

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ

© 2013 Л.С. Шаблий, Д.А. Колмакова, А.В. Кривцов

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

Показана важность параметрического моделирования при оптимизационных исследованиях турбомашин. Описаны различные подходы к параметрическому моделированию лопаточных венцов. Подробно указаны преимущества и недостатки каждого из подходов.

Ключевые слова: оптимизация, параметризация, профиль, средняя линия, турбомашин, сплайн, лопатка.

В настоящее время при расчётной доводке лопаточных машин широко используется вариантное проектирование – многократная оценка расчётных характеристик устройства с различными параметрами с целью отыскания такого сочетания варьируемых параметров, которое обеспечивает наилучшие рабочие характеристики [1]: мощность, КПД, устойчивость и т.д. Применение такого подхода позволяет найти новые работоспособные варианты конструкций даже давно известных двигателей [2]. При этом расчётная оценка влияния геометрических параметров лопаточных машин на эффективность оценивается по различным моделям. Это могут быть модели разной степени точности: от полуэмпирических моделей одномерного течения рабочего тела, до моделей нестационарного трёхмерного потока [3].

Поскольку при оптимизационных исследованиях лопаточных машин более предпочтительными являются полные трёхмерные CFD-модели [4], число оптимизируемых параметров может достигать нескольких десятков. Решение таких задач выполняется с использованием оптимизационных программ, например IOSO [5]. Процесс оптимизации (рис. 1) выполняется в автоматическом режиме на основе многократного решения прямой задачи – определения критериев, характеризующих эффективность работы турбомашин при конкретном наборе значений оптимизируемых параметров с использованием принятой модели рабочего процесса.

Цикл решения прямой CFD-задачи состоит из трёх этапов: создания геометрии проточной

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: afroaero@hotmail.ru

Колмакова Дарья Алексеевна, аспирант.

E-mail: kolmakova.daria@gmail.com

Кривцов Александр Васильевич, аспирант.

E-mail: a2000009@rambler.ru

части по текущему набору параметров, создания по данной геометрии расчётной сетки и решения задачи на данной сетке с получением нового значения критерия. В данной статье особое внимание будет уделено первому этапу формирования геометрических моделей, из которых объективно наиболее качественными являются трёхмерные [6].

К формированию трёхмерных моделей компрессоров существует несколько подходов. Первый подход (традиционный) основан на исполь-

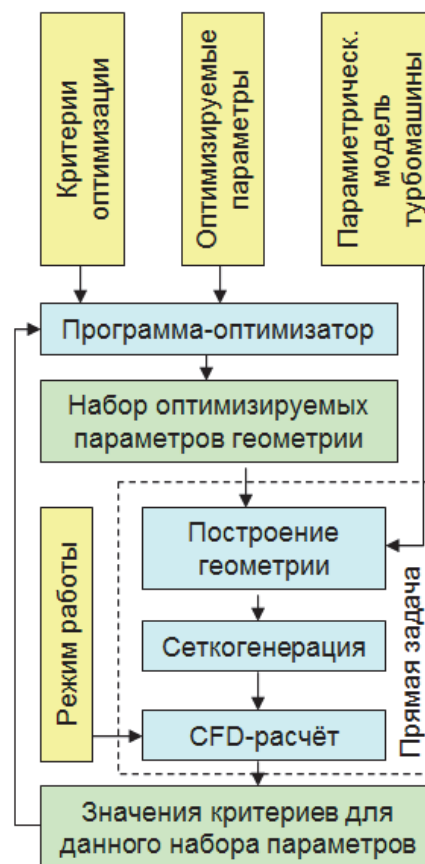


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимизации решением прямых задач

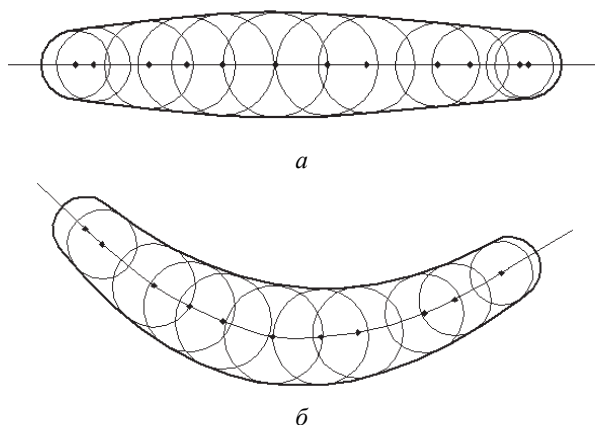


Рис. 2. Традиционный подход к формированию пера лопатки:

а – симметричный профиль,

б – профиль, изогнутый по заданной средней линии в отношении симметричных профилей, заданных в безразмерном виде (рис. 2). Эти профили «натягиваются» на среднюю линию [7].

Изменение профиля осуществляется изменением параметров кривой. При этом одновременно или по отдельности могут изменяться лопаточные углы на входе/выходе, угол изгиба средней линии, длина кривой (хорда). В соответствии с новыми параметрами средней линии масштабируется симметричный профиль и формируется новый профиль лопатки, заданный точками. Далее, соединяя точки сплайнами, получают сечение профиля лопатки на заданной высоте. Формируя набор сечений на разных высотах, описывают форму лопатки с необходимой точностью. Как правило, используется 10-15 сечений. Для формирования геометрии пера лопатки эти сечения соединяют сплайнами в радиальном направлении. Вычитанием пера лопатки из геометрии сектора тракта компрессора формируется геометрическая модель проточной части.

Несомненным плюсом традиционного подхода является его последовательность, определяющая простоту алгоритмизации. Недостатком же является дискретность описания профиля, вызывающая вариативность формы (параметры аппроксимирующих сплайнов, как правило, не указываются на чертежах), а также отсутствие гибкости: форма лопатки определяется конечным набором симметричных профилей, при этом возможно плавное изменение только изгиба профиля, в то время как изменение отдельно формы спинки или корытца невозможно. Параметризация традиционного подхода осуществляется двумя путями. Первый – это использование программ-профилировщиков, которые по заранее заданным симметричным профилям формируют изогнутые профили с заданными параметрами средней линии (рис. 3). Полученные резуль-

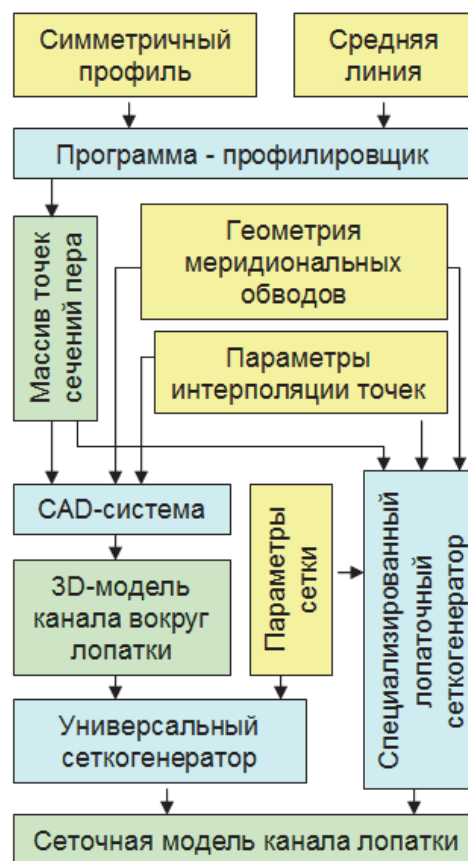


Рис. 3. Схема традиционного подхода к формированию модели проточной части путём параметризации через программу-профилировщик

таты в виде упорядоченного массива точек записываются в традиционном виде (точка - её координаты). Затем происходит загрузка точек в систему трёхмерного моделирования, соединение их сплайнами: сначала в сечения, а затем линии сечений в поверхность пера, а затем формирование модели потока вокруг лопатки вычитанием геометрии пера из сектора проточной части компрессора. Автоматизация работы во многих системах трёхмерного моделирования в принципе возможна, но её возможности зачастую сильно ограничены. Кроме того, существуют специализированные системы генерации сеток для турбомашин, которые позволяют формировать сетку непосредственно по точкам сечений. Это позволяет избежать промежуточных этапов построения геометрической модели и упростить автоматизацию создания моделей [8], сокращением числа задействованных программных продуктов (см. рис. 3).

Таким образом, в случае изменения входных параметров после автоматического прохода по изложенному алгоритму будет сформирована модель лопаточного венца с заданными параметрами. Второй путь построения моделей с использованием традиционного подхода - это непосредственное использование параметрических моделей в системе трёхмерного моделирования. При

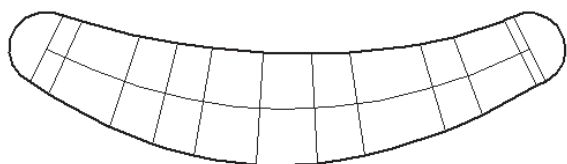


Рис. 4. «Рыбий скелет»

этом в САD-системе формируется геометрическая модель пера, состоящего из сечений, каждое из которых формируется сплайном, натянутым на вершины перпендикуляров, опущенных к средней линии (рис. 4). Средняя линия выполняется в виде сплайна, заданного по точкам (три точки для квадратичного и четыре для кубического) или геометрическими параметрами. Например, квадратичный сплайн задаётся двумя точками (центры входной и выходной кромок) и двумя лопаточными углами (входным и выходным), определяющими касательную к сплайну в каждой точке. Высота перпендикуляров, определяющих удалённость от средней линии той или иной точки спинки или корытца, задаётся на основании выбранного симметричного профиля в параметрической зависимости от хорды. Таким образом, при изменении параметров, задающих положение средней линии (координаты точек, углы входа/выхода), происходит автоматическое перестроение параметрической модели в соответствии с деревом её построения. Сначала изменяется форма средней линии, затем новое положение принимают перпендикуляры и в соответствии с новым значением хорды изменяется их длина. Связанные с вершинами перпендикуляров сплайны принимают новое положение и формируют поверхность пера лопатки с новыми параметрами. При этом в законченной параметрической 3D-модели отсутствует вариативность формы пера, присущая предыдущему способу, поскольку параметры интерполирующих сплайнов зафиксированы в дереве построения модели и не меняются при перестроении. Ещё одним достоинством такого подхода является отсутствие необходимости импорта точек извне, поскольку всё построение происходит внутри одного программного продукта, что упрощает задачу автоматизации. Между тем, при дальнейшем применении сеткогенераторов, использующих в качестве входных данных точечный формат задания сечений лопаточного венца (рис. 5), может потребоваться дополнительный этап экспорта 3D-модели в облако точек, представляющее набор сечений пера. Он выполняется либо непосредственно в системе 3D-моделирования, в модуле импорта сеткогенератора, или же в стороннем модуле экспорт-импорта. Следует также помнить, что при импорте геометрии из точечно-

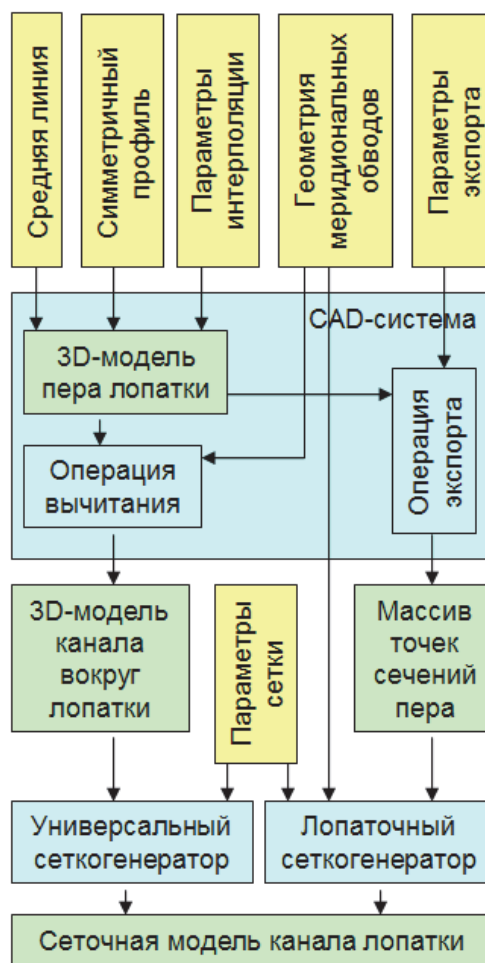


Рис. 5. Схема традиционного подхода к формированию модели проточной части путём параметризации модели внутри единой САD-системы

го формата снова возникает проблема вариативности формы пера из-за возможного несоответствия параметров сплайнов сеткогенератора параметрам сплайнов, по которым была выполнена 3D-модель. Ошибку различия сплайнов можно снизить, применяя большее количество сечений.

Второй подход к формированию лопаточных венцов основан на представлении сечений пера в виде наборов геометрических примитивов (отрезки прямых, дуги) с наложенными ограничениями: геометрическими (совпадение концов отрезков или дуг, их касательность, параллельность прямых, концентричность дуг, эквидистантность линий) или размерными (углы между прямыми, расстояние между центрами дуг и т.п.). Такие сечения соединяются сплайнами, формируя поверхность пера. В отличие от традиционного подхода, в котором количество точек на разных сечениях может отличаться, что вызывает проблему «песочных часов», в данном подходе при единстве топологии всех сечений число элементов сечений одинаково для всего пера, это исключает пере-кручивание пера. Одним из примеров примене-

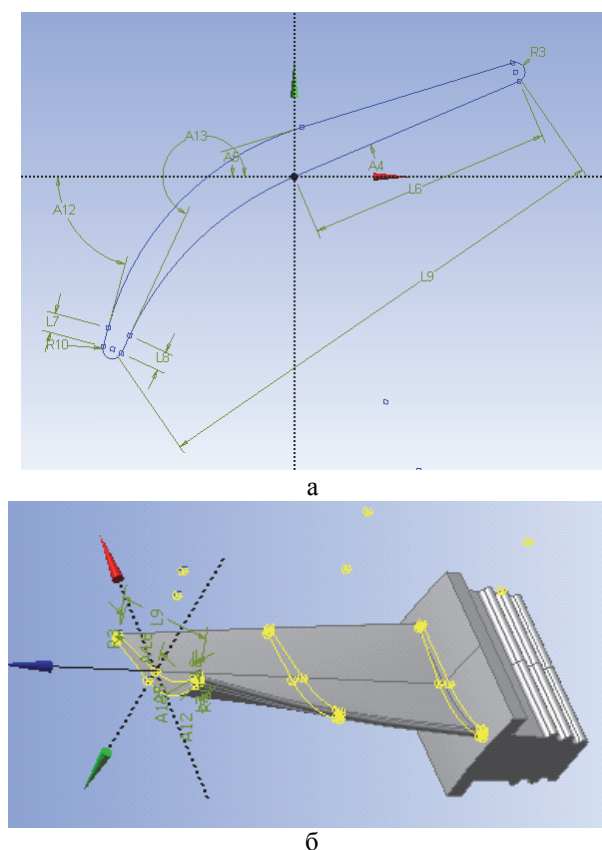


Рис. 6. Эскизный подход к формированию параметрических лопаточных венцов:
а – эскиз профиля лопатки, в – CAD модель

ния эскизного подхода является построение профилей лопаток по методу дуг окружностей и отрезков прямых (рис. 6). Как видно, данный подход не использует явно понятие средней линии. При этом лопаточные углы задаются углами между фронтом решётки и непосредственно линиями корытца или спинки с учётом заострения профиля щ. При необходимости могут быть использованы вспомогательные линии, которые не используются при построении эскиза, но накладывают на основные линии дополнительные геометрические ограничения. Также встречаются модели, описывающие геометрическую форму не материала лопатки, а межлопаточного канала. Чаще такой подход применяется при описании турбинных лопаток, но он применим для компрессорных венцов. Такой подход позволяет, во-первых, избежать дополнительного этапа формирования окружающего лопатку пространства, а во-вторых, описывать непосредственно межлопаточный канал, задавая вспомогательными линиями такие его параметры как горло, степень диффузорности и т.д.

Поскольку все размерные ограничения в САД-системах имеют возможность параметрически изменяться, то перестроение модели при изменении любых размерных ограничений происходит автоматически. Поэтому реализация (см.

рис. 5) такого подхода может быть произведена стандартными средствами любой САД-системы, поддерживающей построение моделей с использованием геометрических и размерных параметрических ограничений. Другим преимуществом данного подхода является методическая простота создания модели: в моделях в принципе отсутствуют скрытые массивы данных (как например таблицы координат симметричного профиля в традиционном подходе), все ограничения всегда представлены непосредственно на эскизе, что упрощает создание новых моделей и топологическую модификацию старых. Представление размерных параметров в явном виде (углы, хорда, диаметр горла) позволяет сделать более наглядным процесс параметрической модификации моделей: «подгибка» кромок, расширение горла или изменение ширины венца - все операции выполняются путём изменения конкретных значений размеров непосредственно на 3Д-модели, что важно, например, в процессе обучения. Недостатком такого подхода является слабая «надёжность» моделей, уменьшающаяся с увеличением их сложности. Каждая модель способна параметрически изменять геометрию с сохранением топологии только в определенном диапазоне параметров. При выходе параметров из этого диапазона, топология модели может нарушаться. В качестве примера можно привести разрушение топологии модели, например, при попытке её перестроения с лопаточными углами близкими к 90 градусам (рис. 7). При этом возвращение модели в рабочее состояние как правило невозможно. Путь решения данной проблемы - применение «пробных» моделей для изменения топологии. Т.е. базовая модель с правильной топологией не изменяется, а создаётся её копия, на которой задаются новые параметры. Если модель выдерживает изменение параметров с сохранением топологии, она используется в дальнейших расчётах, если разрушается - то набор параметров признаётся негодным и модель уничтожается, а для следующих действий используется нетронутая базовая модель. Такой поход реализуется, например, при многовариантных и оптимизационных

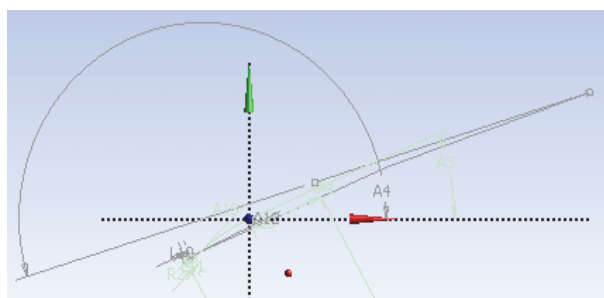


Рис. 7. Разрушение эскиза при выходе параметров за допустимые диапазоны изменения

исследованиях в ANSYS Workbench DesignXplorer и Sigma Technology IOSO. При увеличении сложности моделей (количества элементов эскиза), надёжность её уменьшается. Поэтому ещё одной проблемой использования данного подхода является ограниченная сложность параметрических эскизов.

Третий подход заключается в построении лопаток на основе заданных параметров лопатки и межлопаточного канала. Распределение параметров (лопаточных углов, площади поперечного сечения канала, толщины лопатки) по ходу проточной части обычно принимается исходя из одномерного расчёта газовой динамики потока, а также эмпирических данных прототипов. Путём расчётов и геометрических построений, выполняемых специализированными программами, формируется САД-модель лопаточной машины, отвечающая затребованным геометрическим параметрам канала. При этом полученная САД-модель в чистом виде не является параметрической. Однако параметризация достигается полной автоматизацией повторного создания новых САД-моделей с изменёнными параметрами. Поскольку такое перепостроение производится достаточно быстро, формируется однозначная цепочка «входные параметры → САД-модель», несмотря на то, что сам алгоритм создания САД-модели, остаётся «чёрным ящиком». Примером реализации такого подхода являются инструменты Blade Gen и Blade Editor продукта ANSYS Blade Modeler.

Следует отметить, что при использовании данного подхода для задания распределения параметров по высоте лопатки используются линии меридионального сечения, соединяющие точки лопатки с одинаковой относительной высотой по всей длине проточной части. В отличие от цилиндрических, конических и тем более плоских сечений такой подход позволяет описывать лопаточные машины с любым направлением течения: радиальные, осевые и диагональные.

Четвёртый подход, который можно выделить отдельно, похож на третий, т.е. реализует автоматическое построение САД-модели программой по скрытым от глаз пользователя алгоритмам. Однако в отличие от третьего подхода входными параметрами являются не геометрические характеристики лопаточного венца, а желаемые газодинамические параметры. Фактически, программой за один проход выполняются два последовательных действия: проектный расчёт геометрических характеристик и построение по ним модели. Реализация такого подхода в виде «in-home» программного продукта часто применялась во многих конструкторских бюро в конце 20-го века и в некоторых продолжает использоваться в настоящее время.

Недостатком четвёртого подхода является отсутствие гибкости и сложность внесения изменений в геометрические параметры, полученные из проектного расчёта, перед профилированием. Всё чаще программные реализации этого алгоритма разделяются на две отдельные функциональные части, однако иногда можно видеть даже относительно свежие программные продукты, реализующие именно четвёртый подход, дополненный возможностями редакции получаемой геометрии, например ANSYS Vista xxD.

Таким образом, в настоящее время существует несколько различных подходов к параметрическому моделированию турбомашин при проведении оптимизационных исследований. Выбор того или иного подхода обусловлен прежде всего удобством использования в каждом конкретном случае.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снижение окружной неравномерности потока в последней ступени КСД / *О.В. Батурин, А.В. Кривцов, В.Н. Матвеев, Г.М. Попов* // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №5 (36). Часть 2. С. 131-137.
2. *Колмакова Д.А.* Результаты газодинамического и прочностного совершенствования осевой турбины турбокомпрессора ТК-32 // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 2. С. 242-248.
3. *Попов Г.М., Шкловец А.О., Колмакова Д.А.* Расчет вынужденных колебаний лопаток рабочего колеса компрессора авиационного газотурбинного двигателя, возникающих от действия окружной неоднородности газового потока // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №1(2). С. 517-520.
4. *Шаблий, Л.С.* Проблемы оптимизации многоступенчатых компрессоров при создании перспективных ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – №3 (34), 2012, часть 2 – Самара СГАУ: 2012. – с.192-196.
5. Egorov I.N. Optimization of the gas turbine engine parts using methods of numerical simulation [Текст] / I.N. Egorov, M.L. Kuzmenko, Yu.N. Shmotin, K.S. Fedechkin // ASME paper GT2007-28205.
6. Подходы к формированию параметрических моделей лопаточных машин / *Л.С. Шаблий, Г.М. Попов, Д.А. Колмакова* // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 3. С.285-291.
7. *Шаблий Л.С.* Реверс-инжиниринг компрессорного лопаточного профиля: построение средней линии и

симметричного профиля // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 2. С.229-234.

8. Автоматизация построения моделей лопаточных

венцов для САЕ расчётов в программе Profiler / Л.С. - Шаблий, И.Б. Дмитриева, Г.М. Попов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №1 (28). Часть 1. С. 82-90.

PARAMETRIC MODELING OF BLADE MACHINES DURING OPTIMIZATION

© 2013 L.S. Shabliy, D.A. Kolmakova, A.V. Krivtsov

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

Importance of parametric modeling during optimization investigations of turbo-machines is showed. Different approaches for parametric modeling of blade machines are described. In fractional outlines the advantages and disadvantages of each approach.

Key words: optimization, parameterization, the profile, the middle line, turbo-machine, spline, blade.

Leonid Shabliy, Candidate of Technical Sciences, Assistant Lecturer. E-mail: afroaero@hotmail.ru
Daria Kolmakova, Graduate Student.
E-mail: kolmakova.daria@gmail.com
Alexander Krivtsov, Graduate Student. E-mail: udet@mail.ru