

## **РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ 3D МОДЕЛИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА**

© 2011 К. В. Бояров, А. И. Рязанов, Л. А. Чемпинский

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

Разработана параметрическая 3D модель рабочей лопатки компрессора. Параметризованы конструктивные элементы, входящие в модель: перо лопатки, комплексный представитель хвостовика типа «ласточкин хвост».

*Параметрическая модель, комплексный представитель, рабочая лопатка, хвостовик, программный пакет NX, языка программирования UG/Open GRIP.*

Роль 3D моделирования в современном производстве сложно переоценить. Объемная модель детали является отправной точкой для создания технологического процесса, конструкторско-технологической документации, проведения инженерного анализа. Значительная часть деталей в двигателестроении являются типовыми и стандартизованными. Моделирование таких изделий, принадлежащих к одному типу – это повторение одних и тех же операций в одинаковой последовательности. Изменяются размеры детали, добавляются или исключаются отдельные конструктивные элементы. Процесс создания 3D моделей типовых деталей легко алгоритмизируется и может быть автоматизирован с помощью использования параметрических моделей. Параметрическая модель – это математическая модель объекта (например, детали) с геометрическими параметрами, при изменении которых происходит изменение конфигурации объекта. Такая модель содержит в себе семейство однотипных, но отличных друг от друга изделий.

В авиадвигателестроении широко распространены газотурбинные двигатели (ГТД). Одними из наиболее ответственных деталей в них являются статорные и роторные лопатки компрессоров и турбин (рис. 1). Последовательность операций при их моделировании жестко регламентирована. Соз-

дание 3D моделей лопаток можно разделить на 3 этапа:

- 1) моделирование пера лопатки;
- 2) моделирование хвостовика лопатки;
- 3) объединение пера с хвостовиком и завершающие операции.

В программном пакете NX создана параметрическая модель рабочей лопатки компрессора. Используются возможности встроенного в среду NX языка интерактивного графического программирования UG/Open GRIP (Graphics Interactive Programming). Построение параметрической модели повторяет этапы создания 3D модели.

### **Разработка параметрической модели пера лопатки**

Методика проектирования профиля лопатки предполагает использование либо результатов газодинамического расчета, либо данных с заводского чертежа лопатки. Во всех случаях берутся следующие данные: количество сечений, количество точек в сечениях, координаты точек спинки и корытца в сечениях, угол поворота сечений, высоты расположения сечений, длины хорд. На рис. 2 представлен профиль типичной лопатки компрессора с параметрами, определяющими его геометрию.

