

4. Наталуха, Ю. Б. Совершенствование параметров поршневых компрессоров на оппозитной базе 4M10 для ВРУ среднего давления [Текст] / Ю. Б. Наталуха, А. В. Смирнов, В. Н. Фесенко // Технические газы. – 2011. – № 6 – С. 28-32.
5. Лавренченко, Г. К. Оптимизация двухвального детандер-компрессорного агрегата с одновременным совершенствованием ВРУ средней производительности [Текст] / Г. К. Лавренченко, А. В. Плесной // Технические газы. – 2013. – № 2. – С. 15-23.
6. Peng, D. Y. A new two constant equation of state [Text] / D. Y. Peng, D. B. Robinson // Ind. Eng. Chem. Fundamen. – 1976. – Т. 15. – Р. 59-64.
7. Stryjek, R. PRSV: An improved Peng-Robinson equation of state for pure components and mixtures [Text] / R. Stryjek, J. H. Vera // The Canadian J. of Chemical Eng. – 1986. – Т. 64. – Р. 323-333.
8. Пуртов, С. Н. Совершенствование программного обеспечения HYSYS для использования в расчетах криогенных установок [Текст] / С. Н. Пуртов, А. И. Ляпин, Л. Б. Лебедев // Технические газы. – 2006. – № 5 – С. 58-61.
9. Lei, Y. A method based on multi-sensor data fusion for fault detection of planetary gearboxes [Text] / Y. Lei, J. Lin, Z. He, D. Kong // Sensors. – 2012. – Т. 12(2). – Р. 2005-2017.
10. Barzdaitis, V. Diagnostics practice of heavy duty high speed gear transmissions [Text] / P. Mažeika // Mechanika. – 2010. – № 1. – Р. 58-61.
11. Лавренченко, Г. К. Разработка проточной части компрессорной ступени для ДКА двухвальной конструкции в составе ВРУ среднего давления [Текст] / Г. К. Лавренченко, А. В. Плесной // Технические газы. – 2013. – №3. – С. 26-32.
12. Yi, W. An aerodynamic design and numerical investigation of transonic centrifugal compressor stage [Text] / W. Yi, L. Ji, Y. Tian, W. Shao, W. Li, Y. Xiao // Journal of Thermal Science. – 2011. – Т. 20(3). – Р. 211-217.
13. Бойко, Л. Г. Исследование трансзвукового течения в высоконапорном центробежном рабочем колесе [Текст] / Л. Г. Бойко, Е. С. Барышева // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 203-207.
14. Cumpsty, N. A. Compressor aerodynamics [Text] / N. A. Cumpsty // England.: Longman Scientific & Technical, 1989. – 315 p.

Робота присвячена розробці методики розрахунку і аналізу гідродинамічних характеристик елементарних решіток робочого колеса гідротурбіни. Приведені рівняння, що описують кінематику потоку в абсолютному і відносному русі на вході і виході із решіток робочого колеса. Ця методика розрахунку гідродинамічних характеристик окремих решіток дозволяє зробити оцінку їх впливу на енергетичні якості робочого колеса

Ключові слова: радіально-осьова гідротурбіна, робоче колесо, гідродинамічні характеристики, енергетичні характеристики, проточна частина

Робота посвящена разработке методики определения и анализа гидродинамических характеристик элементарных решеток рабочего колеса гидротурбины. Приведены уравнения, описывающие кинематику потока в абсолютном и относительном движении на входе и выходе из решетки рабочего колеса. Данная методика расчета и анализа гидродинамических характеристик отдельных решеток позволяет произвести оценку их влияния на энергетические качества рабочего колеса

Ключевые слова: радиально-осевая гидротурбина, рабочее колесо, гидродинамические характеристики, энергетические характеристики, проточная часть

УДК 621.224

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ РЕШЕТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ГИДРОТУРБИНЫ

И. И. Тынъянова

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра «Гидравлические машины»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: tinyanova@kpi.kharkov.ua

1. Введение

При модификации рабочего колеса (РК) радиально-осевой (РО) гидротурбины (ГТ) возникает не-

обходимость внесения изменений в геометрию отдельных решеток. Количественная оценка изменений, вносимых в геометрию проточной части (ПЧ), должна базироваться на кинематическом и энергетическом

анализе отдельных решеток РК, составляющих РК. Анализ формирования энергетических и кинематических характеристик пространственной решетки РК необходим для выявления роли (вклада) отдельной решетки (периферийной, втулочной) при обеспечении требуемых показателей. Поэтому, задачу анализа силового взаимодействия потока с отдельными решетками следует считать весьма актуальной.

