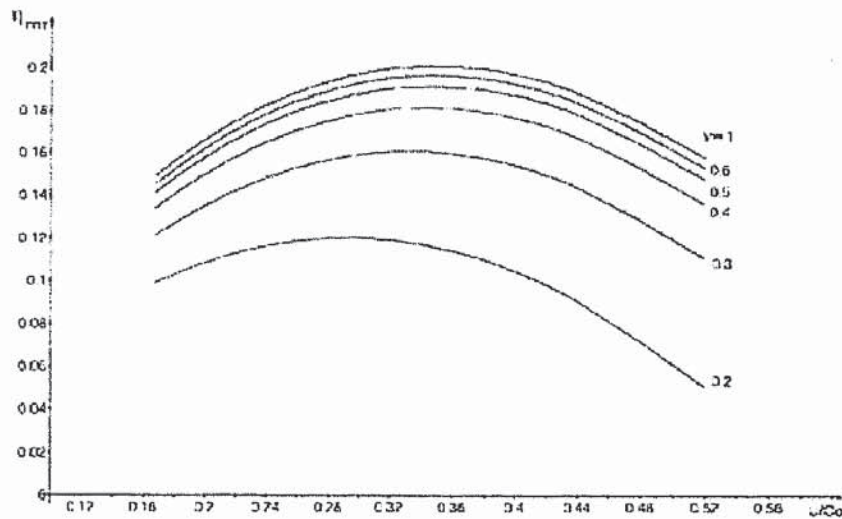


Рис. 3. Характеристика ГПТ с учетом скольжения фаз ( $\varphi_r = 0,6$ ,  $\eta_{II} = 0,7$ )

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов И. И., Кириллов А. И. Теория турбомашин. Учебное пособие для вузов. — Л.: Машиностроение, 1974. 310 с.
2. Шевелёв Д. В., Карышев А. К., Жиннов А. А., Парсегов Э. А. Экспериментальное исследование процесса адиабатного истечения самоиспаряющейся жидкости из сопл. Проблемы теплообмена и гидродинамики: Труды IV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. академика РАН В.Е. Алемасова. — Казань: Изд-во КГУ, 2004. С.219—226.
3. Шевелёв Д. В., Карышев А. К. Режимы истечения самоиспаряющейся жидкости из сопл. Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках Труды XV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под рук. академика РАН А.И. Леонтьева. В 2-х т. Т.1. — М.: Изд-во МЭИ, 2005 с.206—209.
4. Голдин А. С., Мильман О. О. Экспериментальное исследование расширяющихся сопл, работающих на сильно недогретой воде // Теплоэнергетика 2003, №3. С. 70—73.

532.542.4.013.2:541.12.012.3

### СКОРОСТНАЯ НЕРАВНОВЕСНОСТЬ В ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ

Канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ВОЛОДИН, асп. А.Н. БОГДАНОВ

*Проведен анализ скоростной неравновесности двухфазных потоков и выполнен расчет.*

*Analysis of a high-speed Nonequilibrium in two phase flows is made and the calculations are presented.*

Стационарному и нестационарному режимам течения двухфазных потоков сопутствует эффект скольжения частиц. Известен целый ряд работ, в том числе [1—6], в которых авторы экспериментально либо аналитически для различных динамических условий определяли дефект скорости частиц.

Анализ движения совокупности частиц выполнен на основе изучения поведения репрезентативной частицы, помещённой в потенциальную часть потока. Правомерность исполь-