

С.Д. Косторной, Сумы
А.С. Косторной, Сумы
А.Ю. Хатунцев, Сумы
А.О. Бондарев, Сумы

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛОПАСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА НА ЗАДАННУЮ ФОРМУ ПОТОКА

Abstract. When solving the inverse problem of profiling the impeller blade of a centrifugal pump for a given form of flow, the problem arises as to choosing the law of circulating flow variation along the line of fluid flow, which provides the necessary blade coverage angle. This work presents an analytical method for choosing the dependence of circulating flow variation along the line of fluid flow, which allows one to implement a more efficient algorithm compared to iteration methods.

Введение

При профилировании лопасти рабочего колеса центробежного насоса на заданную форму потока возникает задача выбора закона изменения циркуляции вдоль линии тока, который обеспечивает необходимый угол охвата лопасти.

В рабочем колесе центробежного насоса принимаем осесимметричное модель течения. Основное уравнение движения жидкости в рабочем колесе гидромашинны [1]:

$$\vec{\Omega} \times \vec{V} = \text{grad}(gE) + \vec{F},$$

где

\vec{V} – вектор абсолютной скорости,

$\vec{\Omega} = \text{rot}(\vec{V})$,

\vec{F} – массовые лопастные силы,

$E = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z$ – полная энергия.

Граничные условия . – относительный поток совпадает с поверхностью лопастей, массовые силы направлены перпендикулярно к поверхности:

$$\vec{W} \cdot \vec{n} = 0, \quad \vec{F} \times \vec{n} = 0.$$

Таким образом, при установившемся осесимметричном движении

благодаря наличию в уравнении силы \vec{F} закрутка потока и энергия жидкости становятся переменными вдоль линий тока в области рабочего колеса.

Проектирование лопасти рабочего колеса центробежного насоса в меридиональном потоке выполняется по методике профилирования лопасти на заданную форму потока [2 – 4], которая является развитием метода Бауэрфельда-Вознесенского [5, 6].

Основные положения методики профилирования лопасти на заданную форму потока:

9. Поток в проточной части в области рабочего колеса принимается осесимметричным.
10. Меридиональный поток принимается равноскоростным.
11. Поток перед и за рабочим колесом принимается потенциальным.
12. В зоне рабочего колеса меняется закрутка потока.
13. Поверхность лопасти является поверхностью тока относительного потока.
14. Поверхность лопасти является вихревой поверхностью.
15. Выполняется условие $\vec{V} \cdot \vec{\Omega} = 0$, которое обеспечивает минимизацию потерь и максимальную передачу энергии.

В меридиональном сечении рабочего колеса строится равноскоростной поток. Линии равноскоростного потока определяют линии тока, вихревые линии являются ортогоналями (рис. 1).

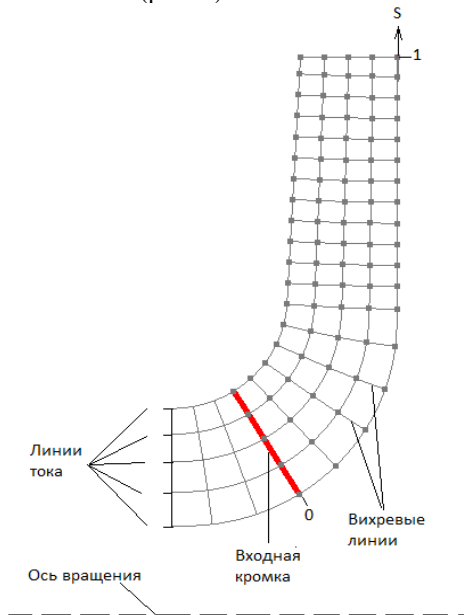


Рис. 1. Линии тока равноскоростного потока в меридиональном сечении рабочего колеса

Введем систему координат: положение входной кромки лопасти совпадает с началом координат линии тока в естественной системе координат S ; выходная кромка лопасти соответствует значению $s=1$ (рис. 1).