2. Постановка задачи

Целью работы является разработка методики определения и анализа гидродинамических характеристик элементарных решеток РК ГТ, позволяющую производить оценку степени согласованности отдельных решеток, составляющих пространственную решетку РК.

3. Литературный обзор

В ряде работ приводятся данные численных исследований, отражающих влияние отдельных решеток РК на энергокавитационные показатели обратимых ГМ, поворотно-лопастных ГМ и РО средней быстроходности [1 – 4].

4. Основная часть

4.1. Кинематические характеристики элементарных решеток

Под кинематическими характеристиками элементарных решеток будем понимать зависимость выходных параметров потока от входных параметров и режимных параметров.

В рассматриваемом случае остается неизменной геометрия каждой из элементарных решеток, составляющих РК. Меридиональная скорость на входной кромке и выходной кромке может быть представлена в виде: $C_{1m} = V_1(l_1)Q$ и $C_{2m} = V_2(l_2)Q$. Параметры $V_1(l_1)$, $V_2(l_2)$ – зависят от геометрии решетки на данной поверхности тока и не зависят от режима; криволинейные координаты l_1 и l_2 – отсчитываются от втулки соответственно вдоль входной и выходной кромок лопасти РК.

В рамках рассматриваемой приближенной модели течения коэффициент меридиональной скорости

$C_m^* = C_m D^2 / Q = BD^2 = B'$ в каждой точке входной и выходной кромки остается постоянным (не зависит от режимных параметров ω и Q). Величины коэффициентов меридиональной скорости находится из уравнения расхода.

$$C_{1m}^* = B_1' = \frac{1}{n2\pi r_1' \Delta_1'}, \quad C_{2m}^* = B_2' = \frac{1}{n2\pi r_2' \Delta_2'}, \quad (1)$$

где Δ_1' , Δ_2' – толщины слоя потока элементарных решеток на входной и выходной кромок, отнесенные диаметру РК к $D=1$ м, $r_1' = \frac{r_1}{D}$, $r_2' = \frac{r_2}{D}$. Распределение коэффициента меридиональной скорости B_2' вдоль

выходной кромки определяются в соответствии с принятым меридиональным потоком и сохраняется с изменением режима.

Углы потока в абсолютном и относительном движении на входе в элементарную решетку находятся из уравнений кинематической связи [5, 6]:

$$\text{ctg} \alpha_1 = \frac{1}{2\pi B_1 r_1'} \frac{\Gamma_0 D}{Q}, \quad (2)$$

$$\text{ctg} \beta_1 = \frac{r_1'}{B_1} k_Q - \text{ctg} \alpha_1,$$

$$\text{ctg} \beta_1 = \frac{r_1'}{B_1} k_Q - \frac{1}{2\pi B_1 r_1'} \frac{\Gamma_0 D}{Q},$$

$$\text{ctg} \beta_1 = \frac{r_1'}{B_1} k_Q - \frac{m}{2\pi B_1 r_1'} \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) $k_Q = \frac{\omega D^3}{Q} = \frac{\pi n_1}{30 Q_1}$ – обобщенный режимный параметр; $\frac{\Gamma_0 D}{Q}$ – безразмерные кинематический комплекс за НА; $\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}$ – осредненный кинематический комплекс; $m = \left(\frac{\Gamma_0 D}{Q} / \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} \right)$ –

коэффициент, учитывающий неравномерность входной циркуляции по высоте лопасти, α_1 – угол потока в абсолютном движении во входном сечении РК, β_1 – угол потока на входе в РК в относительном движении.

Циркуляция и углы потока в абсолютном и относительном движении на выходе из элементарной решетки:

$$\Gamma_2 = k\Gamma_1 - (1-k)q \text{ctg} \beta_{02} + (1-k)2\pi r_a^2 \omega, \quad (4)$$

$$\text{ctg} \alpha_2 = k \frac{r_1^2 B_1'}{r_2^2 B_2'} \text{ctg} \beta_1 - (1-k) \text{ctg} \beta_{02} + (1-k) \frac{r_a^2}{r_2^2} \frac{r_2'}{B_2'} \frac{\omega D^3}{Q}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ctg} \beta_2 &= k \frac{r_1'}{r_2'} \frac{B_1'}{B_2'} \text{ctg} \beta_1 + (1-k) \text{ctg} \beta_{02} - \\ &- (1-k) \left[\frac{r_a^2}{r_2^2} - \frac{(1-k) \frac{r_1^2}{r_2^2}}{1-k} \right] \frac{r_2'}{B_2'} \frac{\omega D^3}{Q}. \end{aligned} \quad (6)$$

В формулах (4)–(6) k, r_a – гидродинамические параметры элементарной решетки:

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta_2} = 2\pi r_2 C_{2m}, \quad (7)$$

q – расход, отнесенный к толщине слоя потока в окрестности выходной кромки.

Для густых решеток РО РК коэффициент прозрачности k мал, поэтому можно полагать $k=0$. Активный радиус решетки r_a находится с помощью упрощенных моделей течения в каналах рабочего колеса, предложенных Стодолой, Майзелем, Шерстюком и др. Напри-

мер, по формуле Стодолы [6, 7]: $r_a = r_2 \sqrt{1 + \frac{\pi}{z} \sin \beta_{2r} \sin \gamma_2}$.

Для определения угла безударного направления потока за решеткой β_{02} вводится поправка, учитывающая отличие его от выходного геометрического угла $\beta_{02} = \beta_{2r} + \Delta\beta_{02}$.

Формулы (1), (5), (6) решают задачу расчета меридиональных скоростей и углов потока (в абсолютном и относительном движении) в окрестности выходной кромки. Окружная составляющая скорости находится из выходного треугольника скоростей $C_{2u} = C_{2m} \text{ctg} \alpha_2$.

Для каждой из элементарных решеток РК справедливо уравнение связи циркуляций (4), приведем уравнение в безразмерной форме:

$$\frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} = k m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} - (1-k)\mu + (1-k) \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q, \quad (8)$$

где $\mu = \frac{\text{ctg} \beta_{02}}{\Delta_2} = 2\pi r_2 B_2' \text{ctg} \beta_{02}$ – гидродинамический параметр пространственной решетки, характеризующий направление потока в относительном движении, при котором гидравлический момент на решетке равен нулю; $\lambda = \frac{r_a^2}{R^2}$ – безразмерный активный радиус решетки; $\Delta_2 = \frac{1}{2\pi r_2 B_2}$ – толщина слоя потока элементарной

решетки в выходном сечении РК. Приведенные уравнения описывают кинематику потока в абсолютном и относительном движении на входе и выходе из решетки РК и могут быть использованы для анализа потока ПЧ ГМ. Данные уравнения также используются для расчета отдельных видов потерь энергии в элементарных решетках, составляющих пространственную решетку РК РО ГТ.

4.2. Безразмерные теоретические характеристики элементарной решетки РК

Важнейшими параметрами, характеризующими взаимодействие потока с РК ГТ, являются гидравлический момент относительно оси вращения и гидравлическая мощность, отданная жидкостью РК.

Приведем уравнение безразмерных напорной, моментной, и мощностной характеристик, соответственно, для элементарной решетки РК в безразмерном виде, где в качестве переменных с независимой размерностью приняты: ρ, D и Q [8, 9]:

$$k_{HT} = \frac{1-k}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q \right), \quad (9)$$

$$k_{MG} = \frac{M_{\Gamma} D}{\rho Q^2} = \frac{1-k}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q \right) k_Q, \quad (10)$$

$$k_{NG} = \frac{N_{\Gamma} D^4}{\rho Q^3} = k_{HN} = \frac{1-k}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q \right). \quad (11)$$

Для исследования рабочего процесса целесообразно также использовать другой вариант безразмерных комплексов, в котором в качестве величин с независимой размерностью приняты ρ, ω, D .

Уравнения безразмерных напорной, моментной и мощностной характеристик:

$$k_{HT}^* = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^* - \frac{(1-k)}{4} \lambda^2, \quad (12)$$

$$k_{MG}^* = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^{*2} - \frac{(1-k)}{4} \lambda^2 k_Q^*, \quad (13)$$

$$k_{NG}^* = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^{*2} - \frac{(1-k)}{4} \lambda^2 k_Q^*. \quad (14)$$

Из сравнения (13) и (14) следует: $k_{NG}^* = k_{MG}^*$.

4.3. Связь гидродинамических параметров элементарных решеток с пространственной решеткой РК

По вычисленным параметрам элементарных решеток с помощью формул осреднения, приведенных в [5, 6], находятся параметры пространственной решетки РК.

Для каждой из элементарных решеток РК справедливо уравнение связи циркуляций (4). Умножая обе

части уравнения на $\frac{dQ}{Q}$ и интегрируя по всем элементарным решеткам находим:

$$\bar{\Gamma}_2 = k_{cp} \bar{\Gamma}_1 - (1-k_{cp}) \bar{q} \text{ctg} \tilde{\beta}_{02} + (1-k_{cp}) 2\pi r_a^2 \omega, \quad (15)$$

где $\bar{q} = \int q dQ$, $\text{ctg} \tilde{\beta}_{02} = \frac{\int q \text{ctg} \beta_{02} dQ}{\int q dQ}$, $\frac{r_a^2}{R^2} = \frac{1}{Q} \int \left(\frac{r_a}{R} \right)^2 dQ$.

Обозначив $\bar{q} = \frac{1}{Q} \int q dQ = \frac{Q}{\Delta_2}$, (16)

$$\Lambda = \frac{r_a^2}{R^2} = \sqrt{\frac{1}{Q} \int \left(\frac{r_a}{R} \right)^2 dQ}, \quad (17)$$

$$\mu = \frac{\text{ctg} \tilde{\beta}_{02} D}{\Delta_2} = \frac{D \int q \text{ctg} \beta_{02} dQ}{Q^2}. \quad (18)$$

Учитывая $q = \frac{\Delta Q}{\Delta_2} = 2\pi r_2 C_{2m} = 2\pi r_2 B_2 Q$, $B_2' = B_2 D^2$ находим:

$$\tilde{\mu} = \frac{2\pi}{Q} \int r_2' B_2' \text{ctg} \beta_{02} dQ, \quad (19)$$

$$\tilde{\Delta}'_2 = \frac{\tilde{\Delta}_2}{D} = \frac{Q}{2\pi \int r_2 B'_2 dQ} \quad (20)$$

При разбивке лопастной системы РК на n элементарных решеток формулы для определения гидродинамических параметров пространственной решетки РК могут быть преобразованы к удобному для расчетов виду:

$$\Lambda^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_{a_i}^2}{R^2} \right), \quad (21)$$

$$\bar{\Delta}'_2 = \frac{n}{2\pi \sum_{i=1}^n r_2 B'_2} = \frac{n}{n^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta_{2i}}}, \quad (22)$$

$$\tilde{\mu} = \frac{2\pi}{n} \sum_{i=1}^n r_2 B'_2 \text{ctg} \beta_{0i} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{\text{ctg} \beta_{0i}}{\Delta'_{2i}}, \quad (23)$$

