

УДК 681.322:621.5.041:533.697

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБЛИКА ВЕНЦОВ ТУРБОМАШИН

М.Л. Угрюмов, канд. техн. наук, А.М. Цегельник, С.А. Прокофьев

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрена информационная технология синтеза аэродинамически совершенных высоконагруженных венцов турбомашин путем их трехмерного рационального профилирования. Профилирование выполняется на основе системной структуризации, моделирования трехмерного вязкого течения в межлопаточных каналах и комплексного использования в них способов управления отрывом потоков.

* * *

Розглянуто інформаційну технологію синтезу аеродинамічно досконалих високонавантажених вінців шляхом їх тривимірного раціонального профілювання. Профілювання виконується на основі системної структуризації, моделювання тривимірної в'язкої течії у міжлопатних каналах і комплексного використання засобів керування відривом потоку у них.

* * *

Information technology of a aerodynamically perfect highloaded turbomachinery rows synthesis by their three-dimensional rational designing are considered. Blade design is carried out on a basis of system structuring, three-dimensional viscous flow modeling in blade passages and complex using of flow separation control.

На современном этапе развития авиационной техники повышение эффективности авиационных двигателей связано с совершенствованием отдельных их элементов. В частности, это относится к компрессорам турбореактивных двигателей, для которых актуальной задачей является уменьшение потерь кинетической энергии. Применявшиеся ранее методы проектирования компрессоров уже не удовлетворяют современным требованиям, поэтому требуют развития методы и средства информационной технологии, позволяющие решать такие задачи.

Основной научной задачей данного исследования является разработка системотехнических основ синтеза аэродинамически совершенных высоконагруженных венцов путем их трехмерного рационального профилирования на основе системной структуризации, моделирования трехмерного вязкого течения в межлопаточных каналах и комплексного использования способов управления отрывом потока в них — для использования в практике проектирования и доводки турбомашин.

Различные подходы к решению данной задачи представлены в работах [1-3]. В этих работах параметры течения определяли на основе численного

решения уравнений Навье–Стокса для трехмерного случая. Параметры венцов и форму профилей задавали параметрически. В процессе оптимизации находилось от 10 до 43 [3] управляющих параметров. Очевидно, что это приводит к большому количеству расчетов по прямой задаче (542 расчета [3]) и, соответственно, большим временным затратам даже на очень мощных компьютерах. Представленный ниже метод решения задачи реконструкции (модификации) венца турбомашин позволяет за счет разделения общей задачи на два этапа и использования оригинальных расчетных алгоритмов значительно снизить вычислительные затраты и сделать их приемлемыми в современных условиях.

Решение данной задачи основывается на следующих данных: описании объекта исследования; наличии прототипа, цели реконструкции (модификации) сложной технической системы (СТС), класса допустимых способов и реализующих их устройств для управления отрывом потока, критериях качества проектных решений.

Системная цель реконструкции (модификации) турбомашин — повышение ее аэродинамической эффективности, т.е. следует добиваться минимиза-

ции потерь в венцах в широком диапазоне условий работы при сохранении заданных газодинамических параметров турбомашин на установившихся режимах.

Сформулируем задачу реконструкции (модификации) венца турбомашин. Будем характеризовать объект, подлежащий реконструкции, разными группами параметров: режимными и проектными Π° , которые задаются конструктором; фазовыми параметрами или параметрами состояния Φ° , устанавливаемыми в процессе расчетов по заданным замыкающим соотношениям; управляющими или регулирующими переменными U° , выбор которых определяется типом задачи. Вектор Π° находится в некоторой области D_Π пространства Π , вектор U° ограничен и находится в некоторой области $D_U = \{U^\circ = (u_1, \dots, u_l, \dots, u_L) : (\forall l \in [1 \dots L]) a_l \leq u_l \leq b_l\}$ пространства U , что математически записывается как

$$\Pi^\circ \in D_\Pi \subset \Pi, U^\circ \in D_U \subset U.$$

Область $D_\Pi \subset \Pi$ является областью имеющих физический смысл режимов, а область $D_U \subset U$ – область допустимых управлений. Вектор $\Phi^\circ = \Phi^\circ(\Pi^\circ, U^\circ)$ ограничен так, что обычно $\Phi^\circ \in [\Phi^\circ_{\min}, \Phi^\circ_{\max}]$.