Уравнение осесимметричной пространственной линии тока в рабочем колесе гидравлической машины можно записать в виде [1, 7, 8]

$$\frac{rd\varphi}{ds} = \frac{W_u}{W_s}. \quad (1)$$

Переходя от относительных проекций скорости к абсолютным ($W_s = V_s$, $W_u = V_u - \omega r$) получим дифференциальное уравнение пространственной линии тока в относительном движении

$$d\varphi = \frac{rV_u - \omega r^2}{r^2V_s} ds. \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2) вдоль линии тока, получим интегральную форму уравнения в виде

$$\varphi(s) = \int_0^s \frac{rV_u - \omega r^2}{r^2V_s} ds. \quad (3)$$

Уравнение (3) описывает функциональную зависимость между меридиональным и окружным потоками в рабочем колесе гидромашин. Зависимость $\varphi(s)$ определяет форму линии пересечения лопасти рабочего колеса с осесимметричной поверхностью тока, образующая которой является линией тока меридионального потока. Таким образом, если для всех меридиональных линий тока путем интегрирования (3) найти зависимости $\varphi(s)$, то геометрия лопасти будет однозначно определена как совокупность линий $\varphi(s)$, нанизанных на заданную входную кромку лопасти рабочего колеса [7].

При фиксированной частоте вращения рабочего колеса и заданном меридиональном потоке известны зависимости $\omega r^2 = f_1(s)$ и $r^2V_s = f_2(s)$. Закон изменения циркуляции $rV_u = f_3(s)$ вдоль линии тока на лопасти рабочего колеса в общем случае может быть произвольным. Для рабочего колеса центробежного насоса на функцию $f_3(s)$ обычно накладываются следующие ограничения – $f_3(s)$ должна быть гладкой и монотонно

возрастать от входной кромки лопасти к выходной, с граничными условиями:

$$f_3(0) = rV_{u1} - \text{циркуляция перед рабочим колесом},$$

$$f_3(1) = rV_{u2} - \text{циркуляция за рабочим колесом}.$$

Меняя расположение входной кромки лопасти и закон изменения циркуляции возможно получить различные профили лопасти рабочего колеса, которые характеризуются минимизацией потерь и максимальной передачей энергии и при этом обеспечивают заданные проектные параметры.

Постановка задачи

Пусть задан закон изменения циркуляции вдоль линии тока на поверхности лопасти рабочего колеса $rV_u = f_3(s)$, соответствующий углу охвата лопасти рабочего колеса φ_0 . Рассмотрим задачу поиска зависимости $rV'_u = f'_3(s)$ при фиксированном положении входной кромки лопасти рабочего колеса, которая обеспечивает проектный угол охвата лопасти рабочего колеса φ_1 , используя закон изменения циркуляции $f_3(s)$ в качестве базового. Необходимо так “трансформировать” зависимость $f_3(s)$, чтобы расчетный угол охвата (3) равнялся выбранному проектному углу φ_1 и при этом не изменилась циркуляция перед и за рабочим колесом (рис. 2).

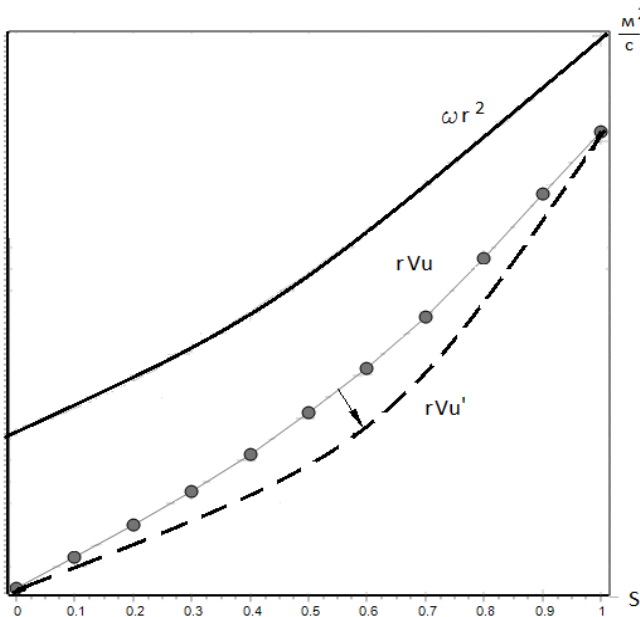


Рис. 2. Схема изменения базового закона циркуляции rV_u к rV'_u

На практике эта задача решается последовательными итерационными приближениями.

Для замены итерационного процесса подбора функции $rV'_u = f'_3(s)$ предлагается алгоритм, представленный ниже.