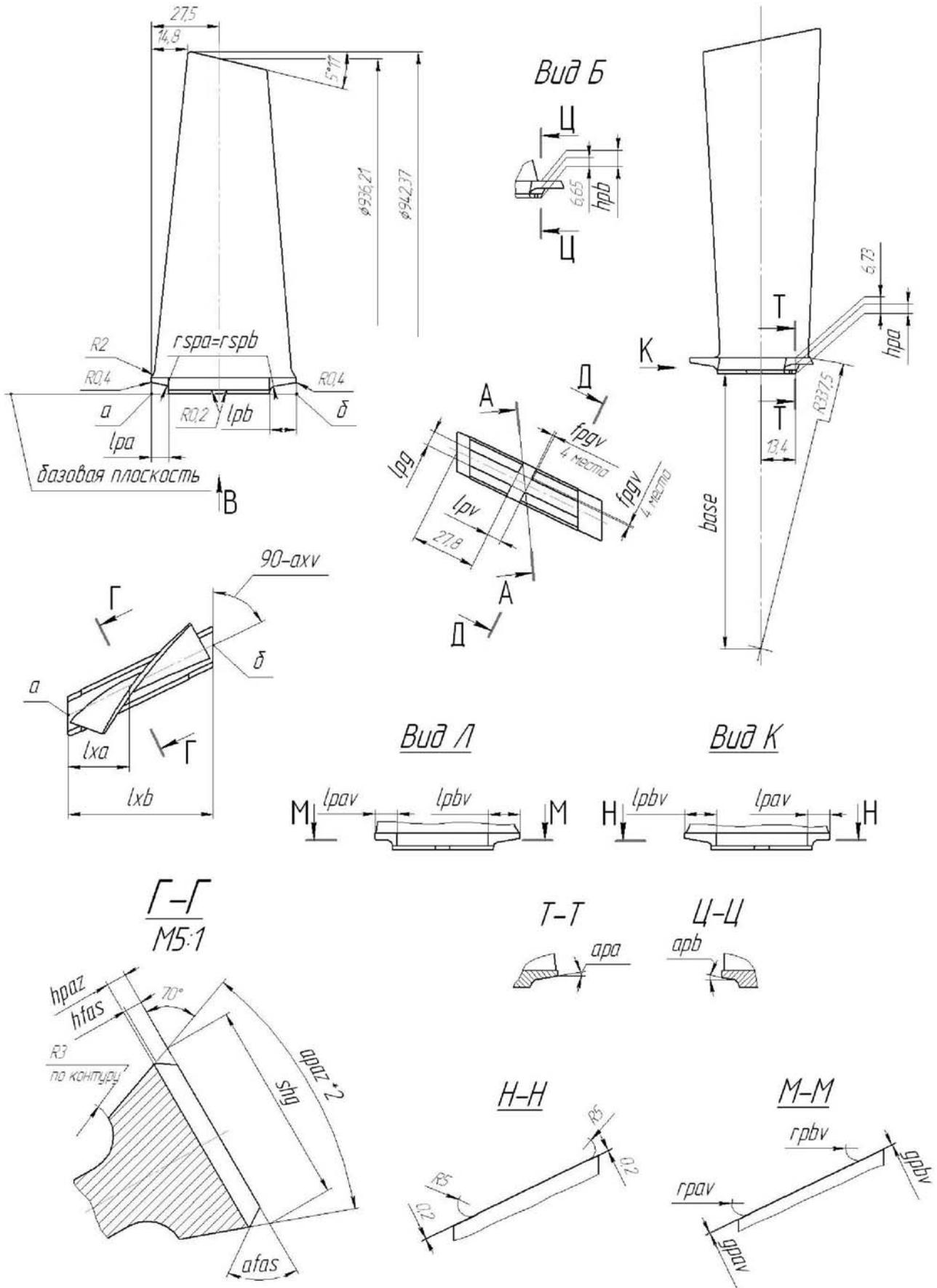


Рис. 1. Рабочая лопатка компрессора

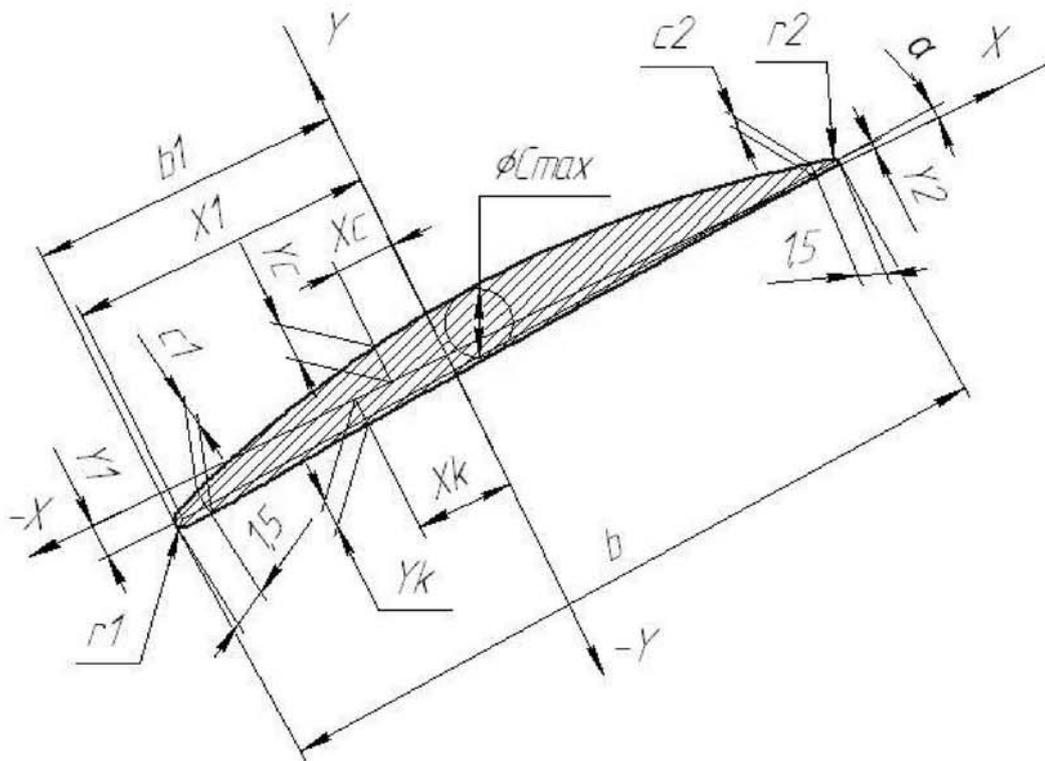


Рис. 2. Профиль пера

Составленная программа автоматического построения пера считывает информацию о профилях из текстовых файлов. Создаются базовая плоскость и плоскости

сечений пера, уже развернутые на угол поворота. В каждой плоскости создаются точки профиля (рис. 3,а). Строятся сплайны спинки и корытца для каждого сечения.

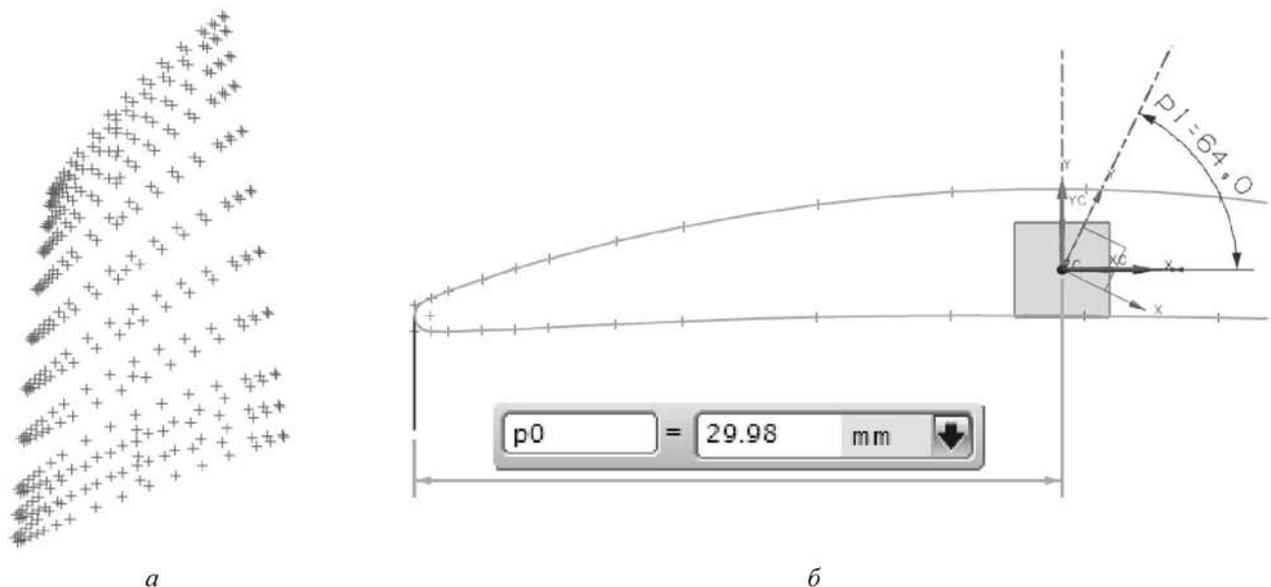


Рис. 3. Построение точек профилей пера (а) и входной кромки (б)

Для отыскания положения входной кромки (рис. 3,б) переходим в плоскость одного из сечений, повернутую на угол установки пера. В приведенном на рис. 3,б при-

мере 64 градуса. Проводим вертикаль с координатой  $x$ , равной длине хорды  $b_1$ . На рис.3,б  $b_1 = -29.98$  мм. Строим окружность входной кромки, касательную к вертикали,

сплайнам спинки и корытца. Сплайны отрезаются по точкам касания с дугами кромок.

Положение выходной кромки определяется таким же методом. Однако в отличие от хорды  $b_1$  угловое положение хорды  $b$  не известно (рис. 2). Значит неизвестно положение вертикали, ограничивающей выходную кромку. Координата  $x$  для вертикали подбирается итеративно. Начальное значение принимается заведомо большее. Проводятся построения, аналогичные построению входной кромки. Полученная длина хорды сравнивается с заданной на чертеже  $b$ . Она окажется больше  $b$ . Проводим вертикаль

ближе к искомой и снова сравниваем. Операция повторяется, пока полученная хорда не окажется меньше  $b$  (рис. 4,а). Возвращаемся на одну итерацию назад и уменьшаем шаг итерации в 10 раз. Снова повторяем цикл, пока не достигнем достаточной точности совпадения построенной хорды с заданной на чертеже.

Построив, таким образом, все сечения пера, приступаем к созданию объема. Создаем шесть поверхностей, ограничивающих объем пера. Сшиваем поверхности в единый объем пера лопатки, приведенный на рис. 4,б.

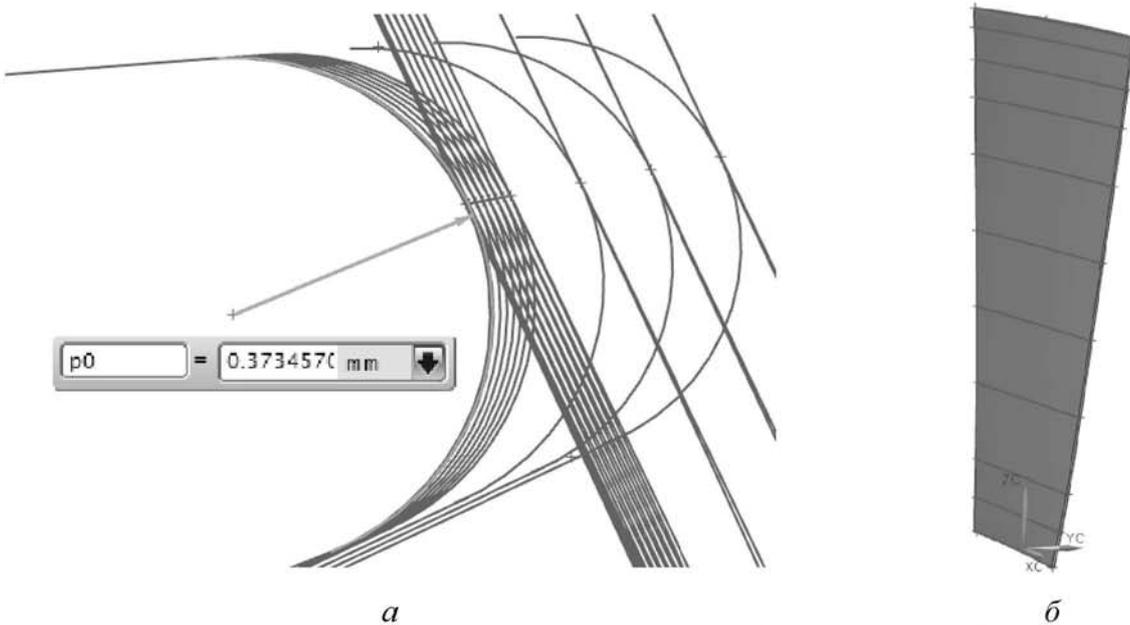


Рис. 4. Построение выходной кромки (а) и перо лопатки (б)

### Разработка параметрической модели хвостовика лопатки типа «ласточкин хвост»

В качестве параметризуемой модели хвостовика типа «ласточкин хвост» создадим комплексную модель, включающую геометрию практически всех возможных пазов для своего типа. Такой хвостовик может быть назван комплексным представителем. Более простые хвостовики будем получать, исключая те или иные конструктивные элементы при построении. Всем размерам, определяющим положение и геометрию хвостовика, присвоены программные переменные (рис. 1).

Переменные профиля и положения хвостовика:

base – положение базовой плоскости по  $oz$   
shg – ширина габаритная без фасок

hfas – высота фаски  
afas – угол фаски к  $oy$   
apaz – угол стенки паза к  $oz$   
axv – угол установки лопатки  
hxv – высота заготовки хвостовика  
lxv – длина заготовки хвостовика  
lxa – расстояние до точки А  
lxb – расстояние от А до Б

Переменные горизонтального паза возле точки А:

lpa – ширина паза возле точки а  
hpa – высота паза  
apa – угол паза  
gsra – скругление паза

Переменные горизонтального паза возле точки Б:

lpb – ширина паза возле точки Б  
hpb – высота паза

apb – угол паза

gspb – скругление паза

Переменные продольного и поперечного пазов в основании хвостовика:

lpg – ширина длинного паза у основания

lrv – ширина короткого паза у основания

hpgv – высота паза

frgv – фаска

Переменные вертикального паза возле точки А:

lрав – длина вертикального паза около А

gрав – глубина паза около точки А

рав – скругление паза около точки А

Переменные вертикального паза возле точки Б:

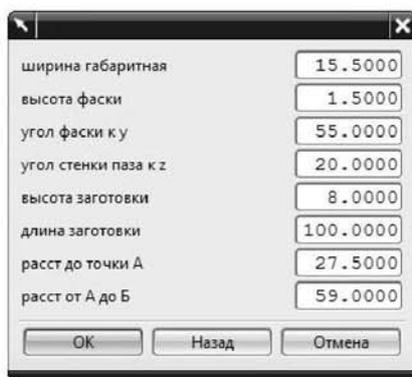
lрbv – длина вертикального паза около Б

gрbv – глубина паза около точки Б

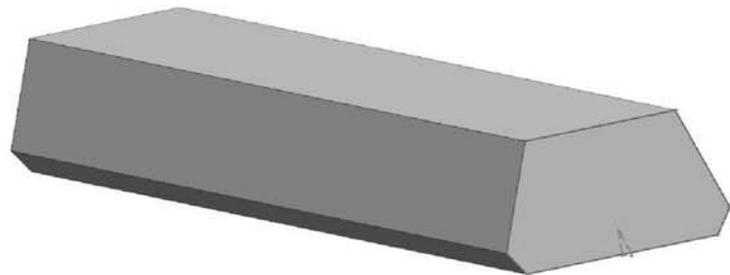
рbv – скругление паза около точки Б

Рассмотрим процесс моделирования комплексного представителя. Программа считывает значение положения базовой плоскости и угла поворота пера из файлов исходных данных. Пользователю NX выводится окно, приведенное на рис. 4,а, для

ввода значений размеров, определяющих геометрию профиля хвостовика. По умолчанию в поля этого и последующих меню уже введены тестовые значения переменных. После нажатия «ОК» выполняется построение эскиза, из которого впоследствии вытягивается объем заготовки. Для этого создается новая локальная система координат. Затем начало системы координат поднимается на высоту базовой плоскости и она ориентируется параллельно оси заготовки. Далее в сориентированной системе координат строятся узловые точки в соответствии с введенными ранее пользователем размерами и соединяются линиями. Так получается половина эскиза заготовки. Полученные линии копируются зеркальным отражением относительно плоскости XZ локальной системы координат. Далее полученный контур вытягивается вдоль оси OX локальной системы координат. Результат операции вытягивания, а также исходный контур показан на рис. 4,б.



а



б

Рис. 5. Создание заготовки хвостовика:

а) окно ввода параметров профиля, б) исходный профиль и полученный объем

Далее строим плоскости ограничивающие хвостовик в длину и отсекаем по ним лишний материал. Хвостовик на виде сверху приобретает форму параллелограмма. На рис. 6,а показана заготовка с отсеченными, но не удаленными объемами. Центральный элемент останется после удаления объемов.

Выводим на экран диалоговое окно, в котором пользователю предлагается выбрать пазы для построения. Параметрическая модель предусматривает 6 видов пазов. Выбор возможен в любых комбинациях. Таких комбинаций может быть  $2^6 = 64$ , однако практический смысл имеют не все из них. Интерфейс окна с примером выбора пазов показан на рис. 6,б.

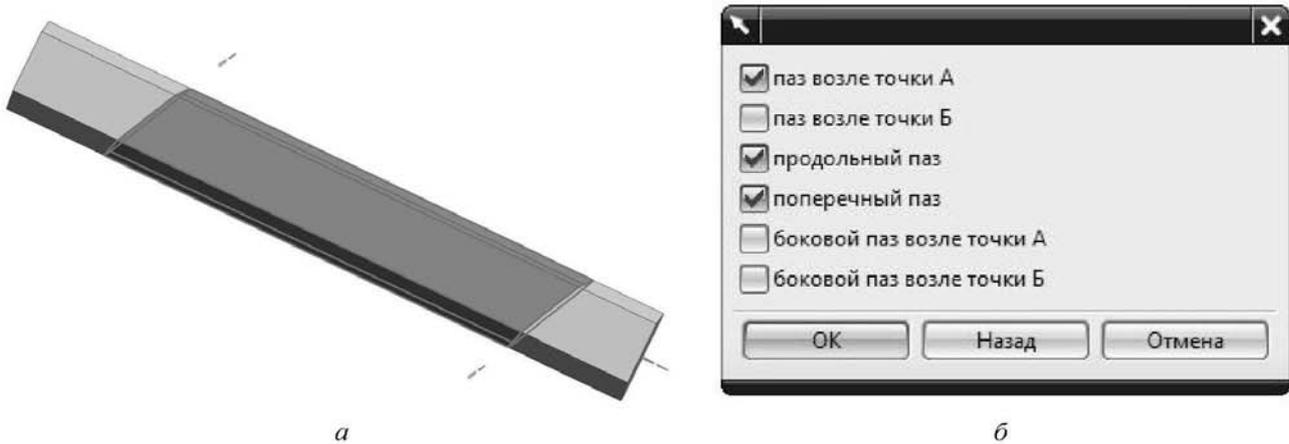


Рис. 6. Рассеченная заготовка хвостовика (а) и диалоговое окно выбора параметров паза (б)

После определения того, какие пазы необходимо построить, последовательно появляются меню размеров каждого из выбранных элементов. Если не выбран ни один паз, то построение хвостовика закончится и программа завершит работу.

Диалоговые окна для каждого из пазов и результаты построений приведены на рис. 7. Точки А и Б – принятые обозначения на заводских чертежах лопаток.

Параметры горизонтального паза возле точки А можно задать в окне, приведенном на рис. 7,а. После нажатия кнопки «ОК» запускается процесс построения паза. Создается локальная координатная система, в которой строится эскиз паза. Затем контур вытягивается вдоль оси  $u$  локальной координатной системы эскиза. В результате получаем объем, который соответствует будущему пазу. Длина вспомогательного объема выбрана заведомо больше ширины хвостовика. С помощью булевой операции вспомогательный объем вычитается из заготовки хвостовика. Результат операции показан на рис. 7,б. Аналогично выполняется горизонтальный паз с противоположной стороны хвостовика – возле точки Б.

Продольный и поперечный пазы в основании хвостовика могут присутствовать в лопатке как совместно, так и по отдельности. Рассмотрим случай, когда нужно построить оба пазы. Диалоговое окно, в котором пользователь может задать размеры пазов, представлено на рис. 7,в. После нажатия

кнопки «ОК» создается локальная система координат, в которой строятся ключевые точки эскиза. Затем по данным точкам создается контур паза. Контур вытягивается внутрь детали на глубину, указанную пользователем (глубина паза). Полученный объем вычитаем из заготовки соответствующей булевой операцией. Результат операции представлен на рис. 7,г. В случае, если требуется только один из пазов, то строится контур только для этого паза.

Рассмотрим вертикальные пазы возле точки А. Создается локальная координатная система и ориентируется так, чтобы ее ось  $OZ$  совпала с одной из граней заготовки. После поворота системы координат на экран выводится диалоговое окно, в котором пользователь может ввести параметры паза либо оставить тестовые значения по умолчанию. Интерфейс окна представлен на рис. 7,е. Затем в локальной системе координат строится контур одного из пазов. После этого координатная система перемещается на другую сторону заготовки и поворачивается для построения контура второго, симметричного первому паза. Один из контуров представлен на рис. 7,д. Вытягиваем контур вдоль оси  $z$  локальной координатной системы и полученный объем вычитаем из объема заготовки. Та же операция повторяется со вторым контуром. Построение пазов возле точки Б полностью аналогично. Для пользователя также выводится диалоговое окно.

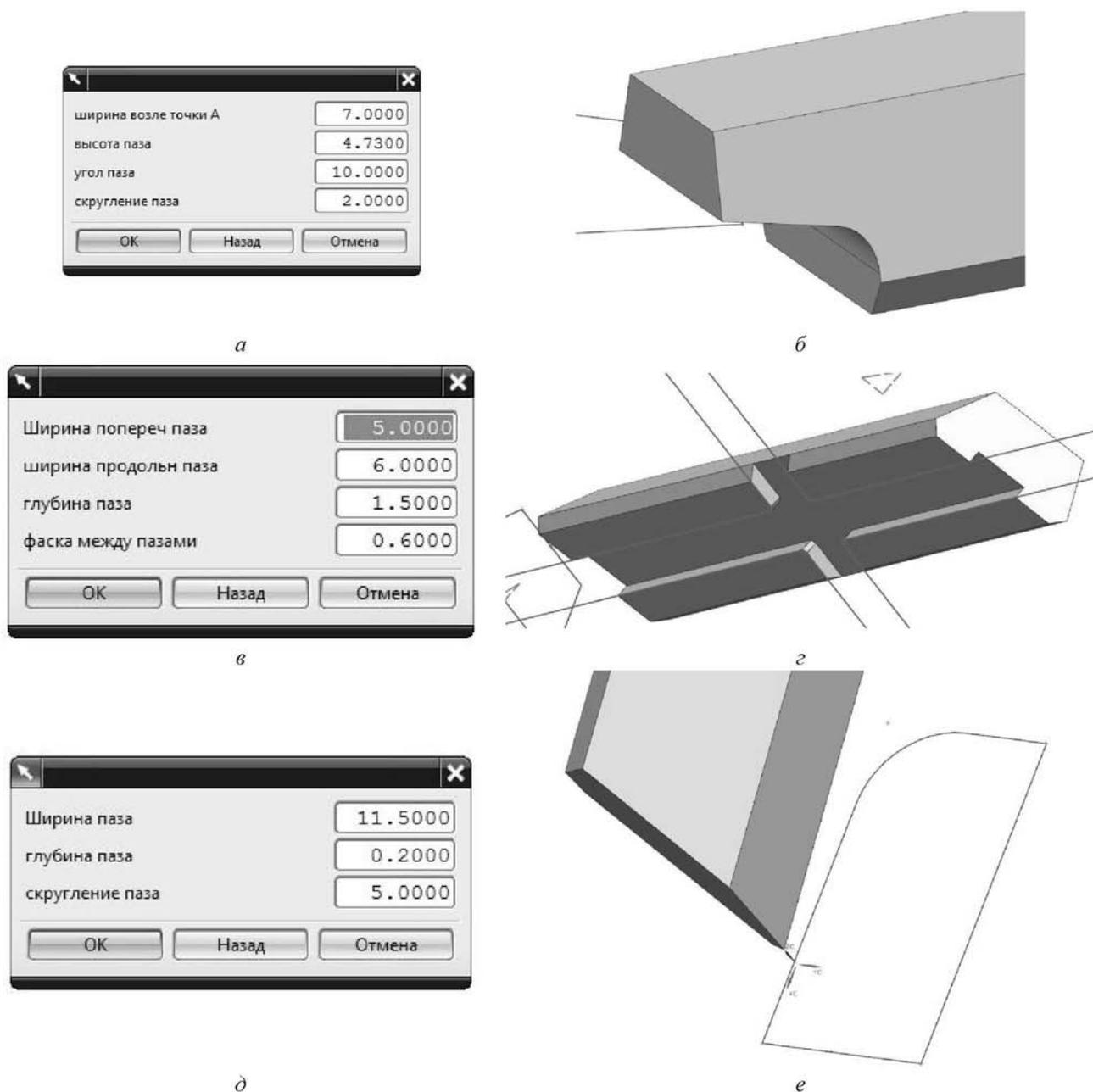


Рис. 7. Моделирование пазов: а) параметры горизонтального паза возле точки А, б) горизонтальный паз возле точки А, в) диалоговое окно с параметрами продольного и поперечного пазов, г) построенные продольный и поперечный пазы, д) диалоговое окно с параметрами вертикального паза, е) ориентация контура и заготовки для создания вертикального паза

После построения последнего указанного пользователем паза программа завершает свою работу. В результате в среде NX создается готовая 3D модель хвостовика лопатки компрессора. Полученная модель со всеми построенными пазами представлена на рис. 8,а.

### Завершающие операции

Переходим к заключительному этапу автоматизированного построения рабочей лопатки компрессора. После последователь-

ного выполнения GRIP программ - построения пера и хвостовика лопатки - в среде NX созданы два объема.

Верхняя плоскость созданного хвостовика выступает в трактовую часть. Выполним усечение объема хвостовика в области тракта. Строится горизонтальная линия, ограничивающая трактовую область по оси z. Объем хвостовика оказывается внутри нового объема, кроме части, которую нужно отсечь. Операцией «вращение» получаем из нее объем и находим булево пересечение

построенного вспомогательного объема и хвостовика.

Аналогичным образом отсекается верхняя область пера лопатки. Профилем для вспомогательного объема в этом случае служит прямая и дуги, формирующие радиусы скругления в углах пера. Прямая контура может располагаться под наклоном к оси  $x$ . Все размеры для построения вспомогательных объемов GRIP приложение счи-

тывает из файла данных. После усечения тел пера и хвостовика лопатки эти элементы можно объединить булевой операцией в единый объем лопатки компрессора представленный на рис. 8,б.

Создана пользовательская панель «Лопатки ГТД» для интерфейса NX, упрощающая запуск разработанных GRIP приложений. Панель включает три кнопки, которые проиллюстрированы на рис. 8,в.

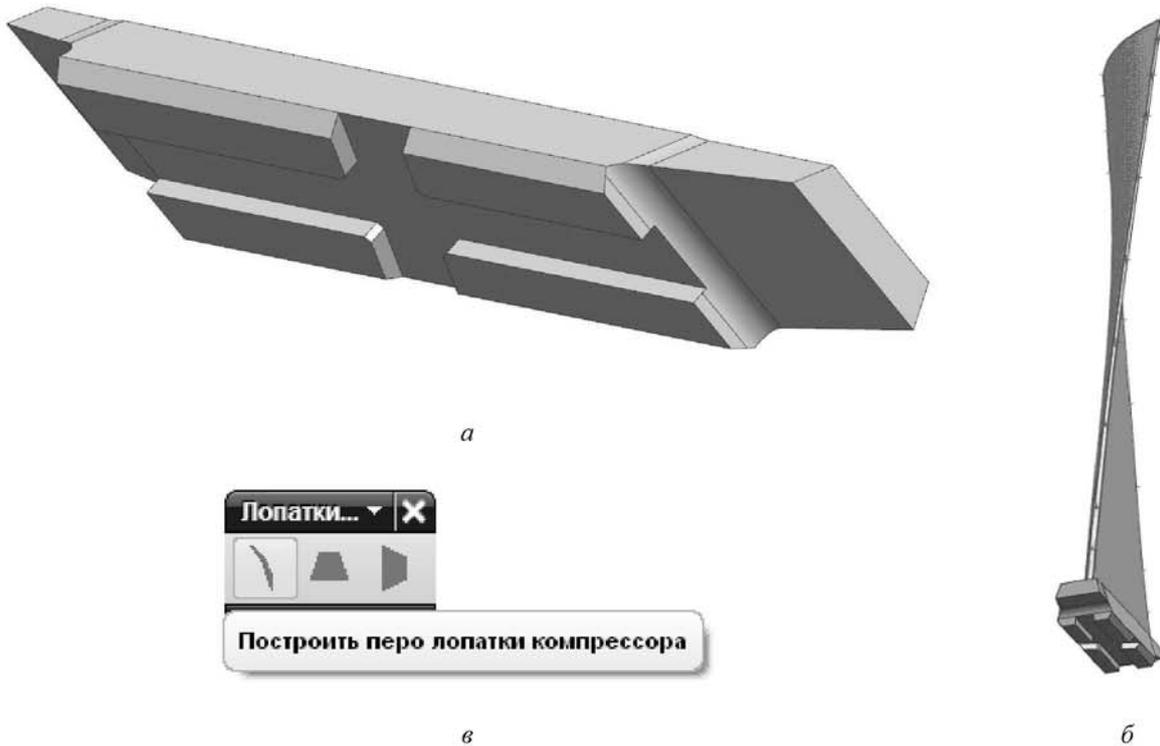


Рис. 8.– Параметрические 3D модели: а) хвостовика типа ласточкин хвост с пазами, б) рабочей лопатки пера компрессора и встраиваемая панель «Лопатки ГТД» (в)

После нажатия первой кнопки осуществляется выполнение программы, моделирующей перо лопатки. Вторая отвечает за построение хвостовика лопатки. При нажатии третьей кнопки выполняется моделирование сразу всей лопатки компрессора.

Параметризованными являются следующие характеристики пера и хвостовика: количество сечений, количество точек в сечениях, координаты точек спинки и корытца, высоты расположения и угол поворота сечений, длины хорд, геометрия профиля хвостовика, размеры и наличие пазов в нем. Созданная параметрическая 3D модель лопатки охватывает значительную часть существующих на сегодняшний день рабочих

лопаток компрессоров и многократно сокращает время на построение моделей таких деталей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

#### Библиографический список

1. Краснов, М.В. UNIGRAPHICS для профессионалов [Текст] / М. Краснов, Ю.В. Чигишев - М.: ЛОРИ, 2004. - 320 с:
2. NX для конструктора-машиностроителя [Текст] / П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков [и др.] - М.: ДМК Пресс, 2010. - 504 с.

### **3D-MODEL OF COMPRESSOR ROTOR BLADE DEVELOPMENT**

© 2011 K. V. Boyarov, A. I. Ryazanov, L. A. Chempinsky

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

3D-model of compressor rotor blade is developed. Structural elements of the model: comprehensive representative of dovetail shank type and blade airfoil are parametrized.

*Parametric model, comprehensive representative, rotor blade, dovetail shank, NX program package, UG/Open GRIP programming language.*

#### **Информация об авторах**

**Бояров Константин Владиславович**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [konst90@gmail.com](mailto:konst90@gmail.com). Область научных интересов: параметризация 3D моделей деталей ГТД.

**Рязанов Александр Ильич**, ассистент Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [tr05@bk.ru](mailto:tr05@bk.ru). Область научных интересов: параметризация 3D моделей деталей ГТД.

**Чемпинский Леонид Андреевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Производство двигателей летательных аппаратов», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [chempinskiy@mail.ru](mailto:chempinskiy@mail.ru). Область научных интересов: использование CAD/CAM/CAPP систем при подготовке специалистов для инновационного машиностроения.

**Boyarov Konstantin Vladislavovich**, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [konst90@gmail.com](mailto:konst90@gmail.com). Area of research: parametrization of 3D-models of GTE elements.

**Ryazanov Alexandr Ilyich**, junior member of teaching staff, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [tr05@bk.ru](mailto:tr05@bk.ru). Area of research: parametrization of 3D-models of GTE elements.

**Chempinsky Leonid Andreevich**, candidate of technical sciences, professor of «Aircraft engines manufacturing» department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [chempinskiy@mail.ru](mailto:chempinskiy@mail.ru). Area of research: use CAD/CAM/CAPP of systems by preparation of experts for innovative mechanical engineering.