$$B'_2 = \frac{1}{2\pi r_2 \Delta_2 n}. \quad (24)$$

5. Закономерности изменения гидродинамических характеристик элементарных решеток

На рис. 1 показаны прямые $\frac{\Gamma_2}{n_1} = f(K_Q^*)$ при $\left(\frac{\Gamma_0 D}{Q}\right)_{\text{опт}} = \text{const}$, для трех решеток (втулочная, средняя, периферийная) соответствующие теоретической зависимости, вытекающей из (18): $\frac{\Gamma_2}{n_1} = \frac{\pi^2}{60} \lambda^2 - \frac{\pi}{30} \mu k_Q^*$, а также опытные данные пространственной решетки для РО ГТ: РО 500/3502 и РО230/989. Отрезок ОА определяет параметр разгонного режима на заданном открытии $\tilde{\alpha}_0$:

$$K_{\text{нт}}^* \Big|_{K_{\text{нт}}^* = 0} = \frac{\pi \Lambda^2}{2 \left(\frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} + \mu \right)}$$

Рабочие режимы для этого открытия размещены на участке ВС. Параметры Λ для данных элементарных решеток определяются отрезками ОД отсекаемыми прямыми по оси ординат, $K_{\text{нт}}^* \Big|_{K_{\text{нт}}^* = 0} = \frac{\Lambda^2}{4}$. Различные величины параметра μ дают разные углы наклона прямых $K_{\text{нт}}^* = f(k_Q^*)$ [10]. Расчетная величина $K_{\text{нт}}^*$ на оптимальном режиме приблизительно одинакова для всех элементарных решеток и хорошо согласуется с величиной, полученной из опытных данных (рис. 1).

На рис. 2 показаны зависимости $\frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} = f(k_Q)$ и $\eta = f(k_Q)$ для РО500 и РО230, анализ зависимостей показывает, что на всех решетках имеется небольшая положительная закрутка (при $\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} = \text{const} (a_0 = \text{const})$) вблизи режима соответствующего максимума КПД.

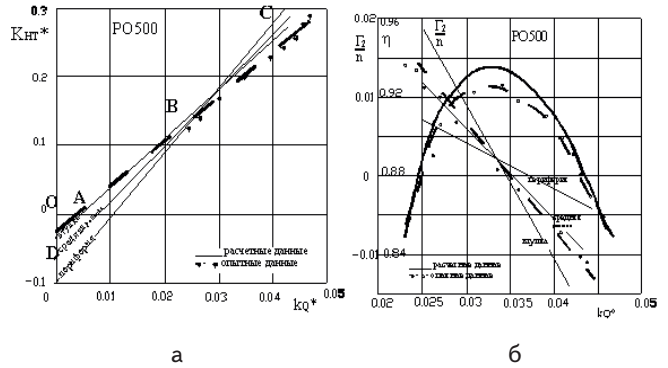


Рис. 1. Зависимости: а - $K_{\text{нт}}^* = f(k_Q^*)$; б - $\frac{\bar{\Gamma}_2}{n} = f(k_Q^*)$ и $\eta = f(k_Q^*)$ для элементарных решеток РК РО-500

Анализ зависимостей коэффициента потерь РК с высокими энергетическими показателями (рис. 3) показал, что характер, а также минимум зависимостей коэффициентов потерь трех элементарных решеток практически одинаков. Данное обстоятельство указывает на достаточно хорошее согласование элементарных решеток РК между собой, (т. е. оптимальный режим одинаков для всех решеток), что позволило получить высокие энергетические показатели ГТ.

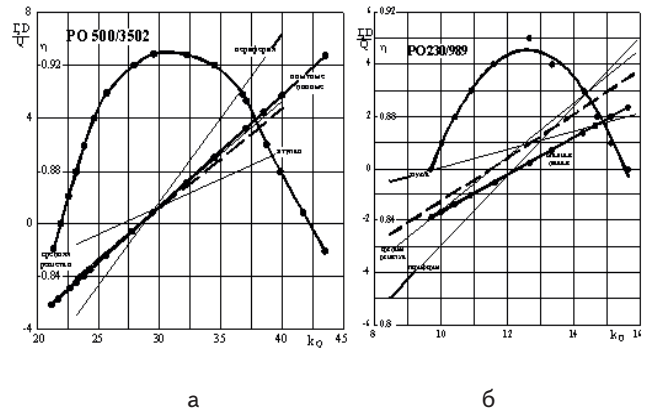


Рис. 2. Зависимости $\frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} = f(k_Q)$ и $\eta = f(k_Q)$ для РК: а – РО-500, б – РО-230