Алгоритм решения

Согласно (3):

$$\varphi_1 = \int_0^1 \frac{f_3(s) - f_1(s)}{f_2(s)} ds \quad \text{и} \quad \varphi_1 = \int_0^1 \frac{f'_3(s) - f_1(s)}{f_2(s)} ds .$$

Введем функцию

$$\Delta h(s) = f_3(s) - f'_3(s) = rV_u - rV'_u, \quad (4)$$

с соответствующими граничными условиями, чтобы циркуляция на входе и выходе рабочего колеса осталась неизменной:

$$\Delta h(0) = 0, \quad \Delta h(1) = 0 .$$

Поскольку $f_3(s)$ и $f'_3(s)$ гладкие, $\Delta h(s)$ также гладкая функция.

Тогда

$$\varphi_1 = \int_0^1 \frac{f_3(s) - \Delta h(s) - f_1(s)}{f_2(s)} ds = \varphi_0 - \int_0^1 \frac{\Delta h(s)}{f_2(s)} ds . \quad (5)$$

Предлагается в качестве функции $\Delta h(s)$ использовать зависимость

$$\Delta h(s) = A \sin(\pi s) ,$$

где A – неизвестная искомая константа.

Зависимость $\Delta h(s)$ в данной форме удовлетворяет исходным граничным условиям:

$$\Delta h(0) = A \sin(0) = 0 ,$$

$$\Delta h(1) = A \sin(\pi) = 0 .$$

Интеграл $\int_0^1 \frac{\sin(\pi s)}{f_2(s)} ds = C$ не зависит от закона распределения

циркуляции вдоль линии тока, и для заданного меридионального сечения и выбранного меридионального потока является константой и может быть

рассчитан численно.

Выражение (5) запишется в виде

$$\varphi_1 = \varphi_0 - A \cdot C,$$

и соответственно

$$A = \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{C}.$$

Тогда функция $f'_3(s)$ может быть определена следующим образом

$$f'_3(s) = rV'_u(s) = rV_u(s) - \frac{\varphi_0 - \varphi_1}{C} \sin(\pi s).$$

Результаты

В АО «ВНИИАЭН» предложенный алгоритм реализован в программном обеспечении профилирования лопасти рабочего колеса центробежного насоса на заданную форму потока (рис. 3).

В качестве примера взят базовый профиль с углом охвата в плане 110° , и на его основе, путем предложенной трансформации закона изменения циркуляции, построен профиль лопасти с углом охвата в плане 120° .

На рис. 4, 5 представлены исходный и модифицированный законы изменения циркуляции, базовый и новый профили лопасти рабочего колеса.

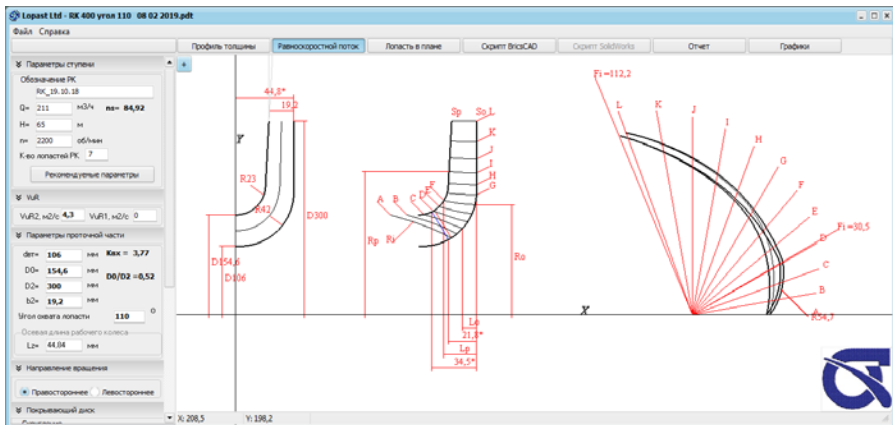


Рис. 3. Пример работы программы профилирования лопасти рабочего колеса

Выводы

В работе предложен метод аналитического выбора зависимости изменения циркуляция вдоль линии тока на основе произвольной базовой

зависимости.

