

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ЛОПАСТИ ГИДРОТУРБИНЫ*

И. Ф. ЛОВАРЕВА, С. Г. ЧЕРНЫЙ, Д. В. ЧИРКОВ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: cher@ict.nsc.ru

В. А. СКОРОСПЕЛОВ, П. А. ТУРУК

Институт математики СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: vskrsp@math.nsc.ru

Automatic runner blade optimization system proposed in our earlier work is based on the Genetic Algorithm for searching an extremum of the specific functional. This system is generalized by including an algorithm which enhance several blade performance criterions at once. Results of calculation of test optimization problems as well as an automatic optimization of the runner of Bratskaya hydro power plant are presented.

Введение

Проектирование элементов проточного тракта турбомашин представляет собой чрезвычайно трудоемкую задачу, что обусловлено сложностью трехмерного течения рабочей жидкости в существенно криволинейном проточном тракте машины и набором, вообще говоря, противоречивых требований, предъявляемых к проектированию. В частности, выбор оптимальной формы рабочего колеса (РК) гидротурбины диктуется такими требованиями, как обеспечение в нем минимальных потерь энергии, минимальной кавитации в потоке, создание заданного профиля скорости за рабочим колесом, необходимого для эффективной работы отсасывающей трубы, и т. д. При этом перечисленные требования желательнее обеспечить в широком диапазоне работы турбины.

В последнее время появился ряд работ, посвященных автоматическому проектированию элементов турбомашин, обзор которых приведен в [1]. В этой работе авторами предложен свой подход к автоматической оптимизации проточной части рабочего колеса гидротурбины, основанный на решении последовательности задач обтекания лопасти рабочего колеса и поиске такой формы лопасти, которая обеспечивает минимум какого-либо одного заданного целевого функционала. В основу оптимизационного алгоритма в [1], как и в большинстве работ по оптимизации рабочих колес, положен генетический алгоритм, требующий расчета потока в рабочем колесе для нескольких тысяч вариаций геометрии лопасти. Применение турбулентных моделей для расчета 3D-течения в рабочем колесе,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-01-000246).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

позволяющих оценить потери энергии, оказывается в связи с этим чрезвычайно дорогостоящим по затратам счетного времени. В то же время расчет потока в рабочем колесе в приближении идеальной жидкости с использованием соответствующих методов (см., например, [2, 3]) требует гораздо меньших затрат машинного времени. Расчет потока на сетке $40 \times 20 \times 20$ занимает менее 3 мин на процессоре Pentium IV, 3 ГГц, поэтому в работе [1] моделирование течения в РК проводилось в рамках уравнений Эйлера идеальной жидкости. Явный расчет потерь энергии в этой постановке невозможен, поэтому были сформулированы несколько целевых функционалов, позволяющих косвенно учитывать различные виды потерь, оставаясь в рамках модели идеальной жидкости. Существенным недостатком описанного подхода является возможность оптимизировать лопасть лишь по одному из рассмотренных функционалов. Другие функционалы либо не принимаются во внимание, либо их величина контролируется в виде ограничений оптимизационной задачи. В связи с этим хотелось бы иметь алгоритм, позволяющий улучшать сразу несколько критериев качества (целевых функционалов). Необходимо отметить, что использование в процессе оптимизации трудоемких турбулентных расчетов позволяет рассчитать потери в явном виде и тем самым сократить количество функционалов. Однако и в этом случае желательно учитывать, например, кавитационные характеристики рабочего колеса, взаимодействие РК с отсасывающей трубой, а также эффективность работы турбины в других режимах.

Один из подходов к решению задачи многоцелевой оптимизации состоит в рассмотрении в качестве единственного целевого функционала, подлежащего минимизации, взвешенной суммы всех интересующих функций качества. Недостаток такого подхода очевиден: сколько-нибудь разумный выбор весовых коэффициентов может быть сделан только после тщательного анализа серии оптимизационных расчетов с различными комбинациями весов.

В настоящее время большое распространение получили методы многоцелевой оптимизации, позволяющие одновременно минимизировать несколько целевых функционалов [4–9]. Вследствие того, что минимизируемые функционалы независимы, вообще говоря, не существует одного решения, дающего минимум сразу всех целевых функционалов. Решением такой задачи является целое семейство точек, называемое *множеством (фронтом) Парето*. Каждая точка фронта Парето — оптимальна в том смысле, что путем ее возмущения невозможно улучшить какой-либо целевой функционал без ухудшения остальных критериев качества. Таким образом, фронт Парето представляет собой множество оптимальных решений, каждое из которых лучше любого другого по крайней мере по одному целевому функционалу. Компромиссное решение (золотая середина) на фронте Парето выбирается человеком вручную исходя из вида поверхности фронта в пространстве функционалов и предпочтений, отдаваемых какому-либо функционалу. Во всех указанных выше работах по многоцелевой оптимизации для поиска фронта Парето используются варианты генетического алгоритма.

Генетические алгоритмы многоцелевой оптимизации начинают широко применять в задачах автоматического проектирования турбомашин [10–13]. Работа [10] посвящена оптимизации формы рабочего колеса поворотной-лопастной, [11, 12] — радиально-осевой гидротурбины. В [13] решается задача оптимизации сопловой лопатки паровой турбины. В перечисленных выше работах гидродинамические расчеты перебираемых конфигураций проточного тракта проводятся в рамках уравнений Навье — Стокса несжимаемой жидкости, а для моделирования турбулентности используется $k - \varepsilon$ -модель. Гидродинамические расчеты в [10, 12, 13] выполняются с использованием коммерческих пакетов программ

CFX-TASCflow и *CFX-5*, оптимизация проводится по двум критериям. В [11] минимизируются потери в рабочем колесе для трех режимов: оптимального, максимальной загрузки, неполной загрузки, т. е. минимизируются три функционала. Оптимизационные расчеты в [11, 13] производились с использованием распараллеленного генетического алгоритма.

В настоящей работе предложен генетический алгоритм многоцелевой оптимизации, основанный на работах Фонсеки — Флеминга [4] и Хорна [5]. Работоспособность построенного алгоритма продемонстрирована на ряде ставших стандартными тестовых задач с числом варьируемых переменных от 2 до 30 и двумя или тремя целевыми функционалами [6–9]. Алгоритм применялся для многоцелевой оптимизации формы лопасти рабочего колеса Братской ГЭС. Как и в [1], расчеты течения в межлопастном канале РК проводились в рамках уравнений Эйлера. В качестве целевых функционалов рассматриваются кинетическая энергия на выходе из РК, размер области кавитации, отклонение потока в межлопастном канале от “осесимметричного” потока. Приводятся результаты оптимизационных расчетов, направленных на минимизацию двух и трех функционалов.

1. Описание алгоритма многоцелевой оптимизации

Задача многоцелевой оптимизации формулируется следующим образом.

Найти значения параметров x_1, \dots, x_N , обеспечивающих минимальные значения q функционалов:

$$\min (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_N(\mathbf{x})), \quad \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) \in X \subset E_N, \quad (1)$$

при наличии фазовых ограничений

$$X = \{\mathbf{x} : x_{L,i} \leq x_i \leq x_{R,i}\} \quad (2)$$

и целевых ограничений

$$\varphi_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

В данной работе для решения задачи (1)–(3) используется генетический алгоритм (ГА). В основу ГА положена теория эволюции, согласно которой популяция индивидуумов меняется в течение нескольких поколений путем рекомбинации (скрещивания) и мутации отдельных индивидуумов, подчиняясь при этом законам естественного или искусственного отбора относительно предписанного критерия. Применительно к проектированию лопасти рабочего колеса гидротурбины *индивидуумом* является рабочее колесо с лопастью какой-то конкретной формы. Индивидуумом мы также будем называть набор параметров $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$, определяющих эту лопасть.

Работа ГА начинается с формирования случайным образом начальной популяции, состоящей из p_0 индивидуумов-лопастей. После этого для каждого индивидуума построенной популяции вычисляются соответствующие значения целевых функционалов и ограничений. В данной работе рассматриваются три целевых функционала: кинетическая энергия на выходе из рабочего колеса, отклонение линий тока на поверхности лопасти от осесимметричных, размер и расположение зоны кавитации на тыльной стороне лопасти.

Следующий этап работы генетического алгоритма — отбор. На этом этапе выбирается определенная доля Tr ($0 < Tr < 1$) наилучших индивидуумов для скрещивания. В случае одноцелевой оптимизации ($q = 1$) лучшим будет индивидуум, которому соответствует наименьшее по популяции значение целевого функционала. То есть критерием качества

индивидуума будет значение целевого функционала. При проведении многоцелевой оптимизации в каждом поколении, как правило, будет несколько индивидуумов, не сравнимых друг с другом по совокупности целевых функционалов. Поэтому выполняется процедура, в которой на основе рассчитанных значений целевых функционалов вычисляется величина, называемая *рангом*, характеризующая качество индивидуумов [4]. По определению ранга индивидууму, для которого ни один из индивидуумов популяции не лучше него по всем функционалам, присваивается ранг 1. Ранг остальных индивидуумов вычисляется следующим образом:

$$\text{rank}(\mathbf{x}^i) = 1 + a_i,$$

где a_i — число индивидуумов текущей популяции, лучших по всем функционалам индивидуума \mathbf{x}^i [4]. Чем больше ранг, тем больше расстояние до фронта Парето. Отметим, что при решении задачи (1) индивидуумы должны удовлетворять ограничениям (3), однако при создании популяции не все индивидуумы им удовлетворяют. Ранг таким индивидуумам назначается в зависимости от того, насколько сильно не выполняются ограничения. Ранг лучшего из группы решений, для которых не выполняется хотя бы одно из ограничений, больше, чем самый высокий из группы индивидуумов, для которых ограничения выполнены.

Затем для каждого индивидуума популяции \mathbf{x}^i вычисляется *критерий качества, основанный на ранге*:

$$F_r(\mathbf{x}^i) = 1 + \sum_{k=1}^{\text{rank}(\mathbf{x}^i)-1} \eta(k),$$

где $\eta(k)$ — число индивидуумов ранга k . После этого проводится процедура, предложенная Голдбергом и Ричардсоном [14]. Цель этой процедуры — распределить популяцию около некоторого числа различных пиков в пространстве поиска, причем возле каждого пика сосредоточивается часть популяции, пропорциональная высоте пика [5]. Иначе говоря, процедура проводится во избежание преждевременной сходимости или сходимости к какому-либо подмножеству точек фронта Парето, а также для получения равномерного распределения точек вдоль фронта Парето. Для этого критерий качества индивидуума, основанный на ранге F_r , умножается на *нишевое число* m , вычисляемое для каждого индивидуума. Нишевое число m_i — это оценка того, как много индивидуумов популяции располагается в окрестности (нише) индивидуума i . Это число рассчитывается по всей популяции, включая i -й индивидуум:

$$m_i = \sum_{j \in \text{Pop}} \text{Sh}(\rho(i, j)).$$

Здесь $\rho(i, j)$ — расстояние между индивидуумами \mathbf{x}^i и \mathbf{x}^j , а $\text{Sh}(\rho)$ — функция разделения такая, что $\text{Sh}(0) = 1$, $\text{Sh}(\rho \geq \sigma_{\text{share}}) = 0$. В данной работе использовалась

$$\text{Sh}(\rho) = \begin{cases} 1 - \rho/\sigma_{\text{share}}, & \rho < \sigma_{\text{share}} \\ 0, & \rho \geq \sigma_{\text{share}}, \end{cases}$$

где σ_{share} — параметр разделения, который подбирается эмпирически. Индивидуумы, находящиеся на расстоянии σ_{share} , ухудшают (увеличивают) функции качества $F_s = F_r m$ друг друга.

Таким образом, сходимость происходит в нише радиуса σ_{share} , но сходимости всей популяции удается избежать. Поскольку целевые функционалы могут принимать значения на

отрезках разной длины, функционалы предварительно нормируются таким образом, чтобы они отображали область поиска X в гиперкуб с единичным ребром $[0, 1]^q$. Расстояние между индивидуумами вычисляется в пространстве функционалов по формуле

$$\rho(i, j) = \max_{k=1, \dots, q} |f_k(\mathbf{x}^i) - f_k(\mathbf{x}^j)|.$$

Отбор индивидуумов проводится исходя из значения функции качества F_s . Затем выполняются рекомбинация, мутация, клонирование. В результате получается новое поколение, заменяющее предыдущее, и этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет рассчитано заданное число поколений N_{Gen} .

Процесс поиска решения включает, таким образом, следующие шаги.

1. Формирование начальной популяции, состоящей из p_0 индивидуумов. Каждый индивидуум — это набор параметров $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$, определяющий объект оптимизации, при этом $x_{L,i} \leq x_i \leq x_{R,i}$. Начальная популяция создается случайным образом применительно ко всем параметрам.

2. Вычисление значений целевых функционалов f_1, \dots, f_q для каждого индивидуума популяции.

3. Вычисление ранга rank каждого индивидуума популяции.

4. Вычисление критерия качества, основанного на ранге F_r для каждого индивидуума.

5. Вычисление расстояний ρ между индивидуумами.

6. Вычисление нишевых чисел m для каждого индивидуума.

7. Вычисление функции качества F_s .

8. Отбор. На этом этапе выбирается определенная доля Tr ($0 < Tr < 1$) наилучших индивидуумов для скрещивания. Это будут индивидуумы, которым соответствуют наименьшие значения F_s .

9. Построение новой популяции. На данном этапе строится новая популяция, состоящая из p индивидуумов, путем рекомбинации. После чего каждый из индивидуумов слегка меняется в процессе мутации [1].

10. Клонирование. Копирование без изменения всех индивидуумов, удовлетворяющих ограничениям, и ранга 1 из предыдущего поколения в новое поколение. После клонирования размер нового поколения будет равен $p + p_e$, где p_e — число клонированных индивидуумов.

11. Далее осуществляется переход на шаг 2, пока не будет рассчитано заданное число поколений N_{Gen} .

2. Тестовые расчеты

Работоспособность алгоритма проверялась на следующих тестовых задачах (здесь приводятся общепринятые названия): ZDT_3 , ZDT_6 [6], $DTLZ_4$ [7], TNK [8], OSY [9]. В задаче $DTLZ_4$ число минимизируемых функционалов q равнялось трем, в остальных тестовых задачах — двум; число варьируемых параметров n в ZDT_3 равнялось 30, в ZDT_6 — 10, в $DTLZ_4$ — 12, в TNK — 2 и в OSY — 6. В задачах TNK и OSY накладывались ограничения. В табл. 1 приведены функционалы, область изменения параметров и ограничения для упомянутых выше тестовых задач.

Критериями качества алгоритма, осуществляющего многоцелевую оптимизацию, являются:

— минимизация расстояния между полученным с помощью алгоритма множеством решений и действительным фронтом Парето;

- равномерное распределение найденных решений вдоль фронта Парето;
- максимизация охвата полученными решениями фронта, т.е. найденные решения

Таблица 1. Тестовые задачи многоцелевой оптимизации

Задача	Целевые функционалы	Ограничения и число параметров
<i>ZDT₃</i>	$f_1(\mathbf{x}) = x_1,$ $f_2(\mathbf{x}) = g \left(1 - \sqrt{f_1/g} - (f_1/g) \sin(10\pi f_1) \right),$ $g(x_2, \dots, x_n) = 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / (n-1)$	$0 \leq x_i \leq 1,$ $n = 30$
<i>ZDT₆</i>	$f_1(\mathbf{x}) = 1 - \exp(-4x_1) \sin^6(6\pi x_1),$ $f_2(\mathbf{x}) = g \left(1 - (f_1/g)^2 \right),$ $g(x_2, \dots, x_n) = 1 + 9 \left(\sum_{i=2}^n x_i / (n-1) \right)^{0.25}$	$0 \leq x_i \leq 1,$ $n = 10$
<i>DTLZ₄</i>	$f_1(\mathbf{x}) = (1+g) \cos \left(\frac{\pi x_1^\alpha}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi x_2^\alpha}{2} \right),$ $f_2(\mathbf{x}) = (1+g) \cos \left(\frac{\pi x_1^\alpha}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi x_2^\alpha}{2} \right),$ $f_3(\mathbf{x}) = (1+g) \sin \left(\frac{\pi x_1^\alpha}{2} \right),$ $g(x_3, \dots, x_n) = \sum_{i=3}^n (x_i - 0.5)^2, \alpha = 100$	$0 \leq x_i \leq 1,$ $n = 12$
<i>TNK</i>	$f_1(\mathbf{x}) = x_1,$ $f_2(\mathbf{x}) = x_2$	$0 \leq x_i \leq \pi,$ $\varphi_1(\mathbf{x}) = 1 + 0.1 \cos \left(16 \arctan \frac{x_1}{x_2} \right) -$ $-x_1^2 - x_2^2 \leq 0,$ $\varphi_2(\mathbf{x}) = (x_1 - 0.5)^2 +$ $+(x_2 - 0.5)^2 - 0.5 \leq 0,$ $n = 2$
<i>OSY</i>	$f_1(\mathbf{x}) = -(25(x_1 - 2)^2 + (x_2 - 2)^2 +$ $+(x_3 - 1)^2 + (x_4 - 4)^2 + (x_5 - 1)^2),$ $f_2(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^6 x_i^2$	$0 \leq x_1, x_2, x_6 \leq 10,$ $1 \leq x_3, x_5 \leq 5,$ $0 \leq x_4 \leq 6,$ $\varphi_1(\mathbf{x}) = 2 - x_1 - x_2 \leq 0,$ $\varphi_2(\mathbf{x}) = x_1 + x_2 - 6 \leq 0,$ $\varphi_3(\mathbf{x}) = -x_1 + x_2 - 2 \leq 0,$ $\varphi_4(\mathbf{x}) = x_1 - 3x_2 - 2 \leq 0,$ $\varphi_5(\mathbf{x}) = (x_3 - 3)^2 + x_4 - 4 \leq 0,$ $\varphi_6(\mathbf{x}) = 4 - (x_5 - 3)^2 - x_6 \leq 0,$ $n = 6$

должны принимать значения из широкого диапазона значений по каждому из целевых функционалов.

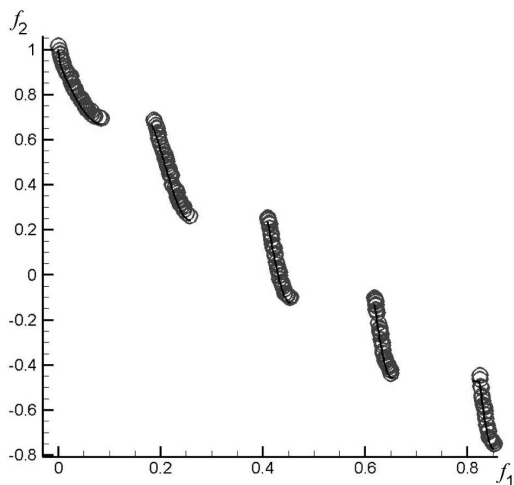


Рис. 1. Задача ZDT_3 .

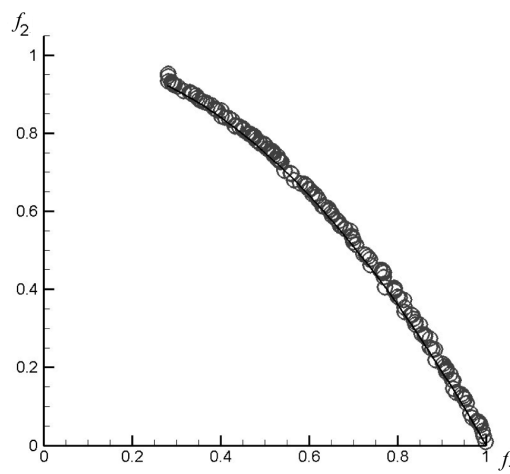


Рис. 2. Задача ZDT_6 .

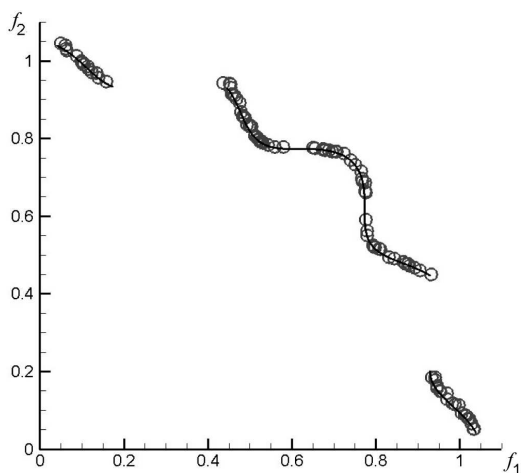


Рис. 3. Задача TNK .

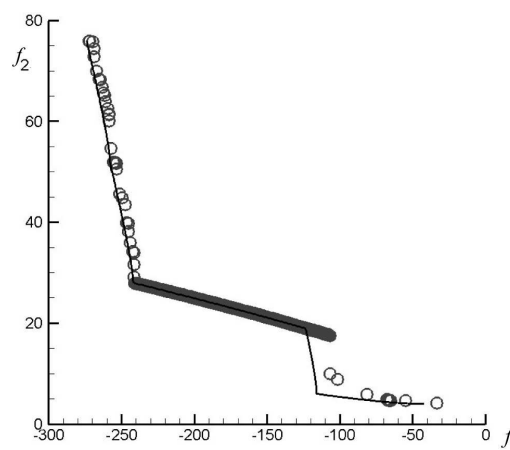


Рис. 4. Задача OSY .

При решении всех тестовых задач использовались следующие значения параметров алгоритма: параметр разделения $\sigma_{share} = 0.01$, доля отбираемых для рекомбинации индивидуумов $Tr = 0.3$, параметр рекомбинации $d = 0.7$, мутационный параметр $\mu = 0.1$. Число индивидуумов в начальной популяции p_0 и в последующих p бралось одинаковым. В задачах без ограничений $p_0 = p = 70$, с ограничениями $p_0 = p = 100$. Число поколений N_{Gen} в задачах ZDT_6 равнялось 150, в TNK $N_{Gen} = 50$, в остальных 100. На рис. 1–5 изображены фронты Парето для тестовых задач, полученные в результате оптимизации (обозначены кружками), и точные (сплошными линиями). Видно, что с помощью разработанного алгоритма удается получить качественные решения.

3. Оптимизация формы лопасти

В качестве объекта многоцелевой оптимизации выбрано радиально-осевое рабочее колесо гидротурбины Братской ГЭС. Для параметризации формы лопасти использовался

подход с представлением срединной поверхности лопасти в виде бикубического полинома с 16 свободными параметрами [1]. Варьировалась только угловая координата $\Phi(u, v)$, определяющая кривизну лопасти. RZ -проекции лопасти, проточного тракта и распределение толщины оставались неизменными. Для каждого набора геометрических параметров 3D-расчеты поля течения в полученном рабочем колесе выполнялись в рамках модели невязкой несжимаемой жидкости с использованием алгоритма [2, 3].

Расчеты течения проводились в одном межлопастном канале рабочего колеса при предположении, что течения в остальных межлопастных каналах циклически повторяются (рис. 6). Расчеты всех конфигураций выполнялись для заданного оптимального режима работы гидротурбины (при фиксированных расходе Q и частоте вращения n). Для оценки качества лопасти использовались целевые функционалы, значения которых вычислялись на основе рассчитанного 3D-поля течения. Их описание приводится ниже.

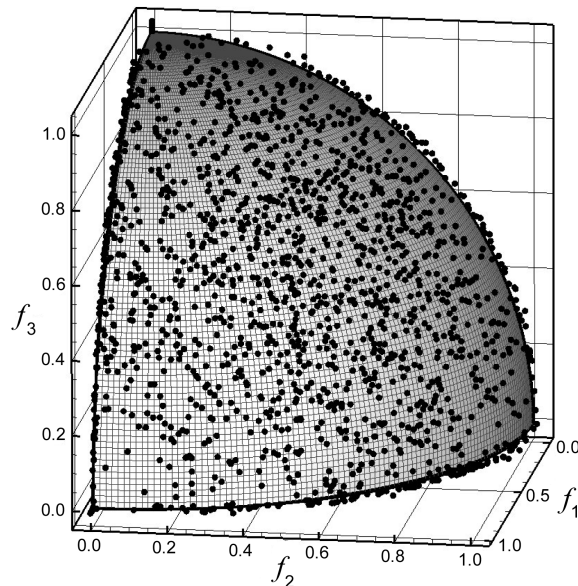


Рис. 5. Задача $DTLZ_4$.

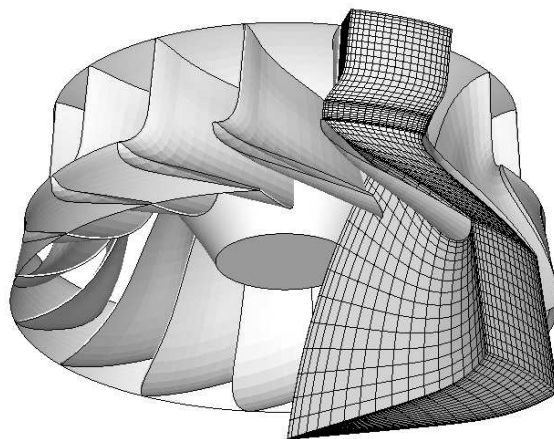


Рис. 6. Расчетная область и сетка в ней.

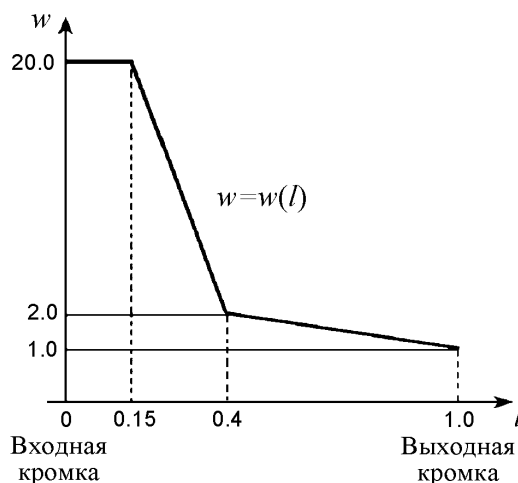


Рис. 7. Вид весовой функции для ограничения по кавитации.

3.1. Ограничения

В процессе оптимизации ставились ограничение на напор в рабочем колесе и кавитационное ограничение [1]. Выполнение ограничения на напор гарантирует, что полученное в результате оптимизации рабочее колесо будет соответствовать заданному изначально режиму работы. Явление кавитации возникает в случае, если величина статического давления в точке потока становится меньше, чем величина давления насыщенного пара при данной температуре [1]:

$$p \leq p_v. \quad (4)$$

Известно, что наиболее подвержены кавитации тыльные поверхности лопастей. В случае, когда область кавитации занимает более 15 % площади всей тыльной поверхности лопасти и располагается сразу за входной кромкой, наблюдается резкое падение мощности и КПД турбины. Поэтому ставилось ограничение на размер и расположение области кавитации:

$$\frac{S_{\text{cav}}}{S_{\text{suc}}} \leq 0.1,$$

где $S_{\text{cav}} = \int_{S_{\text{suc}}} w \delta^{\text{cav}} dS$; S_{suc} — площадь тыльной поверхности лопасти; $\delta^{\text{cav}} = 1$, если выполняется условие возникновения кавитации (4), и $\delta^{\text{cav}} = 0$, если кавитации нет; $w = w(l)$ — весовая функция, вид которой представлен на рис. 7. Параметр l — это нормированное расстояние от входной кромки, измеренное вдоль поверхности лопасти в направлении потока.

3.2. Целевые функционалы

Как уже говорилось, в идеале оптимизация геометрии турбомашин должна сводиться к максимизации КПД на заданном режиме работы или, что то же, к минимизации потерь энергии в проточном тракте. В случае расчета одного рабочего колеса в рамках модели невязкой жидкости явный расчет потерь невозможен, поэтому необходимо сформулировать целевой функционал, косвенно учитывающий потери энергии в проточном тракте. Ниже представлены формулировки некоторых целевых функционалов.

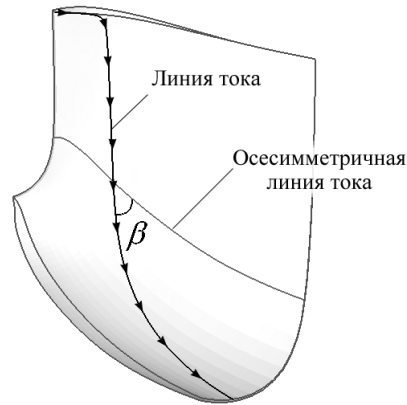


Рис. 8. Предельные линии тока на рабочей стороне лопасти.

1. F_1 — кинетическая энергия в выходном сечении рабочего колеса. Кинетическая энергия потока в выходном сечении S_0 расчетной области вычисляется по формуле

$$F_1 = \frac{1}{2} \int_{S_0} \vec{v}^2 (\vec{v} \cdot d\vec{S}). \quad (5)$$

Здесь \vec{v} — вектор абсолютной скорости; $d\vec{S}$ — вектор нормали к элементарной площадке dS выходного сечения, равный по модулю площади этого сечения и направленный вовне расчетной области.

2. F_2 — отклонение линий тока от “осесимметричных”. Интуиция опытных проектировщиков подсказывает, что более качественной является та лопасть, на поверхности которой предельные линии тока ближе к линиям тока “осесимметричного” потока. “Осесимметричный” поток получается из рассчитанного пространственного потока в межлопастном канале его осреднением в окружном направлении. Соответствующий целевой функционал можно сформулировать следующим образом:

$$F_2 = \frac{1}{S} \int_S (1 - \sigma(\beta) \cos \beta) dS, \quad (6)$$

где S — площадь поверхности лопасти; β — угол между предельной линией тока и линией тока осесимметричного потока (рис. 8), а весовая функция σ имеет вид

$$\sigma(\beta) = \begin{cases} 1, & \beta < \pi/2, \\ \sigma_0, & \beta \geq \pi/2. \end{cases}$$

За счет выбора подходящего весового коэффициента σ_0 минимизация этого целевого функционала позволяет также выполнить одно из основных требований к лопастной системе — отсутствие угла атаки при обтекании лопасти (совпадение линии растекания жидкости с линией входной кромки лопасти).

3. F_3 — размер и расположение области кавитации. В минимизируемом функционале учитывается как размер зоны кавитации, так и ее расположение на тыльной стороне лопасти:

$$F_3 = \frac{S_{\text{cav}}}{S_{\text{suc}}}. \quad (7)$$

3.3. Результаты оптимизационных расчетов

3.3.1. Двухцелевая оптимизация

Проведена минимизация кинетической энергии на выходе из рабочего колеса F_1 (5) и отклонения линий тока от “осесимметричных” F_2 (6) при ограничениях на напор в рабочем колесе и на размер и расположение области кавитации. При поиске фронта Парето использовались следующие значения параметров оптимизационного алгоритма: $\sigma_{share} = 0.01$, $Tr = 0.3$, $d = 0.7$, $\mu = 0.1$, $p_0 = 100$, $p = 70$. Рассчитано 80 поколений, однако в данном случае сходимость к фронту Парето достигнута за 45 поколений. На рис. 9 в плоскости минимизируемых функционалов изображены лучшие индивидуумы 0-, 3-, 5-, 10-, 20- и 80-го поколений. Решение, составляющее лучший компромисс между функционалами, обозначен как лопасть Opt. На рис. 10 приведены меридиональные распределения скоростей на

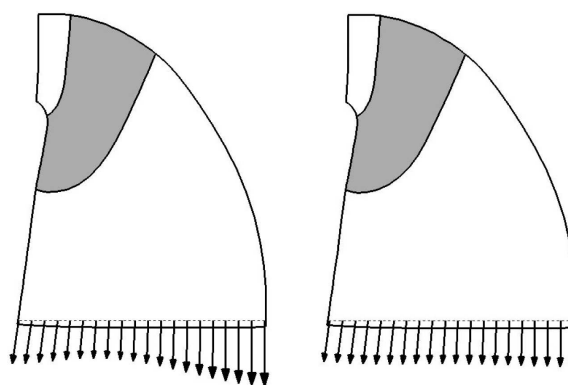
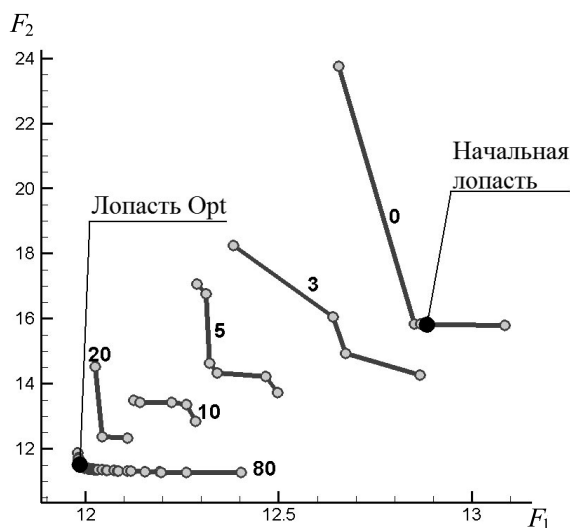


Рис. 9. Лучшие индивидуумы в различных поколениях.

Рис. 10. Распределение скорости на выходе из рабочего колеса: слева — начальная, справа — лопасть Opt.

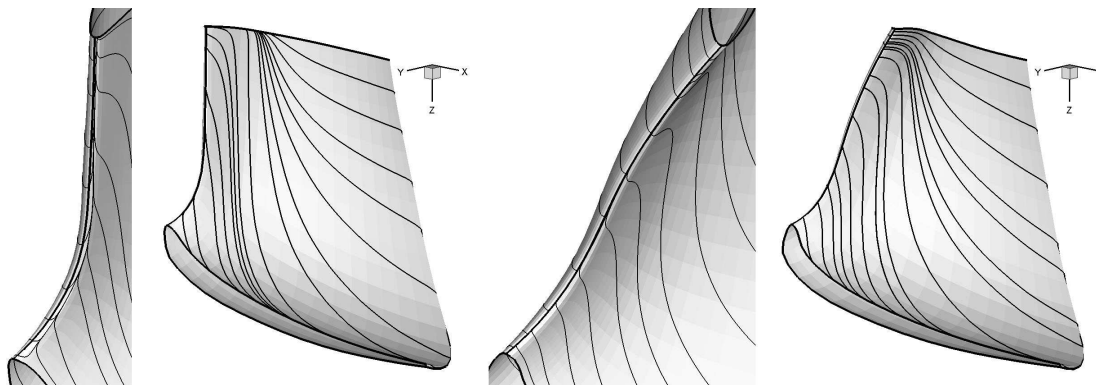


Рис. 11. Линии растекания и линии тока на рабочей стороне лопасти: слева — начальная, справа — лопасть Opt.

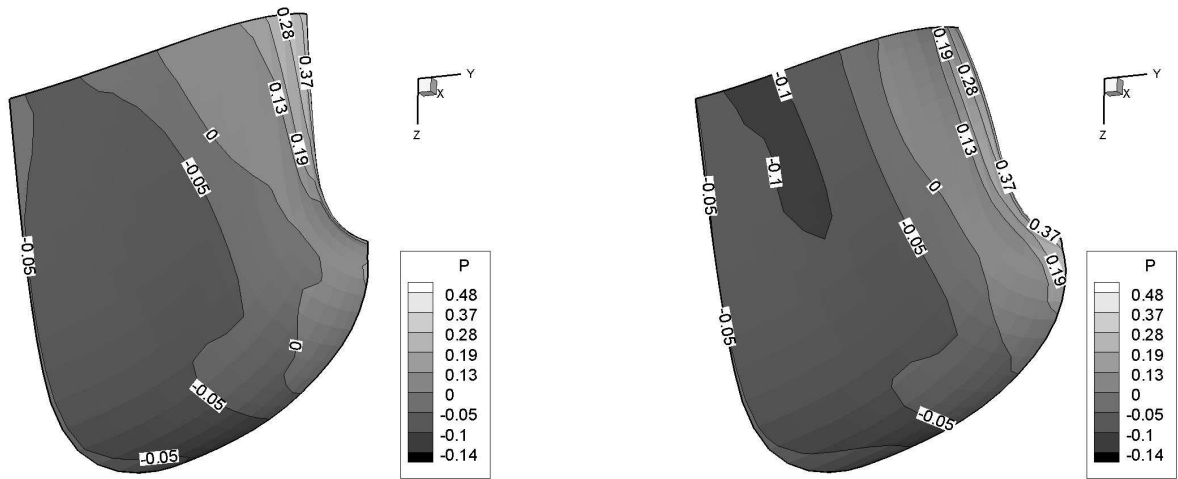


Рис. 12. Распределение давления и зона кавитации на тыльной стороне лопасти: слева — начальная (0%), справа — лопасть Opt (5%).

выходе из рабочего колеса, а на рис. 11 — линии растекания и линии тока на рабочей стороне лопасти для начальной лопасти и лопасти Opt. Видно, что для лопасти Opt поле меридиональной компоненты скорости более равномерное, а линия растекания полностью совпала с входной кромкой лопасти. Однако на оптимальной лопасти появилась зона кавитации, составляющая 5% от площади тыльной поверхности лопасти (рис. 12).

3.3.2. Трехцелевая оптимизация

Поскольку при оптимизации исходной лопасти относительно критериев F_1 и F_2 были ухудшены ее кавитационные качества, проведен оптимизационный расчет, направленный на минимизацию трех функционалов (F_1 , F_2 и F_3) при ограничении на напор. При решении данной задачи число индивидуумов в популяции p было увеличено до 100. На рис. 13 изображена проекция 3D-фронта Парето, полученного после расчета 150 поколений, на

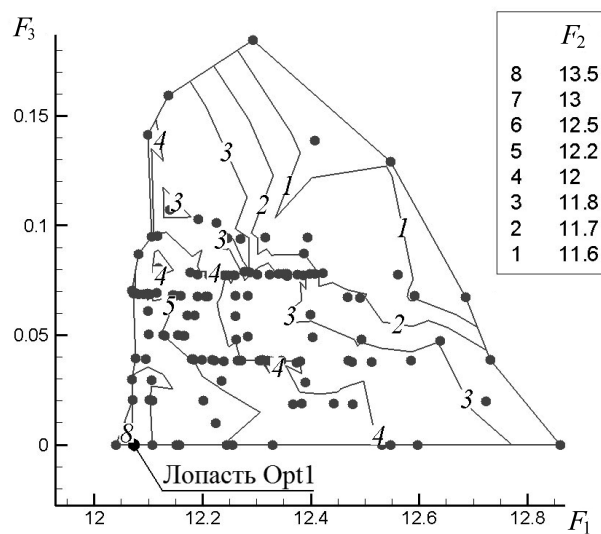


Рис. 13. Проекция фронта Парето на плоскость функционалов F_1 и F_3 .

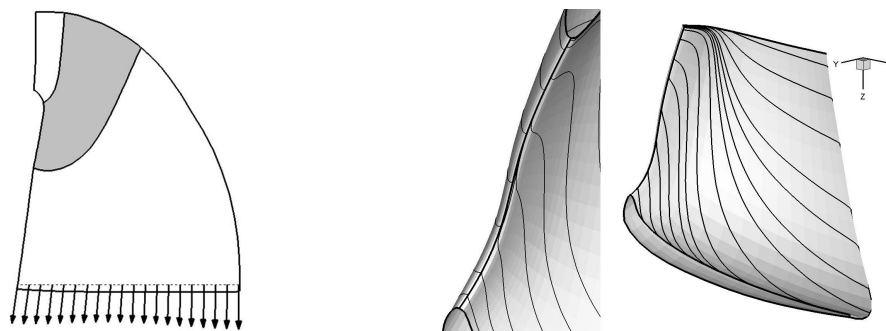


Рис. 14. Лопасть Opt1. Распределение скорости на выходе из рабочего колеса. Линия растекания и линии тока на рабочей стороне лопасти.

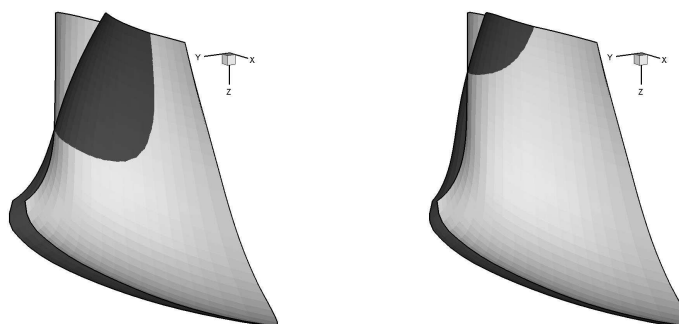


Рис. 15. Отклонение срединной поверхности лопасти от начальной: слева — лопасть Opt, справа — лопасть Opt1. Светлая — начальная срединная поверхность, темная — оптимизированная.

плоскость функционалов F_1 и F_3 . Кружками обозначены решения задачи — фронт Парето, линиями — линии уровня функционала F_2 . Бескавитационная лопасть, которая имеет линию растекания, совпадающую с входной кромкой, и обеспечивает наиболее ровное поле скорости на выходе из рабочего колеса, обозначена Opt1. На рис. 14 показаны соответствующие этой лопасти распределение скорости на выходе из РК и линии тока. Как видно из рис. 15, в процессе оптимизации лопасти Opt и Opt1 существенно отклонились от начальной.

Заключение

Статья посвящена применению генетического алгоритма многоцелевой оптимизации для проектирования лопасти рабочего колеса гидротурбины. На задачах с тестовыми целевыми функционалами показана эффективность предложенного алгоритма нахождения фронта Парето. При двух- и трехцелевой оптимизации лопасти с 16 варьируемыми параметрами геометрии требуется рассчитать несколько большее число поколений (80–150 поколений), чем для одноцелевой задачи (около 30 поколений, см. [1]). С помощью алгоритма удалось найти такую форму лопасти, которая обеспечивает достаточно равномерное поле скорости за рабочим колесом (плавное безударное обтекание рабочей и тыльной сторон) и не приводит к образованию кавитации в потоке. Планируется построить алгоритм многорежимной оптимизации, позволяющий удовлетворять критериям качества лопастной системы на нескольких режимах работы гидротурбины. В настоящее время для ускорения процесса оптимизации разрабатывается параллельная версия алгоритма.

Список литературы

- [1] ЛОБАРЕВА И.Ф., СКОРОСПЕЛОВ В.А., ТУРУК П.А. и др. Об одном подходе к оптимизации формы лопасти гидротурбины // Вычисл. технологии. 2005. Т. 10, № 6. С. 52–74.
- [2] ГРЯЗИН Ю.А., ЧЕРНЫЙ С.Г., ШАРОВ С.В., ШАШКИН П.А. Об одном методе численного решения трехмерных задач динамики несжимаемой жидкости // Докл. РАН. 1997. Т. 353, № 4. С. 478–483.
- [3] CHERNY S.G., SHAROV S.V., SKOROSPELOV V.A., TURUK P.A. Methods for three-dimensional flows computation in hydraulic turbines // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2003. Vol. 18, N 18. P. 87–104.
- [4] FONSECA C.M., FLEMING P.J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms. 1993. P. 416–423.
- [5] HORN J., NAFPLIOTIS N. Multiobjective Optimization Using The Niche Pareto Genetic Algorithm. IlliGAL Report 93005. Urbana: Univ. of Illinois, 1993.
- [6] ZITZLER E., DEB K., THIELE L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results // Evolutionary Computation. 2000. Vol. 8, N 2. P. 173–195.
- [7] DEB K., THIELE L., LAUMANN M., ZITZLER E. Evolutionary Computation Based Multi-Criteria Optimization: Theoretical Advances and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [8] TANAKA M., WATANABE H., FURUKAWA Y., TANINO T. GA-based decision support system for multi-criteria optimization // Proc. of the Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics-2. 1995. P. 1556–1561.
- [9] OSYCZKA A., KUNDU S. A new method to solve generalized multicriteria optimization problems using the simple genetic algorithm // Structural Optimization. 1995. Vol. 10. P. 94–99.
- [10] LIPEJ A., POLONI C. Design of Kaplan runner using multi-objective genetic algorithm optimization // J. of Hydraulic Research. 2000. Vol. 38. P. 73–77.
- [11] ENOMOTO Y., KUROSAWA S., SUZUKI T. Design optimization of Francis turbine runner using multi-objective genetic algorithm // Proc. of 22nd IAHR Symp. on Hydraulic Machinery and Systems. 2004.
- [12] MAZZOUJI F., FRANCOIS M., TOMAS L. ET AL. Refinements in Francis turbine design // Hydropower & Dams. 2004. Issue one. P. 53–58.
- [13] FAVARETTO C., FUNAZAKI K., TANUMA T. The development of a genetic algorithm code for secondary flow injection optimization in axial turbines // Proc. of the Intern. Gas Turbine Congress. Tokyo, Nov. 2003.
- [14] GOLDBERG D.E., RICHARDSON J.J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization // Proc. of the 2nd ICGA. NJ. 1987. P. 41–49.

Поступила в редакцию 11 мая 2006 г.