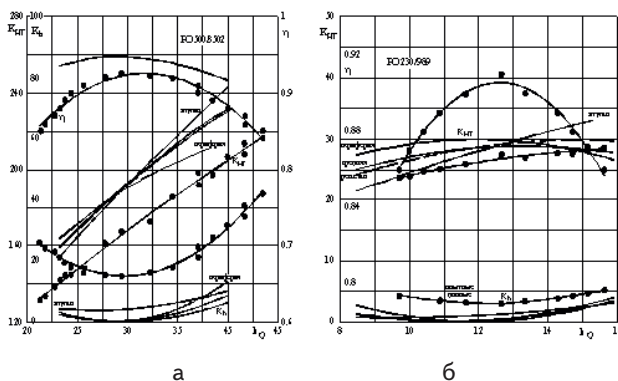


Рис. 3. Гидродинамические характеристики для РК:
а – РО-500, б – РО-230

6. Выводы

На основе анализа РК в широком диапазоне изменения напора с высокими энергетическими показателями установлено: оптимальный режим достигается при приблизительно одинаковой величине положительной циркуляции для всех решеток; величина коэффициента теоретического напора приблизительно одинакова для всех составляющих решеток.

Приведена методика расчета и анализа гидродинамических характеристик отдельных решеток, позволяющая произвести оценку их влияния на энергетические и кавитационные качества РК. Эта методика позволяет оценить степень согласованности отдельных решеток, составляющих пространственную решетку РК.

Литература

1. Тиме, И. В. Выбор основных параметров и типоразмеров обратимой гидромашины для Днестровской ГАЭС [Текст] / И. В. Тиме, И. Э. Этинберг // Тр. ЦКТИ. – Л., 1981. – Вып. 186. – С. 15-27.
2. Колычев, В. А. Расчет и исследование теоретических характеристик пространственной решетки рабочего колеса высоконапорной обратимой гидромашины [Текст] / В. А. Колычев, Н. А. Быкова // Пробл. машиностроения. - 1985. - Вып.23. - С. 95 - 102.
3. Викторов, Г. В. Применение метода математического моделирования для исследования лопастных систем диагональных поворотно-лопастных обратимых гидромашин [Текст] / Г. В. Викторов, М. М. Косенкова. - С. 5-12
4. Этинберг, И. Э. Разработка и исследование лопастных систем рабочих колес на напори 50-60 м для Маитлинской, Шульбинской и других ГЭС [Текст]/ И. Э. Этинберг. - М., 1985. - 157 с.
5. Войташевский, Д. А. Основы общей теории гидродинамических решеток применительно к гидромашинам [Текст] / Д. А. Войташевский // Тр. ВНИИГидромаша. – 1968. – Вып. 37. – С. 3-88
6. Колычев, В. А. Кинематические характеристики потока в лопастных гидромашинах [Текст]: учеб. пособие / В. А. Колычев. – Киев: ИСИО, 1995. – 272 с.
7. Руднев, С. С. Основы теории лопастных решеток [Текст]: учеб. пособие / С. С. Руднев. – М., 1976. – 61 с.
8. Колычев, В. А. Применение безразмерных параметров для анализа рабочего процесса гидротурбин [Текст] / В. А. Колычев, И. И. Тыньянова, К. А. Миронов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2005. – № 28. – С. 79–88.
9. Колычев, В. А. Общие закономерности рабочего процесса и их применение для расчета и анализа энергетических характеристик гидротурбин [Текст] / В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – Т.4, № 3 (22). – С. 54–64.
10. Моделирование кинематических характеристик потока в радиально-осевой гидротурбине при проектировании ее проточной части [Текст] / В. А. Колычев, В. Э. Дранковский, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова [и др.] // Вісник СумДУ, Вып. 13 (59), Суми, 2003 – С. 124-131