

УДК 621.224

*К.А. МИРОНОВ*, старший преподаватель (НТУ «ХПИ»)

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА БОКСА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАДИАЛЬНО–ОСЕВЫХ ГИДРОТУРБИН**

Описано вживання узагальненої математичної моделі для вирішення зворотної задачі теорії робочого процесу. Приведені результати розрахунку при використанні комплексного методу Боксу.

Ключові слова: математична модель, гідротурбіна, проточна частина.

Application of the generalized mathematical model is described for the decision of reverse task of theory of working process. The results of calculation are resulted at the use of complex method of Box.

Key words: mathematical model, hydroturbine, flow space.

### **Введение**

Повышение эффективности гидротурбинного оборудования ГЭС представляет важную проблему, решение которой приводит к необходимости совершенствования современных методов расчета и анализа рабочего процесса гидротурбин (ГТ).

Общепринятый подход для совершенствования проточных частей (ПЧ) ГТ заключается в формировании ее геометрии путем внесения изменений в исходный вариант, полученный в результате приближенного решения обратной задачи, либо, в принятый в качестве аналога. Сравнение проектных вариантов производится на основе расчетной оценки их кинематических и энергетических характеристик. Поиск оптимального варианта чрезвычайно затрудняет процесс совершенствования ПЧ, поскольку такой подход требует перебора значительного количества геометрических параметров и их комбинаций. Трудность решения поставленной задачи обусловлена как сложной пространственной геометрией лопастной системы рабочего колеса (РК), так и различной степенью влияния рабочих органов на формирование энергетических характеристик.

Особую роль методы математического моделирования играют при реконструкции ГЭС, когда, не изменяя ПЧ в целом: спиральную камеру (СК), колоны статора, отсасывающую трубу, за счет установки более совершенной лопастной системы РК и лопаток направляющего аппарата (НА) удастся повысить уровень КПД и мощности ГТ.

В настоящее время при разработке новых ПЧ и лопастных систем основным является математическое моделирование на ЭВМ с применением современных компьютерных технологий и математических моделей.

Отсутствие методики согласования элементов ПЧ в процессе ее формирования на основе решения прямой задачи существенно усложняет процесс совершенствования ПЧ, увеличивает объем научно-исследовательских и проектных работ. Поэтому разработка адекватной математической модели для расчета и анализа энергетических характеристик и ее применение для согласования элементов ПЧ при проектировании радиально-осевых (РО) ГТ является весьма актуальной задачей, решению которой и посвящена данная работа.

### **Результаты**

Задача проектирования ПЧ на первом этапе может быть сформулирована как задача нахождения гидродинамических параметров, обращающих целевую функцию -  $\eta_{\Gamma}$  ГТ – в максимум, при заданных значениях расчетного режима и функциональном ограничении, выражающем условие энергетического баланса [1,2]. В соответствии с [2] будем исходить из представления  $\eta_{\Gamma}$  в виде:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{k_{HT}}{g} \left( \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}; k_Q; L'_{PK} \right) Q_1'^2, \quad (1)$$

Режимные и гидродинамические параметры ПЧ связаны функциональным ограничением, вытекающим из условия энергетического баланса ГТ:

$$Q_1'^2 \left[ k_{HT} \left( \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L'_{PK} \right) + k_h \left( \frac{\bar{\Gamma}_{cn} D}{Q}, \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L' \right) \right] - g = 0, \quad (2)$$

Коэффициент теоретического напора  $K_{HT}$  выражается в зависимости от гидродинамических параметров пространственной решетки РК  $\lambda, \mu, k$

$$k_{HT} = \frac{g H_T D^4}{Q_k^2} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left( \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \Lambda^2 k_Q \right) k_Q, \quad (3)$$

а коэффициент сопротивления ПЧ может быть представлен в виде:

$$k_h = k_{ск+ст} + k_{НА} \left( \frac{1_0 \nu}{Q} \right) + a_1 \left( \frac{1_{cn} \nu}{Q} - \mu_{НА} \right) + a_2 \left( \frac{1_{cn} \nu}{Q} - \frac{1_0 \nu}{Q} \right) +$$

$$+ k_{РК+отс}(\mu, \mu_m) + \frac{\chi \left( \frac{\pi}{2} k_{r1}^2 k_Q - \frac{ctg \tilde{\alpha}_0}{S_1} - \mu_m \right)^2}{2\pi^2 k_{r1}^2} + \frac{1}{2\pi^2 k_{r2}^2} \left( \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q - \mu \right)^2 \quad (4).$$

Задача сводится к поиску условного экстремума функции нескольких переменных:  $\frac{\bar{\Gamma}_{cn} D}{Q}; \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}; \mu; \lambda$  и  $\mu_m$  при заданном значении параметров расчетного режима и наличии нелинейного ограничения в виде равенства (2), выражающего условие энергетического баланса. Поставленная задача решается методами нелинейного программирования.

Ниже рассмотрим другой вариант постановки задачи, при котором фиксируются не параметры расчетного режима  $n'_{1p}$  и  $Q'_{1p}$ , а обобщенный режимный параметр, задающий величину их отношения  $K_{Q_p} = \frac{\pi}{30} \frac{n'_{1p}}{Q'_{1p}}$ . Решение оптимизационной задачи в

такой постановке позволяет выявлять возможность повышения  $\eta_{\Gamma}$  за счет расширения диапазона поиска, поскольку в рассматриваемом варианте фиксируется только одна координата расчетного режима, а именно отношение  $\frac{n'_{1p}}{Q'_{1p}}$ .

Таким образом, в предлагаемой постановке решается задача нахождения вектора гидродинамических параметров ПЧ, максимизирующего целевую функцию  $\eta_{\Gamma}$  при

фиксированном значении режимного параметра  $K_{Q_p} = \frac{\pi n'_p}{30 Q'_p}$  и функциональном ограничении (2). Полученная задача представляет собой задачу условной оптимизации при наличии нелинейного ограничения в виде равенства (2).

Будем исходить из того, что предварительно выбраны меридиональные очертания ПЧ в области НА и РК и заданы положения их входных и выходных кромок. Управляемыми параметрами являются:  $\frac{\bar{\Gamma}_{cn}D}{Q}$ ;  $\frac{\bar{\Gamma}_0D}{Q}$ ;  $\mu$ ;  $\lambda$  и  $\mu_m$ .

Ограничения по изменяемым параметрам получены в результате исследования влияния отдельных элементов ПЧ на прогнозную характеристику.

Поставленная задача оптимизации решена комплексным методом Бокса [3,4,5].

В результате решения задачи оптимизации находятся искомые гидродинамические параметры. Подставляя эти величины в (1) и (2), находим соответственно параметры оптимального режима  $n'_I$ ,  $Q'_I$ ,  $\eta_I$ , соответствующие найденному набору оптимальных гидродинамических параметров ПЧ.

В табл. приведены данные расчетного определения гидродинамических параметров  $\frac{\bar{\Gamma}_{cn}D}{Q}$ ;  $\frac{\bar{\Gamma}_0D}{Q}$ ;  $\mu$ ;  $\lambda$  и  $\mu_m$  для ПЧ РО ГТ в широком диапазоне быстроходности.

Таблица. Определение гидродинамических параметров ПЧ ГТ в широком диапазоне изменения быстроходности

Тип ГТ	Гидродинамические параметры и значение КПД					
	$\frac{\bar{\Gamma}_{cn}D}{Q}$	$\frac{\bar{\Gamma}_0D}{Q}$	$\mu_m$	$\lambda$	$\mu$	$\eta$
РО 500	25,89	38,37	5,29	0,501	13,53	0,949
РО 230	11,82	15,11	3,9	0,67	8,6	0,95
РО 45	4,84	5,14	2,6	0,631	5,29	0,947

Поясним возможности использования, полученных в результате оптимизации, осредненных гидродинамических параметров при проектировании ПЧ.

Найденные величины  $(\frac{\bar{\Gamma}_{cn}D}{Q})$  и  $(\frac{\bar{\Gamma}_0D}{Q})$  являются исходными для проектирования элементов подводящей части: СК, статора, НА.

Знание  $(\frac{\bar{\Gamma}_{cn}D}{Q})$  позволяет найти оптимальный угол спирали  $\tilde{\alpha}_{cn}$ , формируемый СК и статором  $ctg\tilde{\alpha}_{cn} = (\frac{\bar{\Gamma}_{cn}D}{Q}) \frac{b_0}{D}$ , и определить геометрию входного сечения СК.

Для СК круглого сечения, рассчитанных по закону  $rCu = const$ , угол  $\tilde{\alpha}_{cn}$  связан с геометрическими параметрами входного сечения следующим образом [2,6]:

$$ctg\tilde{\alpha}_{cn} = \frac{2\pi(R_{cm} + p_{ex} - \sqrt{R_{cm}^2 + 2R_{cm}p_{ex}})}{b\varphi_{ex}}, \quad (3)$$

где  $\varphi_{ex}$  - угол охвата СК,  $\rho_{ex}$  - радиус входного сечения СК.

По найденному значению  $\left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}\right)$  находится осредненный угол потока за НА:

$$ctg \tilde{\alpha}_0 = \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}\right) \frac{b_0}{D}.$$

Полученная информация об углах потока на входе и выходе из НА должна использоваться при выборе формы профиля лопатки НА. Лопатка НА должна обеспечить поворот потока на угол  $\Delta \tilde{\alpha} = \tilde{\alpha}_{cm} - \tilde{\alpha}_0$  при минимальных потерях.

Найденные в результате оптимизации гидродинамические параметры  $\mu_m$  и  $\mu$  необходимо учитывать при профилировании лопастной системы РК. Распределения входных и выходных геометрических углов, полученные при профилировании лопастной системы РК, должны обеспечивать величины осредненных гидродинамических параметров,  $\mu_m$  и  $\mu$ , найденных в результате оптимизации.

Для этого могут быть использованы зависимости, связывающие гидродинамические параметры  $\mu$  и  $\mu_m$  с распределением геометрических углов лопасти вдоль входной и выходной кромок [2].

Гидродинамический параметр  $\lambda$  позволяет получить месторасположение выходной кромки лопасти в меридиональной проекции.

### Заклучение

Предложенный метод расчета позволяет установить взаимосвязь осредненных гидродинамических параметров ПЧ с расчетными режимными параметрами  $n'_{ip}$  и  $Q'_{ip}$  при заданных меридиональных очертаниях обводов в области НА и РК и положении входных и выходных кромок.

При недостаточно высоком значении  $\eta_{\Gamma}$ , полученном в результате оптимизации, следует изменить положение входных и выходных кромок РК, либо перейти к новым меридиональным очертаниям полости. После этого снова находятся оптимальные осредненные гидродинамические параметры, максимизирующие  $\eta_{\Gamma}$ .

Последующее проектирование элементов подводящей части и профилирование лопастной системы РК должны обеспечить полученные оптимальные величины осредненных гидродинамических параметров.

**Список литературы:** 1. Метод расчета энергетических характеристик радиально-осевых гидротурбин / В.А. Колычев, К.А. Миронов, Л.Н. Цехмистро, В.Э. Дранковский // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ "ХПІ", 2001. – Вип. 129. – Ч. 1. – С. 55–64. 2. Колычев В.А. Кинематические характеристики потока в лопастных гидромашинах : учеб. пособие / Владислав Александрович Колычев. – Киев: ИСИО, 1995. – 272 с. 3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем : [учеб. для вузов] / Владимир Петрович Тарасик. – Мн. : Дизайн ПРО, 2004. – 640 с. 4. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике : [учеб. для вузов] / В. С. Зарубин; под ред. В.С. Зарубин, А.П. Крищенко. – [2-е изд.]. – М. : Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с. 4. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования / Дмитрий Иванович Батищев. – М. : Радио и связь, 1984. – 248 с. 5. Математическая модель сопротивления подводящей части радиально-осевой гидротурбины / В.А. Ко-

**УДК 621.37:543.42**

**М.И. ДЗЮБЕНКО**, д-р физ.-мат. наук, проф., ИРЭ НАН Украины, г. Харьков  
**Д.Ф. КУЛИШЕНКО**, аспирант, ИРЭ НАН Украины, г. Харьков  
**А.А. ПРИЁМКО**, канд. тех. наук, ИРЭ НАН Украины, г. Харьков  
**В.С. КОЛПАКОВ**, студент, ХНУРЕ, г. Харьков.

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОГО ЛАЗЕРНОГО ЭМИССИОННОГО АНАЛИЗА**

Представлено теоретическое описание процесса взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения с веществом на начальной стадии испарения. Разработана математическая модель этого процесса. Определено оптимальное время регистрации эмиссионного спектра с учетом минимизации повреждений изучаемого образца. Проведена экспериментальная проверка теоретических предпосылок.

Представлено теоретичний опис процесу взаємодії низькоінтенсивного лазерного випромінювання з металами на початковій стадії випаровування. Розроблена математична модель цього процесу. Визначено оптимальний час реєстрації емісійного спектру з урахуванням мінімізації пошкоджень зразка, що вивчається. Проведена експериментальна перевірка теоретичних посилок.

Лазерно-эмиссионный спектральный анализ в настоящее время является одним из широко используемых методов анализа состава металлических сплавов. Это обусловлено рядом его особенностей, таких как минимальная предварительная подготовка пробы; возможность экспрессного анализа; высокая чувствительность (несколько мг/кг); быстрота анализа (в зависимости от метода обработки спектральных данных - в пределах нескольких минут); высокая локальность анализа и возможность проведения многоэлементного анализа. Особый интерес авторов вызывает энергетический метод количественного лазерного анализа [1]. Этот метод, по нашему мнению, наиболее пригоден для проведения экспресс-анализа в силу низких требований к мощности лазера (импульс  $\sim 0.5$  мДж) и небольшого времени обработки спектральных данных (в пределах 4 секунд).

Вопрос выбора параметров регистрации спектра для лазерного количественного спектрального анализа исследован довольно хорошо, но большинство работ в данной области имеют дело с высокоинтенсивным лазерным излучением. В статье проведено изучение особенностей взаимодействия сплавов металлов с низкоинтенсивным лазерным излучением с целью определения оптимального окна регистрации спектра.

Теории взаимодействия мощного излучения с веществом, разработанные в 60–80-ых годах, носили, в основном исследовательский характер. Общим для них является то, что результат взаимодействия зависит от соотношения плотности мощности и плотности энергии излучения. Поэтому практическое использование результатов, разработанных теорий, как правило, заканчивается на оценке этих параметров при решения конкретной задачи. Это хорошо видно, например, из работ [2-4]. Основой изучения нами процесса выброса металла являются эмпирические данные.