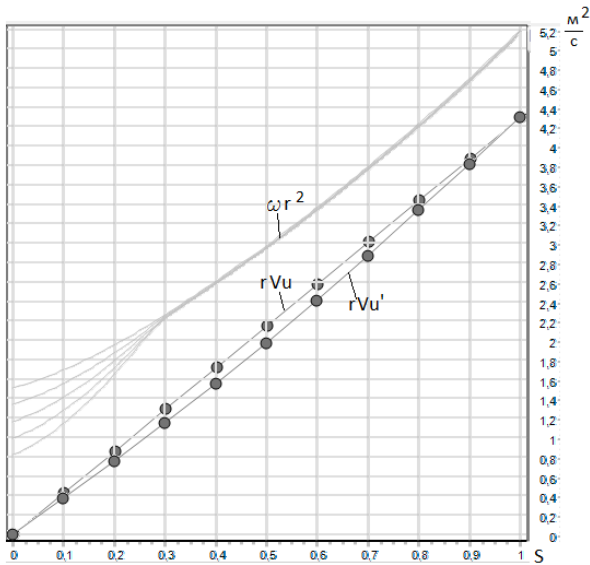


Рис. 4. Графики базовой и модифицированной зависимостей изменения циркуляции вдоль линии тока

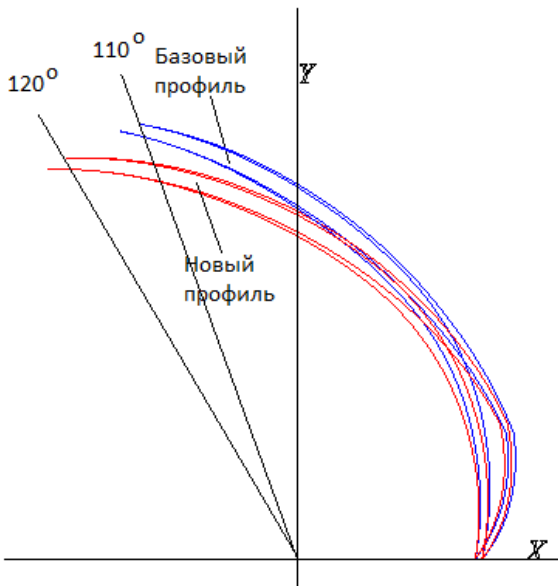


Рис. 5. Базовый и новый профили лопасти рабочего колеса

В качестве добавочной функции предлагается использовать синусоидальную зависимость, применение которой не изменяет граничные условия на входной и выходной кромках лопасти.

Предложенная модификация позволяет построить более эффективный алгоритм, по сравнению с итерационным процессом подбора закона rV_u , который обеспечивает проектный угол охвата лопасти рабочего колеса центробежного насоса.

1. *Lorens H.* Neue Theorie und Berechnung der Kreisrader. Berlin, 1906.
2. *Косторной С.Д.* Профилирование лопасти рабочего колеса радиально – осевой турбины из условия ортогональности линий тока и вихревых линий в абсолютном движении / С.Д.Косторной // Научно-техническая конференция по итогам научной работы за 1966 год. Рефераты докладов. «ХГУ». – 1968. – С.118.
3. *Косторной, С. Д.* Новый подход к решению обратной задачи центробежного насоса / С.Д. Косторной, А.К Давиденко Л.К.Марченко // Серия энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, Вісник НТУ «ХПИ». – 2014. –11(985). – С.53-58.
4. *Косторной С.Д.* Автоматизированное проектирование рабочего колеса центробежного насоса / С.Д. Косторной, А.О. Бондарев, Л.К. Марченко // Серия энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, Вісник НТУ «ХПИ». – 2014. –14(988). – С.89-95.
5. *Baurfeld W.* Die Konstruktion der Francis-Schaufel nach Lorenzschens Turbinentheorie und ihre Eigenschaften/ Zeitschrift des VDT , 1912, Bd 56. –№ 51.
6. *Вознесенский И.Н.* Жизнь, деятельность и избранные труды в области гидромашиностроения / И.Н. Вознесенский. – М. : Машгиз, 1952. – 354 с.
7. *Топаж Г.И.* Расчет интегральных гидравлических показателей гидромашин / Г.И. Топаж. – Л., 1978.
8. *Топаж Г.И.* Лопастные гидромашин и гидродинамические передачи. Основы рабочего процесса и расчета гидротурбин : учеб. пособие / Г. И. Топаж. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 154 с.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3610646>

Поступила 15.08.2019г.