Пусть $Q = \{q_j^0\}$, $q_j^0 = (\Pi_j^0, \Phi_j^0, U_j^0)$, $j=1 \dots J$ – дискретное множество допустимых проектных решений (подмножество корректности). С точки зрения лица, принимающего решения (ЛПР), качество любого решения $q_j^0 \in Q$ определяется относительно критериев $W = \{w_i\}$, $i=1 \dots M$.

Пусть для каждого решения существует отображение $A: q_j^0 \rightarrow W_j$, тогда значение $A_i(q_j^0) = w_{ij}$ – оценка решения $q_j^0 \in Q$ по i -му критерию $w_{ij} \in W$.

Пусть для критериев $W = \{w_i\}$ существует отображение $L: W \rightarrow W^\circ$, $W^\circ = \{w_i^\circ\}$, тогда значение $L_i(w_{ij}) = w_{ij}^\circ$ – оценка критерия $w_{ij} \in W$ по нормированному критерию $w_{ij}^\circ \in W^\circ$.

Пусть $W_j^\circ = (w_{1j}^\circ, w_{2j}^\circ, \dots, w_{mj}^\circ)$ – множество оценок j -го проектного решения по критериям

$W_j = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{mj})$ на системе предпочтений G , сконструированных в виде системы правил формирования вектора U° . Тогда пара (q_j^0, W_j°) , $j=1 \dots J$, есть альтернатива v_j^0 . Множество пар $v_j^0 = (q_j^0, W_j^\circ)$ составляет множество альтернатив $V = \{v_j^0\}$.

В рассматриваемом случае множество альтернатив V содержит прототип $v_0^0 \in V$, а остальные его элементы — v_j^0 могут быть получены заданием малых отклонений от параметров прототипа.

Задачи реконструкции как частный случай задач принятия решений [4, 5] могут быть представлены кортежем вида

$$\{t, V, G, F\}, \tag{1}$$

где t – постановка задачи (например, выделение лучшей альтернативы, выделение упорядоченного или неупорядоченного подмножества лучших альтернатив и др.), F – процедура выбора рациональных проектных решений из множества альтернатив V в системе предпочтений G .

Процедура выбора F реализаций отображения $F: (V, G) \rightarrow V$, а результат ее применения — подмножество $\hat{V} \subseteq V$ рациональных альтернатив, которые составляют элементы, недоминируемые относительно критериев W , входящих в применяемую систему предпочтений $G = (W, R)$:

$$\begin{aligned} \hat{V} &= \{v_i^0, i \in [1 \dots J]: v_i^0 \in \hat{V}, \\ (\forall j \in [1 \dots J]) v_j^0 \notin \hat{V} &\rightarrow v_i^0 R_1^1 v_j^0: v_i^0 R_\ell^1 v_j^0, \ell=2 \dots M, \\ v_i^0 &\in \hat{V}; \\ (\forall i_1, i_2 \in [1 \dots J]) v_{i_1}^0, v_{i_2}^0 &\in \hat{V} \rightarrow v_{i_1}^0 R_k^2 v_{i_2}^0, \\ k=1 \dots K \}. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $R_\ell^1 \in R$ — отношение доминирования относительно G ; $R_k^2 \in R$ — отношение равноценности относительно G .

