

УДК 681.322:621.5.041:533.697

М.Л. УГРЮМОВ<sup>1</sup>, А.В. МЕНЯЙЛОВ<sup>2</sup>, А.М. ЦЕГЕЛЬНИК<sup>1</sup>, С.А. ПРОКОФЬЕВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина<sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич», Украина

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ САД-СИСТЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВЕНЦОВ ТУРБОМАШИН

Описан общий алгоритм оптимизации венца турбомашин. Алгоритм состоит из шести шагов и характеризуется относительно низкими требованиями к ресурсам компьютера. Описана используемая объектная модель реализации. Представлены результаты тестовых расчетов.

**венец турбомашин, система проектирования, оптимизация, объектно-ориентированное программирование**

Одной из важнейших задач современного компрессоростроения является проектирование лопаточных венцов для создания конкурентоспособных авиационных двигателей и промышленных компрессорных установок, обладающих высоким коэффициентом полезного действия (КПД). Применяющиеся в настоящее время методики проектирования венцов турбомашин, ориентированные на использование стандартных типов профилей, не позволяют получить форму лопатки, обеспечивающую минимум потерь в лопаточном венце, и, соответственно, высокий КПД всего компрессора в целом. С другой стороны, разработка принципиально новых типов профилей для венцов турбомашин – трудоемкая и дорогостоящая задача. Поэтому, разумным подходом является разработка методики и создание автоматизированной САД-системы для совершенствования существующих лопаточных венцов турбомашин.

Основной целью данного исследования является разработка автоматизированной системы компьютерного проектирования аэродинамически совершенных высоконагруженных венцов путем их трехмерного рационального профилирования на основе системной структуризации, моделирования трехмерного вязкого течения газа в межлопаточных каналах и комплексного использования способов

управления отрывом потока в них – для использования в практике проектирования и доводки турбомашин.

В настоящее время существует ряд подходов к созданию подобных методик.

В работе [1] описаны программные комплексы: FlowER, в котором реализован метод решения уравнений Навье-Стокса, и Optimus, использующий метод Нелдера-Мида (деформируемого многогранника) для оптимизации формы профилей. Использование упомянутых программных комплексов позволяет получить достаточно точное решение на каждом шаге оптимизации. Но даже при малом количестве управляющих переменных для решения задачи оптимизации профиля требуются значительные вычислительные ресурсы, что обусловлено алгоритмом решения.

В работе [2] вычисление целевой функции также основано на результатах решения уравнений Навье-Стокса. В качестве методов оптимизации используются: градиентные, генетические, случайного поиска. В работе [3] для оптимизации пространственной формы лопатки применен алгоритм решения обратной задачи с использованием модели распределенных источников-стоков.

Основным отличием разработанного авторами комплекса является малое время и высокая точность

расчетов. Для получения оптимальной формы лопатки необходимо выполнить не более четырех прямых расчетов параметров потока. Эти преимущества достигнуты благодаря предлагаемой оригинальной постановке задачи и эффективным алгоритмам расчета, описанным в [4, 5].

Рассмотрим обобщенный алгоритм оптимизации формы профиля венца турбомшины.

Полный цикл расчета и оптимизации формы лопатки состоит из следующих этапов.

1. Построение радиальной модели исходной лопатки. На этом этапе по набору плоских сечений строится радиальная модель лопатки [4], задающая ее координатами средних линий и радиусами вписанных окружностей по сечениям вдоль размаха лопатки. На рис. 1 представлена радиальная модель лопатки.

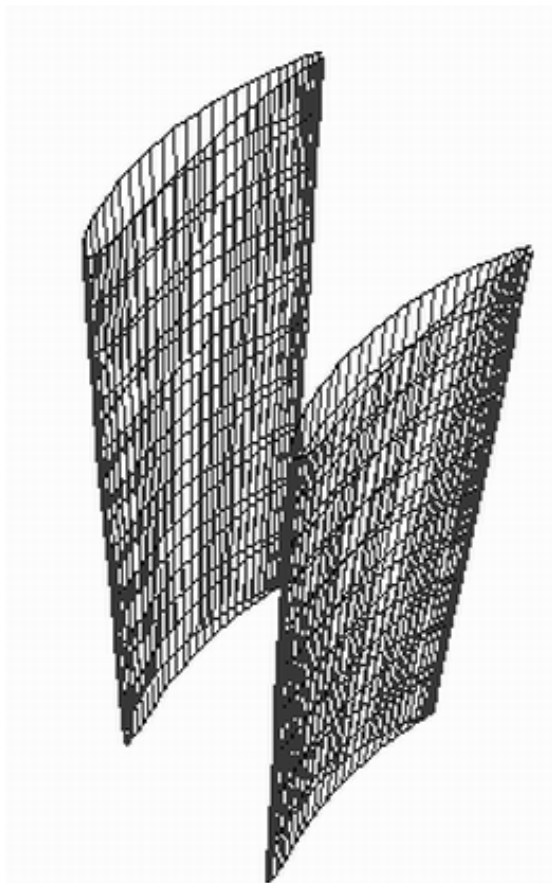


Рис. 1. Радиальная модель лопатки

2. Построение трехмерной сетки для исходного венца. Из радиальной модели с учетом ряда ограни-

чений и условия периодичности строится трехмерная разностная сетка. На рис. 2 представлена трехмерная расчетная сетка.

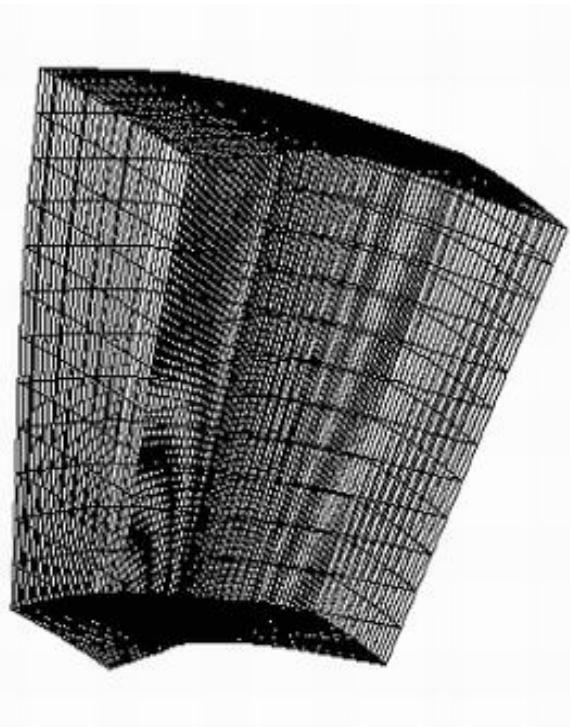


Рис. 2. Трехмерная расчетная сетка

3. Трехмерный расчет параметров потока. Рассчитываются параметры потока (распределения скоростей, давления, плотности в межлопаточном канале). Расчет производится по модифицированному методу Годунова с использованием пограничного слоя [5], благодаря чему сокращается время расчета по сравнению с программами, основанными на решении уравнений Навье-Стокса.

4. Построение идеального распределения скорости. На основе результатов прямого расчета параметров потока строятся параметризованные распределения скорости (рис. 3) в сечениях на поверхностях тока вдоль размаха лопатки, которые затем оптимизируются с целью снижения потерь. Ограничением является условие конструктивной реализуемости профилей, имеющих такие распределения. В результате параметризации количество управляющих переменных для каждого сечения по высоте лопатки сведено к трем:  $S_{ss\ 2}$ ,  $S_{ps\ 2}$ ,  $V_{ss\ max}$ .

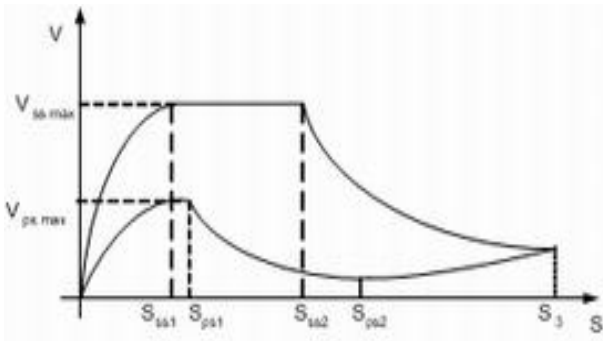


Рис. 3. Параметризованное представление оптимального распределения скорости

5. Коррекция профилей. На этом этапе вычисляются поправки к координатам узлов исходных профилей, задаваемые дважды гладкими кубическими сплайнами, с тем, чтобы распределения скорости модифицированных, согласно этим поправкам, профилей  $V_2$  были как можно ближе к оптимальным распределениям скорости  $V_1$ , то есть имел место минимум потерь. Расчет  $V_2(s)$  осуществляется по формулам:

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot k \cdot \frac{\rho_0 - \rho_2}{k - 1} + V_0^2}; \quad (1)$$

$$\rho_2 = \left(\frac{\rho_2}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{K}} \cdot \rho_0; \quad (2)$$

$$\rho_2 = \rho_0 + \rho_0 \cdot V_0^2 \cdot \left[ \begin{array}{l} -b_0 \cdot C_0 \cdot \sigma + \\ + b_1 \cdot \frac{d^2 \sigma}{ds^2} \\ + b_2 \cdot \frac{\psi}{\rho_0 \cdot V_0} \end{array} \right]; \quad (3)$$

$$\psi = \frac{d(\rho_0 \cdot V_0 \cdot \sigma)}{ds}, \quad (4)$$

где  $b_0, b_1, b_2$  – эмпирические коэффициенты;  $\sigma(s)$  – величина коррекции профиля;  $\rho_0(s)$  – плотность;  $V_0(s)$  – полная скорость;  $M_0(s)$  – число Маха;  $C_0(s)$  – кривизна исходного профиля.

6. Поверочный трехмерный расчет параметров потока. Осуществляется расчет параметров потока в модифицированном межлопаточном канале, соглас-

но п. 3. В результате находятся уточненные распределения скорости и коэффициенты  $b_i$ .

Шаги 5, 6 повторяются до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность вычисления коэффициентов  $b_i$ , для чего обычно достаточно трех итераций. На рис. 4 представлены распределения скорости для исходного и рационального профиля, а также оптимальное распределение скорости вдоль линии тока в среднем по высоте лопатки сечения.

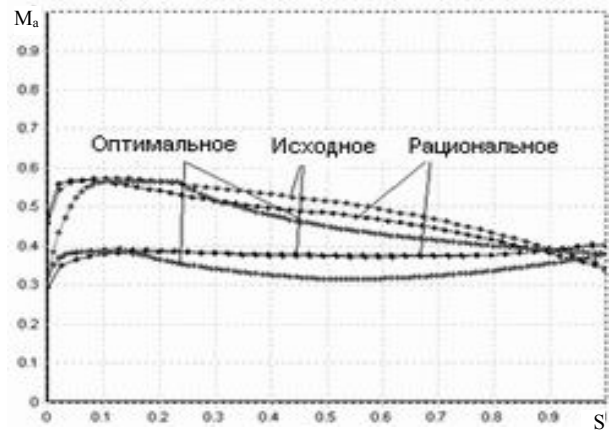


Рис. 4. Распределения скорости

Рассмотрим объектную модель, разработанную при создании комплекса.

Основными требованиями, предъявляемыми к программным комплексам такого типа, являются следующие:

- возможность нахождения оптимального решения за минимальное время счета;
- возможность интеграции с используемыми программными комплексами;
- возможность работы на машинах с различными операционными системами (кроссплатформенность);
- простота в использовании;
- поддержка распределенных вычислений.

Для реализации этих возможностей был выбран объектно-ориентированный подход и язык программирования C++. В качестве основной альтернативы рассматривался язык программирования Java, однако этот вариант был отвергнут из-за меньшего быстродействия.

Каждый этап является сложным блоком, использующим различные численные методы. Кроме разработки блоков решения базисных задач необходимо также создание многофункционального интерфейса пользователя (ввод исходных данных, просмотр результатов, коррекция параметров и т.д.), а также управление процессом вычислений (контроль вводимых чисел, возможность “отката” на один шаг назад, синхронизация многопоточных приложений, открытие/сохранение данных и т.д.). Отметим также, что на всех этапах расчета используются стандартные математические средства (методы интерполяции, решения алгебраических, трансцендентных и обыкновенных дифференциальных уравнений, вычисления интегралов, оптимизации с различными целевыми функциями и т.д.); параметры, задающие формы профилей лопатки, и параметры венца – являются сложной структурой данных. Исходя из вышеизложенного, были сформированы следующие пакеты (модули) программы:

- управления;
- математических средств;
- расчет параметров профилей в сечениях по высоте лопатки;
- построения радиальной модели;
- построения трехмерной сетки;
- трехмерного расчета параметров потока;
- построения идеального распределения скорости;
- коррекции профилей;
- пользовательского интерфейса.

Все пакеты, кроме пакета пользовательского интерфейса, не зависят от среды разработки, операционной системы. Каждый пакет предоставляет интерфейс, необходимый для его использования. Детали реализации скрываются. Благодаря этому возможно решение задачи в целом, подробности реализации не оказывают влияния на все части программы. Лучшим способом представления интерфейса считается набор классов, связанных между собой отношениями использования и наследования. Ниже

описываются назначение и основные особенности каждого из пакетов.

В пакете математических методов представлены классы и функции, реализующие наиболее часто используемые численные методы: нахождения корней алгебраических и трансцендентных уравнений и систем, интерполяции, оптимизации функций, решения дифференциальных и интегральных уравнений, вычисления интегралов, производных функций и др. Здесь же описаны классы, представляющие многомерные массивы данных и операции для работы с ними. Так как этот пакет наиболее часто используется и скорость выполнения описанных в нем операций имеет наибольшее влияние на время расчета, в нем активно используются параметризованные классы и встраиваемые функции.

В интерфейсной части расчетных пакетов, как правило, содержится один класс, который организует обмен данными с основной программой. Это повышает раздельность кода и дает возможность разрабатывать эти пакеты независимо разным разработчикам. Пользовательский интерфейс зависит от среды разработки и использует стандартные средства ввода и отображения информации. Кроме этого, формируется единый, независимый от среды разработки, интерфейс для взаимодействия с управляющим пакетом. Он обеспечивает следующие задачи общения с пользователем: открытие, сохранение файлов проекта; запуск на счет очередного этапа; возможность “отката”; просмотр информации как в текстовом виде, так и в виде графиков, трехмерных моделей, диаграмм. Существует возможность конфигурирования процесса расчета. Все независимые расчеты одновременно запускаются в отдельных потоках. Каждый поток может выполняться на удаленном компьютере (при использовании нескольких компьютеров, объединенных в локальную сеть) или на разных процессорах (при использовании мультипроцессорного компьютера). При использовании однопроцессорной рабочей станции потоки будут

выполняться одновременно, распределение ресурсов процессора между ними возложено на операционную систему.

Параметры, задающие формы профилей лопатки и венца, сгруппированы по функциональным признакам (конструктивные, газодинамические, размерность и координаты точек сетки и т.д.) и представлены в соответствующих классах. Эти классы описаны в пакете расчета параметров профилей лопатки в сечениях по высоте лопатки и трехмерного расчета параметров потока.

С помощью разработанной автоматизированной системы был перепрофилирован венец направляющего аппарата перспективного авиационного двигателя и получены следующие результаты.

На рис. 5 представлены распределения потерь кинетической энергии по высоте лопаток: исходной, оптимальной, рациональной. На рис. 6 представлены исходная и рациональная формы профиля. В результате перепрофилирования полные потери кинетической энергии в венце были уменьшены на 8%.

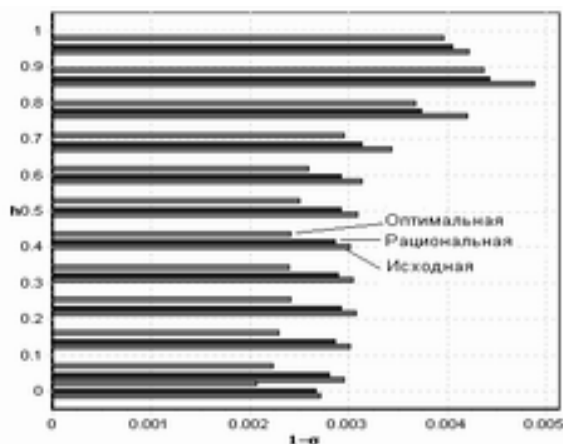


Рис. 5. Распределение потерь по высоте лопаток

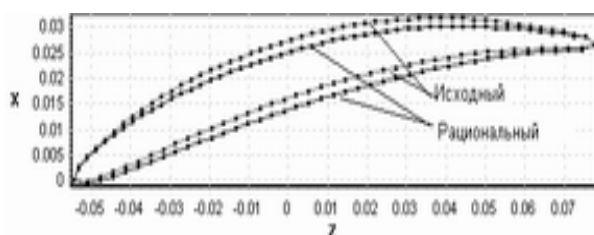


Рис. 6. Форма профиля в среднем сечении

## Заключение

Разработана объектная модель, на базе которой создана САД-система “Blade”. Созданный комплексный программный продукт является отвечающим современным требованиям инструментом для инженера-проектировщика венцов турбомашин.

## Литература

1. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, С.В. Ершов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
2. A flexible and automatic design environment applied to the optimization of turbomachinery blades/ S. Pierret, A. Demeulenaere, B. Gouverneur, C. Hirsch // Papers from the Fifteenth International Symposium on Air Breathing Engines. – Bangalore (India). – 2001. – 16 p. (ISABE Paper No. 2001 – 1054).
3. Demeulenaere A., Van den Braembussche R. Three-Dimensional Invers Method for Turbomachinery Blade Design // Journal of Turbomachinery. – 1998. – Vol. 120. – P. 247 – 255.
4. Чернышев Ю.К. Выпуклые векторные сплайны в применении к профилированию лопаток ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2000. – Вып. 21. – С. 16 – 18.
5. Угрюмов М.Л., Меньяйлов А.В., Цегельник А.М. Параметрический синтез трехмерного рационального профилирования венцов турбомашин с использованием САЕ-систем // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2000. – Вып. 21. – С. 195 – 201.

Поступила в редакцию 29.05.2004

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков.