

УДК 621.431.75+004.9

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ  
ДЛЯ CAE-РАСЧЁТОВ В ПРОГРАММЕ PROFILER**

© 2012 Л. С. Шаблий, И. Б. Дмитриева, Г. М. Попов

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматривается методика автоматизированного построения трёхмерной модели пера лопатки для последующего газодинамического анализа в среде NUMECA. Предложены варианты решения возникающих при этом проблем.

*Лопатка, модель трёхмерная, модель сеточная, сплайн кубический.*

В настоящее время CAE-расчёт является неотъемлемым этапом проектирования любого сложного объекта, к каким, несомненно, относятся лопаточные машины – компрессоры и турбины. Именно среда CAE – систем позволяет проводить численные исследования проектируемых объектов, методом, например, конечных элементов. Такое исследование предполагает наличие конечно–элементной модели, которая обязательно включает в себя конечно–элементные (КЭ) сетки. От качества КЭ сеток существенно зависят скорость решения и точность результатов численного анализа.

Надо иметь в виду, что однократный расчёт на базе КЭ модели не даёт ответа на вопрос о качестве исследуемого объекта. Самое большее, что может дать одиночный CAE-расчёт – это обоснованный ответ на вопрос, является ли исследуемый вариант конструкции допустимым. Если же поставлена задача оптимизации конструкции или, по крайней мере, отбраковки заведомо неудачных (хоть и допустимых) её вариантов, то расчётов надо произвести несколько, каждый раз меняя параметры исследуемой конструкции и перестраивая её модель.

В рамках задачи оптимизации лопаточных венцов к CAE-расчёту надо относиться как к решению прямой задачи (отвечающей на вопрос «Что будет, если?...»). Решение обратной задачи, задачи оптимизации (отвечающей на вопрос «Как сделать, чтобы?...») предполагает многократное обращение к прямой задаче. В связи с этим остро встаёт вопрос

автоматизированного создания геометрических и КЭ моделей лопаточных венцов и их базовых элементов - лопаток.

На пути к достижению поставленной цели – автоматизации построения геометрических моделей лопаточных венцов – встречается большое количество проблем, причём решение каждой из них является сложной и не вполне формализованной (иногда полностью неформализованной) задачей. Для решения таких задач была создана программа Profiler. Эта программа уже была описана раньше [1], но с тех пор функционал программы значительно расширился, а для части функций были существенно переработаны алгоритмы. В настоящее время программа Profiler имеет большое количество функций соответственно числу решаемых задач, которые по своей семантике делятся на два класса. Первый класс задач связан собственно с автоматизацией процесса построения моделей. Решение задач второго класса направлено на отыскание новых форм представления геометрии профилей лопаток, наиболее соответствующих задаче оптимизации. Данная статья посвящена описанию задач первого класса. К ним относятся:

- 1) преобразование форматов из традиционного в специализированный;
- 2) выкалывание некорректных точек;
- 3) визуализация для контроля вводимых данных;
- 4) критериальная оценка кривизны.

*Преобразование форматов.* Преобразование традиционного формата в формат NUMECA выполняется аналогично преобразованию в

формат TurboGrid [1] и содержит следующие шаги:

- 1) выкалывание лишних точек спинки и корытца;
- 2) поиск замыкающих точек на входной и выходной кромке;
- 3) разбиение дуг входной и выходной кромок точками;
- 4) добавление дополнительных точек рядом с замыкающими для предотвращения волн на сплайнах;
- 5) запись координат точек в формате NUMECA.

Изменению подверглись только первый пункт (был улучшен алгоритм) и пятый, поскольку формат NUMECA отличается от формата TurboGrid тем, что замкнутый профиль, описывающий лопатку, должен быть разделён на две условные части: «спинку» (suction side - сторона разрежения) и «корытце» (pressure side - сторона давления), в которые кроме непосредственно точек спинки и корытца входят ещё точки соответствующих половин входной и выходной кромок (рис. 1).

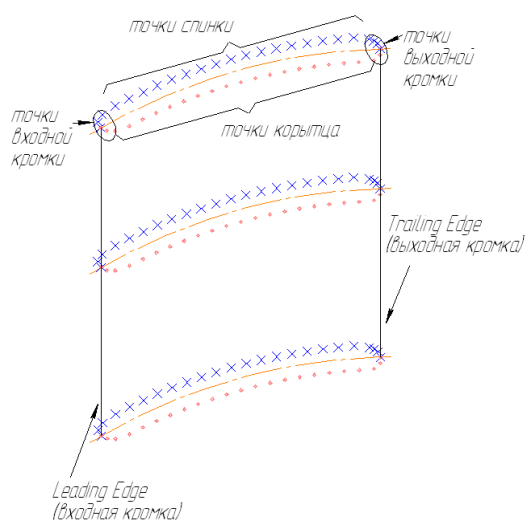
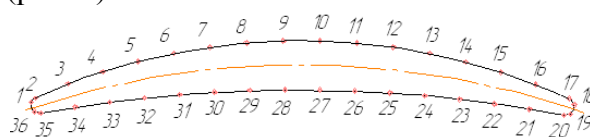


Рис. 1. Формат представления данных в NUMECA

Входная и выходная кромка разделяются касательными к средней линии в её крайних точках, т.е. дуги входной и выходной кромок разделяются пополам «средней» точкой. Линия, представляющая совокупность средних точек всех входных кромок сечений пера, имеет обозначение Leading Edge (LE) - входное ребро, всех выходных кромок - Trailing Edge (TE) - выходное ребро. При записи в формате Numeca происходит выгрузка координат

точек в файл в последовательности, соответствующей замкнутому сплайну, но в два списка: сначала для всех точек «спинки» лопатки, затем для всех точек «корытца» (рис. 2).



Начало файла (данные о версии и т.п.)

```
suction
section 1
t.1 (z; x; y)
t.2 (z; x; y)
.....
t.18 (z; x; y)
section 2
t.1 (z; x; y)
t.2 (z; x; y)
.....
.....
pressure
section 1
t.19 (z; x; y)
t.20 (z; x; y)
.....
t.36 (z; x; y)
section 2
t.19 (z; x; y)
t.20 (z; x; y)
.....
```

Рис. 2. Формат записи файла NUMECA

Выкалывание лишних точек на концах сплайна - необходимый этап для получения замкнутого контура. В [1] был предложен алгоритм выявления «лишних» точек профилей и их удаления из дальнейшего рассмотрения. Однако эксплуатация данного алгоритма выявила недостатки критерия оценки «негодности» концевых точек. Первый недостаток проявлялся при работе с сильно изогнутыми профилями. В качестве критерия выступало попадание исследуемой точки и центра «дальней» кромки в одну полуплоскость относительно прямой, проведённой через центр исследуемой кромки перпендикулярно прямой, соединяющей две концевые точки (рис. 3, а). Точка центра дальней кромки была выбрана как точка, гарантированно лежащая в нужной полуплоскости, относительно данной прямой. Однако, в случае сильного изгиба лопаток, возможен переход центра дальней кромки в другую полуплоскость, что в случае использования прежнего критерия приводит к признанию годности некорректных точек и негодности корректных (рис. 3, б).

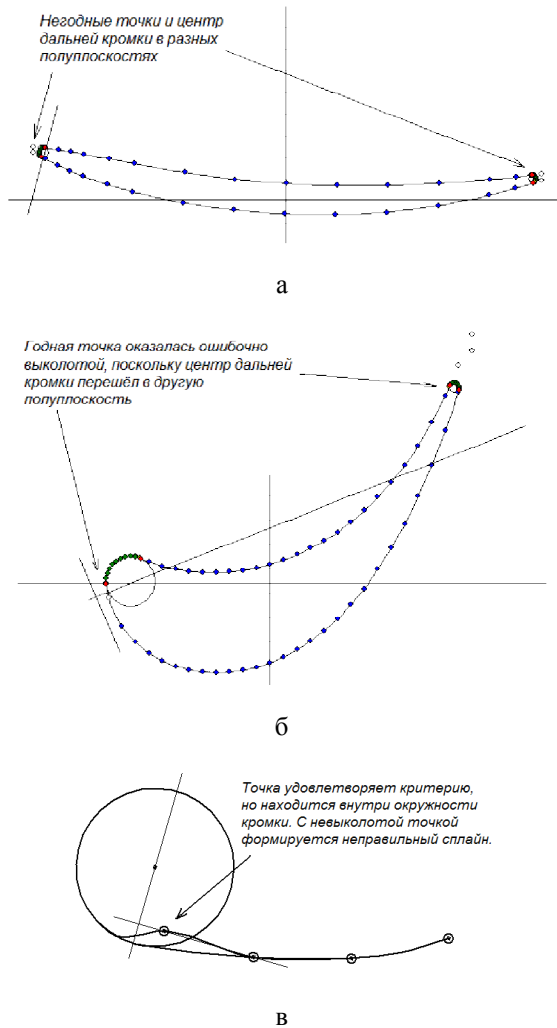


Рис. 3. Несостоятельность критерия годности старого алгоритма выкалывания:  
 а - правильная работа алгоритма при малой кривизне профиля; б - неправильная работа алгоритма при большой кривизне профиля; в - неучёт попадания точки внутрь кромки

Вторым недостатком такого критерия является отсутствие контроля попадания исследуемой точки внутрь окружности кромки (рис. 3, в). В этом случае, если точка окажется в «верной» полуплоскости, она будет признана годной, несмотря на то, что провести через эту точку плавный сплайн, касательный к кромке, невозможно. На основании проведённого анализа ошибок был предложен алгоритм оценки годности точек с улучшенным критерием.

П.1. Через две точки: крайнюю (т.1) и предпоследнюю (т.2) проводится вектор  $(A; B) = (x_1 - x_2; y_1 - y_2)$ , направленный от т.2 к т.1, т.е. указывающий направление в сторону от профиля (рис. 4). Данный вектор является нормальным для прямой  $Ax + By + C = 0$ , заданной в общем виде.

П.2. Ищется прямая  $Ax + By + C = 0$ , проходящая через исследуемую точку (т.1) (определяется коэффициент  $C = -A \cdot x_1 - B \cdot y_1$ ). Эта прямая делит плоскость на две полуплоскости: «положительную» ( $Ax + By + C > 0$ ), направленную в сторону, указанную нормальным вектором (от профиля), и отрицательную ( $Ax + By + C < 0$ ), направленную в направлении, обратном вектору  $(A; B)$ , т.е. к профилю.

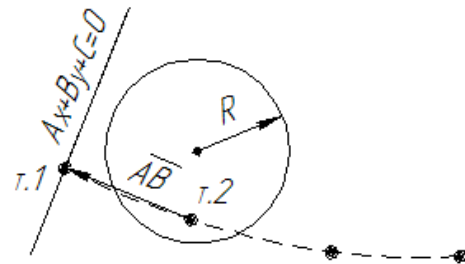


Рис. 4. Выполнение улучшенного выкалывания

П.3. Производится оценка принадлежности центра исследуемой кромки положительной полуплоскости ( $Ax_c + By_c + C > 0$ ). Если это условие выполняется, то исследуемая точка относительно кромки лежит в «правильной» полуплоскости. В этом случае точка считается возможно годной и проходит дополнительную проверку (п. 4). В противном случае точка признаётся негодной и выкалывается, а алгоритм повторяется с п. 1.

П.4. Производится оценка попадания исследуемой точки внутрь окружности кромки. Для этого расстояние между точкой и центром кромки сравнивается с радиусом кромки. В случае  $\sqrt{(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2} > R$  исследуемая точка признаётся годной и процесс выкалывания негодных крайних точек прекращается. В противном случае точка выкалывается и алгоритм продолжается с п.1 до тех пор, пока не будет найдена полностью годная точка. Например, для случая, изображённого на рис. 7, первой точкой, годной по обоим условиям, будет только третья исследуемая точка.

Визуализация для контроля вводимых данных. При вводе координат точек профилей с клавиатуры (с чертежа), вероятно возникновение ошибок ввода. Для контроля вводимых координат перед экспортом точки профиля отрисовываются

на экране, что позволяет выявить неверно введённую точку визуально (рис. 5). Для улучшения визуализации первоначально точки соединялись прямыми линиями, что оказалось вполне приемлемым для несильно изогнутых профилей.

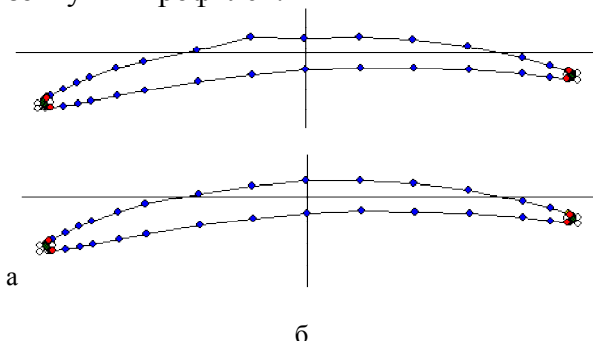


Рис. 5. Отрисовка профиля на экране для контроля правильности вводимых координат:  
а - профиль с ошибкой в Y-координате  $10^4$  точки спинки (введено 0,84 вместо 0,64);  
б - корректный (исправленный) профиль

При дальнейшем тестировании выяснилось, что при отрисовке сильно изогнутых профилей соединение точек прямыми отрезками даёт значительное искажение корректного профиля, особенно в области большой кривизны (рис. 6). Для решения данной проблемы новый вариант программы был снабжён возможностью отрисовывать на экране линии между точками кубическими сплайнами Безье.

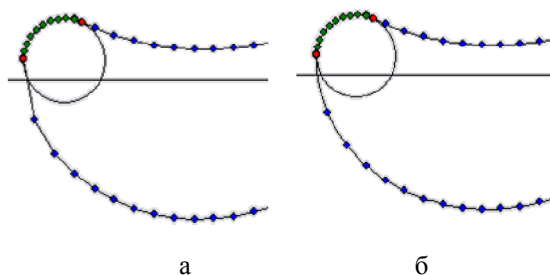


Рис. 6. Варианты соединения точек профиля:  
а - отрезками прямых; б - сплайнами

Поскольку кубическим сплайном Безье можно инвариантно интерполировать только четыре точки профиля, то интерполяция всех точек сечения выполняется следующим образом.

1. На профиле выбираются последовательно четыре точки  $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$  (рис. 7);

2. Выбранные точки интерполируются кубическим сплайном Безье:

$$Q(\bar{u}) = (1-\bar{u})^3 P_0 + 3\bar{u}(1-\bar{u})^2 P_1 + 3\bar{u}^2(1-\bar{u}) P_2 + \bar{u}^3 P_3,$$

где  $\bar{u} \in [0;1]$ , а  $P_0, P_1, P_2, P_3$  - опорные точки, причём  $P_0 \equiv Q_0, P_3 \equiv Q_3$  (рис. 7), а координаты  $P_1$  и  $P_2$  определяются по алгоритму, описанному в [1] на основании базисного представления сплайна  $Q_k = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_k) P_i$ , где

$n=3$  (число точек минус единица),  $p=3$  - порядок сплайна,  $k=0 \dots n$ . При этом определяются такие аргументы базисов  $\bar{u}_k$ , что  $Q(\bar{u}_k) = Q_k$ , т.е. при изменении  $\bar{u}$  от нуля до единицы точка  $Q(\bar{u})$  «движется» по сплайну от точки  $Q_0$  до точки  $Q_3$ , в определённые моменты проходя через точки  $Q_1$  и  $Q_2$ . Существует несколько способов выбора  $\bar{u}_k$ : деление сплайна на равные части ( $\bar{u}_0 = 0, \bar{u}_1 = 1/3, \bar{u}_2 = 2/3, \bar{u}_3 = 1$ ), деление пропорционально расстоянию между интерполируемыми точками ( $\bar{u}_0 = 0, \bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d}, k=1 \dots n, d = \sum_{k=1}^n |Q_k - Q_{k-1}|$ ) или

пропорционально корню расстояния ( $\bar{u}_0 = 0, \bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{\sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|}}{d}, k=1 \dots n, d = \sum_{k=1}^n \sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|}$ ).

Каждый способ формирует сплайны, немного отличающиеся кривизной, поэтому в программе предлагается выбор любого из трёх описанных вариантов интерполяции, а в качестве основного используется второй.

3. Производится вычисление координат точек, находящихся на «внутреннем» отрезке сплайна  $[Q_1, Q_2]$ , по найденной в п. 2 функции сплайна  $Q(\bar{u})$  при  $\bar{u} \in [\bar{u}_1; \bar{u}_2]$ . Количество точек должно быть достаточным для визуализации кривизны сплайна. В [2] предлагается алгоритм растеризации сплайна, в котором сплайн заменяется ломаной с числом звеньев, при котором длина максимального отрезка не превышает размер пикселя экрана. Опытным было установлено, что сплайн профиля качественно отрисовывается уже при десяти точках на отрезке  $[Q_1, Q_2]$ . При выполнении данного пункта для концевых участков профиля дополнительно вычисляются точки на отрезке  $[Q_0, Q_1]$  или  $[Q_2, Q_3]$ .

4. На экране отрисовывается ломаная линия, проходящая через точки, найденные в п. 3.

5. Точки профиля сдвигаются на одну, т.е. выбираются точки  $Q'_0 \equiv Q'_1$ ,  $Q'_1 \equiv Q_2$ ,  $Q'_2 \equiv Q_3$ ,  $Q'_3$  - следующая точка профиля (рис. 7). Выполнение алгоритма продолжается с п.2 для всех четырёхточечных групп профиля до его полной отрисовки.

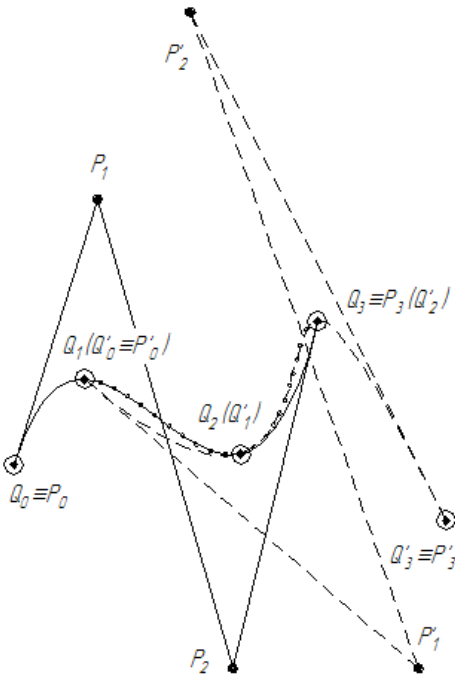


Рис. 7. Интерполяция и растеризация произвольного количества точек кубическим сплайном Безье

Серьёзной проблемой профилирования является появление «волнистости» на профиле вследствие многократного изменения знака выпуклости сплайна. Эта проблема возникает при использовании сплайнов с большим радиусом кривизны (практически прямых) и более актуальна для корытца, поскольку, в отличие от спинки, даже правильный профиль на корытце может иметь до двух точек изменения кривизны вследствие утоньшения профиля к краям (рис. 8, а).

Из-за неправильного профилирования в районах с околонулевой кривизной сплайна могут возникнуть вариации его выпуклости («волны»), вызванные неудачно совпавшим напряжением сплайна соседними точками. Эта проблема является актуальной, поскольку визуально выявить волнистость не представляется возможным, а вызванное ею изменение соотношения площадей канала вызывает существенное изменение потока

(конфузорность заменяется диффузорностью и наоборот). Иногда для контроля волнистости проводят пробные CFD-расчёты с целью выявления нехарактерного поведения потока в местах с изменением выпуклости - резкий местный разгон или торможение потока.

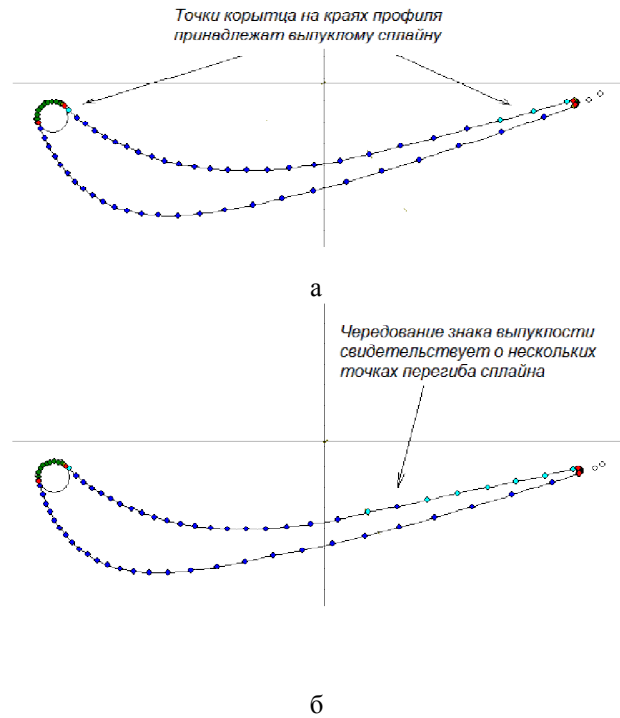


Рис. 8. Многократное изменение кривизны профиля корытца: а - допустимый вариант (до двух точек перегиба); б - недопустимый вариант (больше двух точек перегиба)

В программе Profiler предложен алгоритм критериальной оценки знака выпуклости профиля. В общем случае, когда профиль целиком находится в положительной полуплоскости относительно касательной к любой точке спинки, и спинка и корытце являются выпуклыми вниз (положительная кривизна). В случае, если кривизна того или иного сплайна в окрестности исследуемой точки оказывается отрицательной, при отрисовке профиля данная точка помечается ярко-бирюзовым цветом, сигнализируя о возможной ошибке кривизны. Оператор, визуально анализируя картину распределения знаков кривизны, делает выводы о допустимости такой ситуации (рис. 8, а) или о необходимости корректировки координат точек (рис. 8, б). Кроме того, данный алгоритм позволяет легче оценивать верность введённых данных, поскольку, как правило, даже небольшие

случайные отклонения координат, плохо заметные визуально, вызывают изменение кривизны, которое эффективно оценивается критериально (рис. 9) и привлекает внимание оператора к «проблемной» области.

Критериальная оценка кривизны проводится по следующему алгоритму:

1. Исследование кривизны и визуализации точек производится для каждой точки сначала спинки, а затем корытца.

2. Рядом с исследуемой точкой  $Q_i$  выбираются ещё три точки профиля, причём таким образом, чтобы она по возможности оказалась на втором отрезке интерполирующего сплайна:

$$Q(\bar{u}) = (1-\bar{u})^3 P_0 + 3\bar{u}(1-\bar{u})^2 P_1 + 3\bar{u}^2(1-\bar{u}) P_2 + \bar{u}^3 P_3$$

, проведённого по выбранным точкам. Если точка находится в середине профиля, она принимается за  $Q_1$ , две следующие за ней точки - за  $Q_2$  и  $Q_3$ , а предыдущая - за  $Q_0$ . Если же исследуется конечная точка профиля, то за неимением точек до или после неё, она может быть крайней точкой сплайна. При определении параметров интерполирующего сплайна также вычисляется относительное расстояние по сплайну исследуемой точки  $\bar{u}_i$ , при котором  $Q(\bar{u}_i) = Q_i$ .

3. При первом проходе алгоритма определяется знак  $k$  полуплоскости, в которой профиль лежит целиком относительно прямой  $Ax+By+C=0$ , касательной к спинке (рис. 10). Её нормальный вектор  $(A; B)$  определяется как перпендикуляр к сплайну через параметрические производные:  $Q'_u = -3(1-\bar{u})^2 P_0 + 3(1-3\bar{u})(1-\bar{u}) P_1 + 3\bar{u}(2-3\bar{u}) P_2 + 3\bar{u}^2 P_3$ ;  $A = -Y'_u(\bar{u}_i)$ ,  $B = X'_u(\bar{u}_i)$ , а  $C = -(A \cdot x_i + B \cdot y_i)$ . Знак полуплоскости, в которой оказался профиль, оценивается по центру входной кромки  $(x_R; y_R)$ :  $k = \text{sign}(Ax_R + By_R + C)$ .

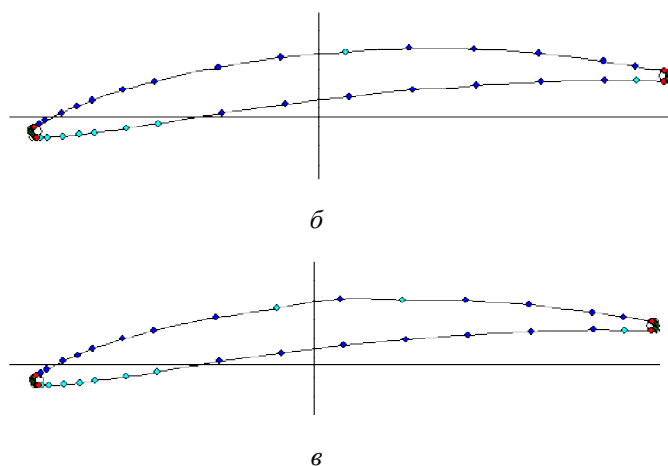
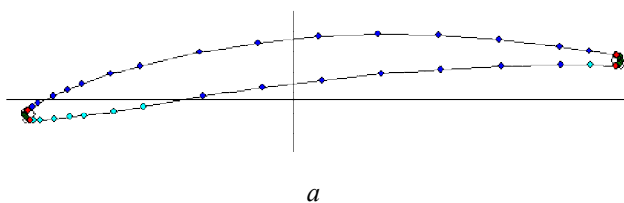