Запись $v_i^0 R_1^1 v_j^0$ означает «решение v_i^0 предпочтительнее, чем v_j^0 по критерию $w_{i_1}^0$, если задано бинарное отношение приоритета $R_1^1: v_i^0(q_i^0) < (q_j^0)$ », запись вида $v_i^0 R_\ell^1 v_j^0$ — «реше-

ние v_i^0 удовлетворяет условиям $R_\ell^1: |w_\ell^0(q_i^0) - w_\ell^*| < \varepsilon_\ell$ (или $w_\ell^0(q_i^0) \leq w_\ell^*$), запись вида $v_{11}^0 R_k^2 v_{12}^0$ — «решение v_{11}^0 равноценно решению v_{12}^0 , если удовлетворяется условие $R_k^2: |w_k^0(q_i^0) - w_k^*| < \varepsilon_k$ (или $w_k^0(q_i^0) \leq w_k^*$)». Здесь w_i^0 — решающий критерий, w_ℓ^0 — дополнительные критерии (в том числе и псевдокритерии).

В качестве решающего критерия выберем

$$w_1^0 = \langle \delta_\sigma \rangle / \langle \delta_\sigma \rangle_0, \quad (3)$$

где $\langle \delta_\sigma \rangle$, $\langle \delta_\sigma \rangle_0$ — осредненные по шагу и высоте лопатки за выходными кромками коэффициенты потерь полного давления в относительном движении исследуемого варианта проектного решения и прототипа, соответственно.

В качестве дополнительных критериев могут быть выбраны:

$$\text{- для } PK_j + HA_j: w_2^0 = \max |\Delta \alpha_j^0(r)|, \quad (4)$$

где $\Delta \alpha_j^0(r) = (\alpha_1(r) - \alpha_1(t)) / \Delta \alpha_1(t)$ — относительная степень рассогласования углов потока в абсолютном движении на входе в следующий венец по сравнению с проектными (теоретическими); $\Delta \alpha_1(t)$ — диапазон рабочих режимов по углу атаки на следующий венец.

$$\text{Для } HA_j + PK_{j+1}: w_2^0 = \max |\Delta \beta_{j+1}^0(r)|;$$

$$\text{- для } PK_j + HA_j: w_3^0 = \max |\Delta P_{0j}^0(r)|, \quad (5)$$

где $\Delta P_{0j}^0(r) = (\langle P_{0j} \rangle - P_{0j}(r)) / \langle P_{0j} - P_j \rangle$ — относительная степень неравномерности по высоте лопатки осредненного по шагу полного давления в абсолютном движении за выходными кромками; $\langle P_{0j} \rangle$ — полученное в результате осреднения по шагу и высоте лопатки значение полного давления в абсолютном движении в выбранном сечении;

$$\text{- для } PK_j + HA_j: w_4^0 = \max |\Delta \pi_{0k}^0|, \quad (6)$$

где $\Delta \pi_{0k}^0 = (\langle \pi_{0k} \rangle - \pi_{0k}) / \langle \pi_{0k} \rangle_0$ — относительная степень рассогласования по степени сжатия.

Значения величин w_2^* , w_3^* и w_4^* обычно назначаются специалистом — проектировщиком.

Задача реконструкции (модификации) венца турбомшины (1) математически формулируется следующим образом: задан прототип v_0^0 , множество альтернатив $V = \{v_i^0\}$ и система предпочтений G . Требуется выделить такое допустимое управление $U^0(\Phi^0)$ ($U^0 \in D_U$), которое перевело бы систему из заданного состояния v_0^0 в другое допустимое $\hat{v}^0 \in \hat{V}$ (2) в системе предпочтений G .

В задачах многокритериального принятия решений следует руководствоваться принципом оптимальности решения, который удовлетворяет аксиомам оптимальности по Парето и равенствам нормированных оценок частных критериев.

Определение. Принцип оптимальности решения задачи (1–6) с приоритетом первого критерия.

Существует лучшая альтернатива \hat{v}^0 из множества рациональных альтернатив $\hat{v}^0 \in \hat{V}$ задачи многокритериального принятия решений (1–6) в случае приоритета первого критерия над другими, если найдены точка \hat{U}^0 и минимальный относительный уровень \hat{w}^0 среди всех нормированных критериев такой, что

$$\hat{w}^0 = \min_{U^0} \max_i \left\{ \begin{array}{l} p_i^1 w_i^0(U^0), i = 1 \dots M, U^0 \in D_U; \\ p_i^1 = w_i^0(U^0) / w_i^0(\hat{U}^0), \\ p_i^1 \in [p_i^1(\hat{U}^0), p_i^1(U^0)] \end{array} \right\} \quad (7)$$

Сформулированная задача относится к задачам синтеза оптимального управления $U^0(\Phi^0)$ с подвижными концами при наличии ограничений на режимные, фазовые и управляющие параметры.

Фазовые переменные определяются путем компьютерного моделирования СТС, основанного на применении компьютерной интерактивной системы инженерного анализа трехмерного вязкого течения в межлопаточных каналах турбомшины.

Эффективное решение задач многокритериального принятия решений возможно путем иерархической организации алгоритма: исходная задача большей размерности сводится к решению подзадач меньшей размерности. При этом множество допустимых решений разбивается на ряд подмножеств. Исключение из дальнейшего рассмотрения бесперспективных подмножеств позволяет сократить перебор вариантов решения задачи.

В соответствии с основными принципами системного подхода проведена декомпозиция общей задачи многокритериального принятия решений при формировании облика венцов турбомашин на ряд задач: синтеза системных рациональных проектных решений по основным конструктивным параметрам венца и решеток профилей в сечениях вдоль размаха лопатки (с использованием профилей некоторого типичного семейства форм) и синтеза формы профилей в сечениях. Основанием для выбранной иерархии подзадач является принятое упорядочение управляющих параметров в порядке убывания влияния на значения приоритетных, исходя из системы предпочтений, критериев качества технического решения.

Постановка и метод решения первой подзадачи рассмотрены в [6]. Постановка и метод решения вариационной задачи аэродинамики построения профиля в плоских решетках рассмотрены в [7]. Предложенный в [7] метод был распространен на трехмерный случай. Для компьютерного моделирования трехмерного вязкого течения использовали адаптивную пространственную расчетную сетку, получаемую стыковкой сеток типа «Н» на поверхностях вращения в радиальном направлении. Координаты первоначально взятых профилей в сечениях вдоль размаха лопатки определяли как точки пересечения выпуклой и вогнутой поверхностей лопатки с поверхностями вращения, на которых располагались внутренние узлы расчетной сетки. Распреде-

ния давления $P_0(s)$ как функции дуговой абсциссы первоначально взятого контура γ_0 для каждой из сторон профиля в отдельности в сечениях вдоль размаха лопатки определяли путем компьютерного моделирования трехмерного вязкого течения в межлопаточных каналах венцов. Новую форму профилей в сечениях находили как квазирешение вариационной задачи аэродинамики построения профиля в решетках на поверхностях вращения, близких или совпадающих с осесимметричными поверхностями тока в полном соответствии с методом [7].

Разработана информационная технология аэродинамического анализа и совершенствования венцов турбомашин. Информационная технология процесса совершенствования предполагает наличие исходного венца-прототипа, который в дальнейшем реконструируется в целях повышения его аэродинамической эффективности. Структура компьютерной адаптивной системы поддержки принятия решений при формировании рациональной формы венца турбомашин на стадии концептуального проектирования показана на рис. 1. В общей структуре проектирования можно выделить два контура — внешний и внутренний.

Во внешнем контуре проводится параметрический синтез системных рациональных проектных решений по основным конструктивным параметрам венца и решеток профилей в сечениях вдоль размаха лопатки. В соответствии с обобщенным алгоритмом установлен следующий порядок операций. Специалист - проектировщик на основе собственного опыта и базы данных (БД) выбирает из набора проектных параметров подмножество управляющих параметров, на основе которых будет происходить модификация исходного варианта облика венца. Кроме того, возможен вариант, при котором подмножество допустимых управляющих параметров формируется генератором альтернатив (ГА) и базой знаний (БЗ) с использованием информации из

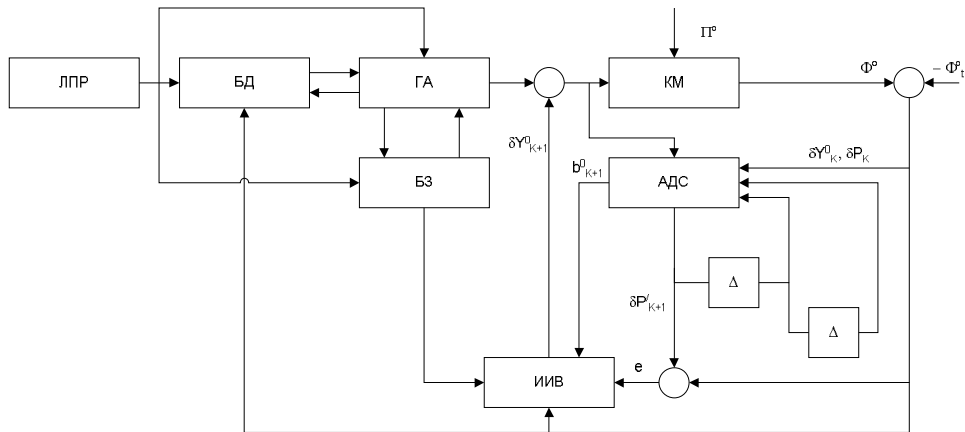


Рис. 1. Структура компьютерной адаптивной системы поддержки принятия решений

БД. Далее проводится компьютерное моделирование (КМ) альтернативного варианта конструкции венца с заданными режимными и проектными (Π^0) и выбранными управляющими (U^0) параметрами. Фазовые переменные альтернативного варианта (Φ^0), полученные на основе КМ, сравниваются с заданными Φ^0 , после чего проводится визуализация и анализ результатов расчетов лицом, принимающим решение (ЛПР). Далее, либо генерируется новый вариант облика конструкции венца, либо параметрический синтез решений продолжается по внутреннему контуру.

Во внутреннем контуре синтезируется форма профилей в сечениях вдоль размаха лопатки. В его состав входит три блока: КМ венца, адаптивной дифференциальной связи (АДС) и идентификации источников возмущений (ИИВ). КМ потока в межлопаточных каналах венца турбомшины связано с относительно высокой вычислительной сложностью и трудоемкостью, поэтому для повышения эффективности обобщенного алгоритма в систему были введены АДС и ИИВ. Использование АДС и ИИВ обусловлено тем, что малые возмущения формы профилей, генерируемые ГА, достаточно точно могут быть предсказаны как квазирешения вариационной задачи аэродинамики. В соответствии с обобщенным алгоритмом установлен следующий порядок операций во внутреннем контуре: адаптация

дифференциальной связи, определение оптимальных исходных распределений давления (ИРД) $\hat{P}_1(s)$, нахождение поправок к координатам обводов для каждой из сторон контуров профилей в отдельности и их модификация на полученные величины $\hat{\delta}_1^*(s)$ в сечениях вдоль размаха лопатки. На начальном этапе работы системы по выбранному контуру реализуется процесс обучения АДС. Коррекция коэффициентов b_{ik} влияния δY_{ik} возмущений формы в k -х точках контура профиля проводится посредством алгоритма адаптации, который в качестве обратной связи реализует контроль отклонения предсказываемой АДС вариации давления $\delta P'_k$, вызванной вариацией формы профиля $\hat{\delta}_1^*(s)$, от рассчитываемой — δP_k путем КМ. Когда заданная точность предсказания достигнута, осуществляется ИИВ на основе рассчитанных в блоке АДС коэффициентов влияния b_{ik} . Далее определяются оптимальные ИРД $\hat{P}_1(s)$ в сечениях вдоль размаха лопатки. ИИВ заключается в построении квазирешения обратной краевой задачи аэродинамики (ОКЗА) — гидродинамики целесообразного распределения давления (ГЦРД), удовлетворяющего условию совместимости исходных данных (УСИД) и условиям конструктивной реализуемости и разрешимости (УР) ОКЗА, а также соответствующей ему вариации формы профиля $\hat{\delta}_1^*(s)$. Входными данными для ИИВ кроме

оптимальных ИРД являются проектные и фазовые параметры решеток профилей в сечениях вдоль размаха лопатки. В процессе синтеза решений по внутреннему контуру ИИВ генерирует возмущения формы профилей и вновь, уже для новой формы лопатки рассчитывается распределение давления посредством КМ. На каждом шаге итераций точность предсказываемой АДС вариации давления $\delta P'_k$ оценивается по данным КМ и в случае необходимости проводится повторное обучение АДС. При достижении с заданной точностью ε значений критерия качества $w(\Delta\delta^*) = \max(\text{abs}(\delta_L^*(s) - \delta_{L-1}^*(s))) < \varepsilon$ при построении квазирешения ОКЗА на выбранном множестве корректности процесс вычислений по внутреннему контуру останавливается. Выходные данные в форме массива точек, задающих форму профилей в сечениях вдоль размаха лопатки, возвращаются в БД. Фазовые переменные альтернативного варианта Φ^0 , полученные на основе КМ, сравниваются с заданными Φ^0 , после чего выполняется визуализация и анализ результатов расчетов ЛПР. Далее, либо параметрический синтез решений продолжается по внешнему контуру (ГА генерирует новый вариант облика конструкции), либо процесс глобальных итераций останавливается.

Таким образом, ЛПР в соответствии с обобщенным алгоритмом проводит анализ множества рациональных альтернатив \hat{V} , информация о кото-

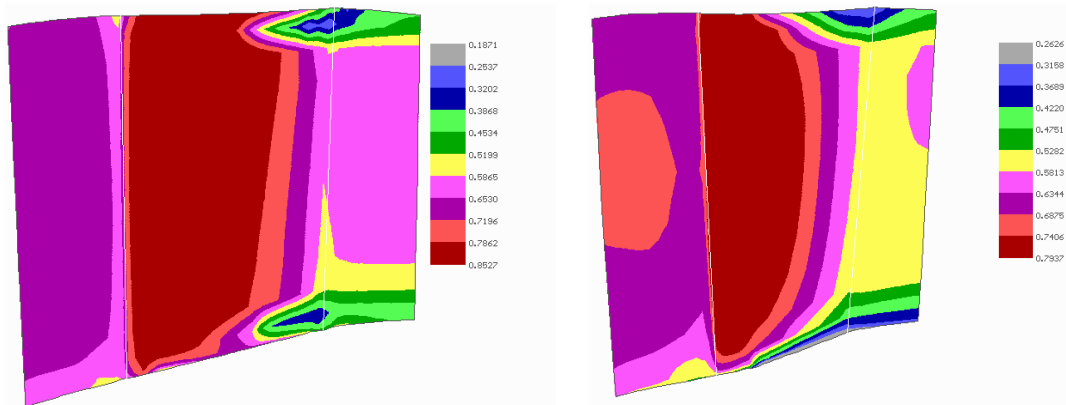
рых хранится в БД, и выбирает наилучшую альтернативу \hat{v}^0 — системное рациональное проектное решение.

Тестовые примеры

В качестве тестового примера приведены результаты трехмерной реконструкции направляющего аппарата (НА) вентилятора перспективного авиационного двигателя и компьютерного моделирования потока с помощью САЕ системы в нем. Результаты показаны на рис. 2-3. Основные параметры венца представлены в работе [6]. Использование профилей с откорректированной диффузорностью обеспечивает снижение потерь полного давления в венце на 10%.

Заключение

Разработаны постановка и метод решения задачи многокритериального принятия решений при формировании рациональной пространственной формы венцов турбомашин. Обоснована система предпочтений, структурированных в виде системы правил формирования управляющих переменных. Разработаны обобщенный алгоритм и средства информационной технологии решения задачи реконструкции (модификации) венцов турбомашин. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка эффективных алгоритмов дискретной оптимизации поиска глобальных экстремумов.



Исходный профиль

Лопатка с окружным навалом и измененными меридиональными обводами

Рис. 2. Распределение чисел Маха на стороне разрежения НА

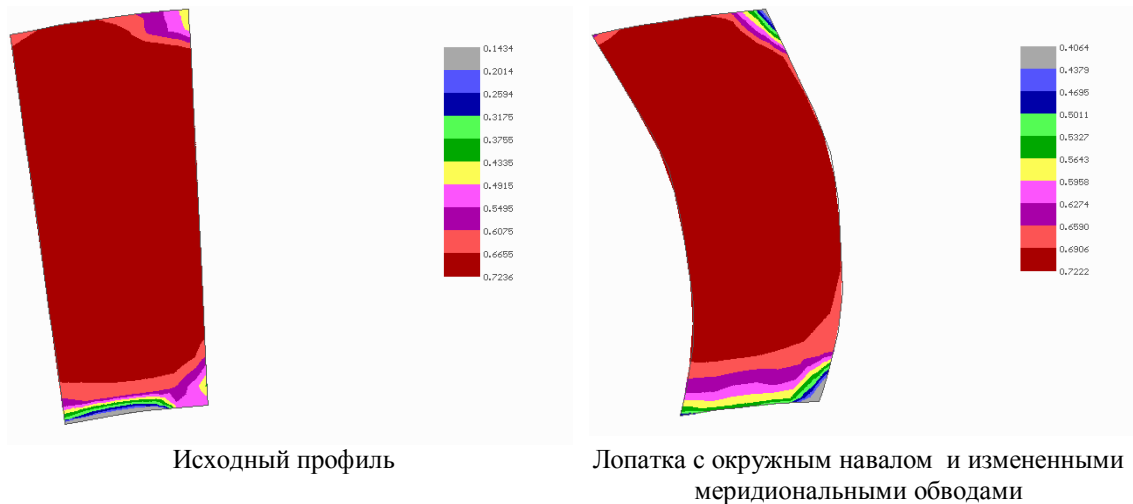


Рис. 3. Распределение удельного расхода на выходе НА

Литература

1. Lampart P., Yershov S. 3D shape optimization of turbomachinery blades // Task quarterly 6 2002. - No. 1. – P.113-125.
2. Burguburu S., Toussaint C., Leroy G. Numerical optimization for turbomachinery blades aerodynamic design using gradient method coupled with a Navier-Stokes solver //ISABE-2001-1117
3. Marc G. Nagel Leonhard Fottner Ralf-D. Baier Optimization of three dimensionally designed turbine blades and sided walls //ISABE-2001-1058
4. Гельфандбейн Я. А., Рудинский И. Д., Новожилова Н. В. Гибридные многомодельные системы. Вопросы реализации // Техническая кибернетика.-1991.-№3.- С.174-183.
5. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А. В. Алексеев, А. Н. Борисов, Э. Р. Вилломс, Н. Н. Слядзь, С. А. Фомин. – Рига: Зинатне, 1997.-320 с.
6. Угрюмов М.Л., Меняйлов А.В., Цегельник А.М. Параметрический синтез трехмерного рационального профилирования венцов турбомашин с использованием САЕ-систем // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. / Гос. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».-Х., 2000. - Вып.21. - С.195-201.
7. Ugryumov M.L., Tsegelnik A.M., Menyaylov A.V. Computer – aided Improvement of the Axial Turbomachinery Rows Streamlined by 3D Viscous Flow // Turbomachinery. - Lodz, 1999. -No.115.- P.379-386.

Поступила в редакцию 11.04.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Бастеев А.В., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков; канд. техн. наук, доцент Тарасов А.И., НТУ «ХПИ», г. Харьков.