Рис. 9. Использование контроля знака выпуклости для упрощения выявления ошибок ввода координат профиля: а - верно введенный профиль; б - Y-координата 11<sup>й</sup> точки спинки на 3% меньше; в - Y-координата 11<sup>й</sup> точки спинки на 5% больше

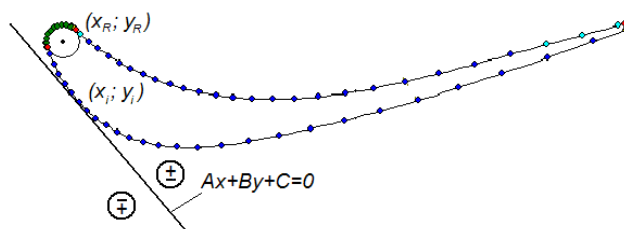


Рис. 10. Определение знака полуплоскости профиля

4. В исследуемой точке определяется знак  $z$  кривизны профиля. Для параметрически заданных функций, направленных положительно по оси X, ( $x$  возрастает при возрастающем  $\bar{u}$ ), выпуклость вниз имеет положительный знак производной второго порядка. Для противоположно направленных функций - отрицательный. Знак кривизны  $z$  определяется положительно в случае совпадения знаков производной второго порядка  $y''_{xx}$  сплайна как функции, заданной параметрически, и направления сплайна по оси X ( $x'_u$ ):  $z = \text{sign}(y''_{xx} \cdot x'_u) =$

$$= \text{sign} \left( \frac{y''_{uu} \cdot x'_u - x''_{uu} \cdot y'_u}{(x'_u)^3} \cdot x'_u \right) = \text{sign}(y''_{uu} \cdot x'_u - x''_{uu} \cdot y'_u),$$

где  $x''_{uu}$  и  $y''_{uu}$  определяются как  $Q''_{uu} = 6(1-\bar{u})P_0 + 6(3\bar{u}-2)P_1 + 6(1-3\bar{u})P_2 + 6\bar{u}P_3$ .

5. Сравниваются знаки  $z$  и  $k$ . Совпадение знаков свидетельствует о том,

что сплайн имеет выпуклость вниз при расположении профиля сверху прямой, касательной к спинке (рис. 8). В этом случае кривизна считается правильной и точка отрисовывается обычным цветом. В противном случае кривизна считается неверной и точка отрисовывается ярким маркирующим цветом.

б. Алгоритм повторяется поочерёдно для каждой точки спинки и корытца, при этом п. 3 всегда пропускается, поскольку определение расположения профиля относительно прямой  $Ax+Bx+C=0$  одинаково для всех точек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании

Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

#### Библиографический список

1. Дмитриева, И.Б. Автоматизация создания объёмной модели пера лопатки в ANSYS TurboGrid на базе традиционного представления его геометрии [Текст] / И.Б. Дмитриева, Л.С. Шаблий // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – Самара, 2011. – №3 (27). Часть 3. – С. 106-111

2. Параметрические кривые и их растеризация [Электронный ресурс]: [http://www.intuit.ru/department/graphics/rastrgraph/4/rastrgraph\\_4.html](http://www.intuit.ru/department/graphics/rastrgraph/4/rastrgraph_4.html).

## AUTOMATIZATION OF CREATION VANE MODELS FOR CAE WITH PROFILER

© 2012 L. S. Shabliy, I. B. Dmitrieva, G. M. Popov

Samara State Aerospace University  
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

Methodology of automotive creation of vane 3D-model for gas-dynamic analysis in NUMECA is seeing. Ways of solving different problems during this process is suggested.

*Blade, 3D-model, finite-element model, cubic spline.*

### Информация об авторах

**Шаблий Леонид Сергеевич**, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, CAE-расчёты.

**Дмитриева Ирина Борисовна**, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tdla@ssau.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, САПР, CASE-технологии.

**Попов Григорий Михайлович**, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: grishatty@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы в лопаточных машинах, вычислительная газовая динамика, рабочие процессы ВРД.

**Shabliy Leonid Sergeevich**, Instructor of aircraft engines theory department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Science interests: blade machines, CAE.

**Dmitrieva Irina Borisovna**, Associate professor of aircraft engines theory department SSAU. E-mail: tdla@ssau.ru. Science interests: blade machines, CAx, CASE.

**Popov Grigory Mikhailovich.**, engineer, Samara State Aerospace University, E-mail: