УДК 004.94

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ПРОЦЕДУРНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СИМУЛЯЦИИ ПОЛЕТА

Тявкин И.В., Тютюнник В.М.

Тамбовский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет культуры и искусств», Тамбов, e-mail: vmt@tmb.ru

Рассмотрены технологии, применяемые в гражданской и военной авиации для инструктажа и предполетной подготовки летного состава. Доказана актуальность создания системы симуляции полета группы летательных аппаратов. Описаны силы, действующие на летательный аппарат в окружающей воздушной среде. Приведены системы уравнений, описывающих неустановившееся криволинейное движение летательного аппарата в горизонтальной плоскости, неустановившееся криволинейное движение летательного аппарата в вертикальной плоскости, пространственное движение центра масс летательного аппарата. Приведена концептуальная модель информационной системы симуляции полета группы летательных аппаратов, включающая подсистемы редактирования траектории полета, визуализация полета летательного аппарата (группы аппаратов), поиска в информационно-поисковой системе, хранилища данных. Описана подсистема хранилища данных, включающая две базы данных и систему файлов, осуществляющая разграничение доступа к данным других подсистем информационной системы. Рассмотрена подсистема редактирования траектории полета, отвечающая за добавление ресурсов в информационную систему и создание траектории полета, позволяющая построить траекторию полета группы летательных аппаратов.

Ключевые слова: информационная система, симуляция полета, аналитические и процедурные модели, трехмерное моделирование

ANALYTICAL AND PROCEDURAL MODEL FOR INFORMATION SYSTEM FLIGHT SIMULATION

Tyavkin I.V., Tyutyunnik V.M.

Tambov branch Moscow State Universety Culture And Art, Tambov, e-mail: vmt@tmb.ru

The technology used in civilian and military aircraft for preflight briefing and training of flight crews had been rewiring. The relevance of the system simulation of the flight of aircraft was proved. The forces acting on an aircraft in the surrounding air was described. System of equations describing unsteady curvilinear motion of the aircraft in a horizontal plane, unsteady curvilinear motion of the aircraft in a vertical plane and the spatial movement of the center of mass of the aircraft was introduced. The conceptual model of information system simulating the flight of aircraft, including the sub editing of flight paths, rendering the aircraft flight (group of aircraft), the search in the retrieval system and the data warehouse had been described. The subsystem of storage of the data, including two database and system of the files, carrying out differentiation of access to data of other subsystems of information system is described. The subsystem of editing of a trajectory of the flight, responsible for addition of resources in information system and creation of a trajectory of the flight, allowing to construct a trajectory of flight of group of aircraft is considered.

Keywords: information system, flight simulation, analytical and algorithmic model, the three-dimensional modeling

Современная военная и гражданская авиационная техника оснащена высокотехнологичными электронными системами управления и контроля. Подготовка и переподготовка летного состава для исполнения этих функций требует больших затрат финансов и времени, которые резко снижаются при использовании тренажеров и симуляторов, создающих иллюзию управления реальным объектом.

Термин «симуляция» неразрывно связан с термином «виртуальная реальность». Термин «киберпространство», впервые введённый У. Гибсоном в 1982 году, подразумевает метафорическую абстракцию, используемую в философии и в информационных технологиях, и является виртуальной реальностью, которая представляет Ноосферу (Второй мир) как «внутри» компьютеров, так и «внутри» компьютерных сетей [8].

Используя системы виртуальной реальности, созданы аппаратно-программные комплексы, которые в точности передают специфику реального объекта. Информационные системы симуляции используются в таких сферах деятельности, где реальные эксперименты опасны для жизни людей, например, в лечебных целях. Область терапевтического использования виртуальной реальности – лечение фобий путем демонстрации пациентам графических изображений объектов, вызывающих у них непреодолимый страх. Этот прием впервые использован в 1990-х гг. американцами Барбарой Рутбаум (Barbara O. Rothbaum) и Ларри Ходжесом (Larry F. Hodges) для лечения людей, боящихся высоты, воздушных полетов и публичных выступлений, а также ветеранов вьетнамской войны с хроническим посттравматическим стрессом.

Применение систем симуляции в авиации сохраняет дорогостоящую летательную технику и главное жизни пилотов. Во всем мире для обучения курсантов широко применяются системы симуляции полетов на летательных аппаратах гражданского и военного назначения. 14 апреля 1929 года в США Edwin A. Link подал первую заявку на получение патента для авиационного тренажера. Dick Banner и Al Kuhl создали первый аналоговый авиационный симулятор в 1955 году в NASA США. В научных трудах Б.Т. Горощенко, А.А. Красовского, А.А. Лебедева, Н.М. Лысенко, И.В. Остославского, Р. Стенгела (R. Stengel), А. Бабистера (A.W. Babister) выведены дифференциальные уравнения, описывающие движение летательного аппарата в трехмерной системе координат и использующиеся для построения соответствующих информационных систем.

Разработан ряд авиационных симуляторов («Tom Clancy's High Altitude Warfare eXperimental Squadron», «Microsoft Flight Simulator», «Фланкер», «Lock On»), каждый из которых имеет в своем арсенале реалистичную графику и физическую модель поведения летательного аппарата. В современных авиасимуляторах пользователь управляет только одним летательным аппаратом. Используя сетевой режим, пользователи объединяются в группы и выполняют фигуры пилотажа в виртуальном пространстве. Все существующие авиасимуляторы не позволяют моделировать полет группы летательных аппаратов на одном компьютере и его запись для последующей многократной демонстрации. Для выполнения группового пилотажа, используя авиасимулятор, нужно два и более человека, а также несколько компьютеров. Отработку группового пилотажа пилоты до сих пор осуществляют на земле, выполняя тренаж «пеший по-летному». Пилоты в полном составе в боевых порядках следуют по начерченному на асфальте маршруту, проговаривая все свои действия в той последовательности, в которой будут производить их в полете.

Таким образом, задача разработки информационной системы трехмерной симуляции полета группы летательных аппаратов, позволяющей создавать траектории полета и осуществлять их просмотр без затрат на топливо и другие ресурсы, является актуальной. Эта система позволит наглядно демонстрировать то, как может группа летательных аппаратов выполнять фигуру пилотажа при различных условиях без прямого участия пилотов в пилотировании летательных аппаратов, что позволит избежать ошибок в пилотировании группы летательных аппаратов и сохранить жизни пилотам.

Аналитические модели

Движение летательного аппарата в пространстве описывается системой дифференциальных уравнений. В литературе приводятся как общие уравнения движения летательного аппарата, так и уравнения движения летательного аппарата в отдельных плоскостях (вертикальная и горизонтальная) [1, 2, 4]. Дифференциальные уравнения описывают движение летательного аппарата как материальной точки или как системы материальных точек.

Под летательным аппаратом будем понимать материальную точку, на которую действуют в общем случае следующие внешние силы:

1) G – сила тяжести (вес летательного аппарата), направленная по вертикали вниз;
2) Y – подъемная сила;
3) Q – лобовое сопротивление;
4) Z – боковая сила;
5) P – сила тяги движетеля, которую принимают направленной по оси двигателя, в общем случае наклоненной по отношению к хорде крыла под углом.

Составим уравнения криволинейного движения летательного аппарата в горизонтальной плоскости. Криволинейное движение летательного аппарата в горизонтальной плоскости может быть установившимся, когда скорость в процессе полета остается постоянной, и неустановившимся, когда скорость полета переменная. Неустановившееся криволинейное движение летательного аппарата в горизонтальной плоскости описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dV}{dt} = gn_x; \\ &\theta = n_y \cos\gamma - 1; \\ &\frac{d\psi}{dt} = -\frac{g}{V} n_y \sin\gamma; \\ &\frac{dx}{dt} = V\cos\theta\cos\psi; \\ &\frac{dz}{dt} = -V\cos\theta\sin\psi, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где V – скорость полета (скорость потока воздуха относительно летательного аппара-

та); g – ускорение силы тяжести; n_x – перегрузка по оси Ox; t – время; θ – угол между вектором скорости полета и горизонтальной плоскостью (угол наклона траектории полета к горизонту); n_y – перегрузка по оси Oy; γ – угол крена летательного аппарата (угол между плоскостью симметрии летательного аппарата и вертикальной плоскостью, содержащей продольную ось летательного аппарата); x – позиция точки летательного аппарата в по оси Ox; z – позиция точки летательного аппарата в по оси Oz; ψ – угол разворота летательного аппарата в горизонтальной плоскости; L – длина пути, пройденного летательным аппаратом, t – время.

При решении системы (1) в качестве независимой переменной могут быть приняты время t, угол разворота φ или скорость полета V.

Когда движение летательного аппарата установившееся, т.е. скорость полета по величине постоянна, а также постоянны нормальная перегрузка n_y и угол γ, летательный аппарат совершает полет по круговой траектории (выполняя вираж), радиус которой определяется по формуле:

$$r_в = \frac{V^2}{g\sqrt{n_y^2 - 1}}.$$

Время выполнения виража определяется формулой:

$$t = \frac{2\pi r_в}{V}.$$

Криволинейное движение летательного аппарата в вертикальной плоскости обычно является неустановившимся и описывается следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dV}{dt} = g(n_x - \sin\theta);\\ &\frac{d\theta}{dtV} = \frac{g}{}(n_y - \cos\theta);\\ &\frac{dH}{dt} = V\sin\theta;\\ &\frac{dx}{dt} = V\cos\theta, \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где H – высота полета.

Используя системы (1) и (2), опишем пространственное движение центра масс летательного аппарата следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dV}{dt} = g(n_x - \sin\theta);\\ &\frac{d\theta}{dtV} = \frac{g}{}(n_y\ \cos\gamma - \cos\theta);\\ &\frac{d\psi}{dt} = -\frac{g}{V\cos\theta} n_y \sin\gamma;\\ &\frac{dH}{dt} = V\sin\theta;\\ &\frac{dx}{dt} = V\cos\theta\cos\psi;\\ &\frac{dz}{dt} = -V\cos\theta\sin\psi. \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Решение системы (3) невозможно без вычисления перегрузок n_x и n_y по формулам:

$$n_x = \frac{P - Q}{G} \text{ и } n_y = \frac{Y}{G}.$$

Если перегрузка n_y вычисляется для виража, то используем формулу:

$$n_y = \frac{1}{\cos\gamma}.$$

Вычисление перегрузки n_y для спирали осуществляется по формуле

$$n_y = \frac{\cos\theta}{\sin\gamma}.$$

Если тяга движетеля не известна, то её можно рассчитать по формуле:

$$P = m_{сек}(w - V),$$

где $m_{сек}$ – секундный массовый расход воздуха через двигатель; w – скорость истечения газов из двигателя.

Как известно из экспериментальной аэродинамики, подъемная сила Y равна

$$Y = c_y S\frac{\rho V^2}{2},$$

где c_y – коэффициент подъемной силы; S – площадь крыльев; ρ – плотность воздуха. Силу лобового сопротивления Q можно определить как

$$Q = c_x S\frac{\rho V^2}{2},$$

где c_x – коэффициент подъемной силы. Системы (1), (2) и (3) не учитывают боковую силу и описывают движение летательного аппарата как в вертикальной и горизонтальной, так и пространственном движении в обеих плоскостях одновременно. Системами (1), (2) и (3) описываются движения летательного аппарата при выполнении всех

существующих фигур простого и сложного пилотажа [6].

Выполнение фигур простого и сложного пилотажа летательным аппаратом осуществляется в соответствии с рядом параметров, которые можно записать в виде кортежа:

$$\text{Param} = < V, H, \theta, \gamma, \psi > , \qquad (4)$$

где ψ – угол рысканья, т.е. угол между проекцией продольной оси самолета на горизонтальную плоскость и некоторым направлением на горизонтальной плоскости, принимаемым за начальное. Моделирование полета летательного аппарата подразумевает задание начального условия в виде картежа (4) и выбор системы дифференциальных уравнений. Например, для расчета траектории полета летательного аппарата при выполнении фигуры «Вираж» используется система (1), а не (3) во избежание лишних расчетов. Эти уравнения решаются численными методами. В литературе [4] приведены результаты вычислений точного решения, а также решений, полученных численными методами. Методы интегрирования, которые часто используются в моделировании: точный, Рунге-Кутта, Эйлера и по средней ординате. Решение по методу Рунге-Кутта при шаге 0,1 практически полностью совпадает с результатами точного интегрирования. Метод Эйлера: при шаге 0,1 дает погрешность 8 %, при шаге 0,05 дает погрешность 4 % и при шаге 0,025 дает погрешность 2 %. Метод интегрирования по средней ординате: при шаге 0,1 дает погрешность 0,5 % и при шаге 0,05 дает погрешность 0,1 %. Таким образом, для численного интегрирования систем (1), (2) и (3) лучше использовать метод Рунге-Кутта 4-го порядка или метод Эйлера.

В результате решения систем дифференциальных уравнений (1), (2) и (3) движения летательного аппарата получим в каждом шаге интегрирования массив параметров, который представлен в виде кортежа:

$$D_i = < V_i, \theta_i, \varphi_i, H_i, L_i, \gamma_i > . \qquad (5)$$

На каждом шаге интегрирования мы получаем кортеж данных (5). Далее формируем массив типа D_i, который имеет вид:

$$S = (D_i, \ldots, D_n),$$

где $i = \overline{0, n}$, n – количество шагов интегрирования. Полученный массив S включает исходные данные, которые представлены в табличном виде. На их основе вычисляем позиции и направления полета летательного аппарата в трехмерном виртуальном пространстве, которые запишем в виде кортежа:

$$Q = (<Pos_i, Dir_i> , \ldots , <Pos_n, Dir_n>),$$

где Pos_i – трехмерный вектор, i-я позиция летательного аппарата в трехмерном пространстве; Dir_i – трехмерный вектор, i-е направление летательного аппарата.

Так как Pos_i – трехмерный вектор с переменными X, Y и Z, то их можно получить из кортежа D_0, взяв значение переменной H_0. В результате вектор позиции летательного аппарата будет выглядеть так: $Pos_0 = \{0, H_0, 0\}$. Вектор направления летательного аппарата в трехмерном пространстве может быть направлен в любую сторону. В трехмерной компьютерной графике используются две системы координат: левосторонняя и правосторонняя. Возьмем за основу правостороннюю систему координат. Предположим, что вектор направлен вдоль оси Oz от наблюдателя, тогда Dir_0 имеет вид: $Dir_0 = \{0, 0, -1\}$.

Процедурные модели

Концептуальная модель информационной системы симуляции полета группы летательных аппаратов представлена на рисунке.

Информационная система состоит из подсистем:

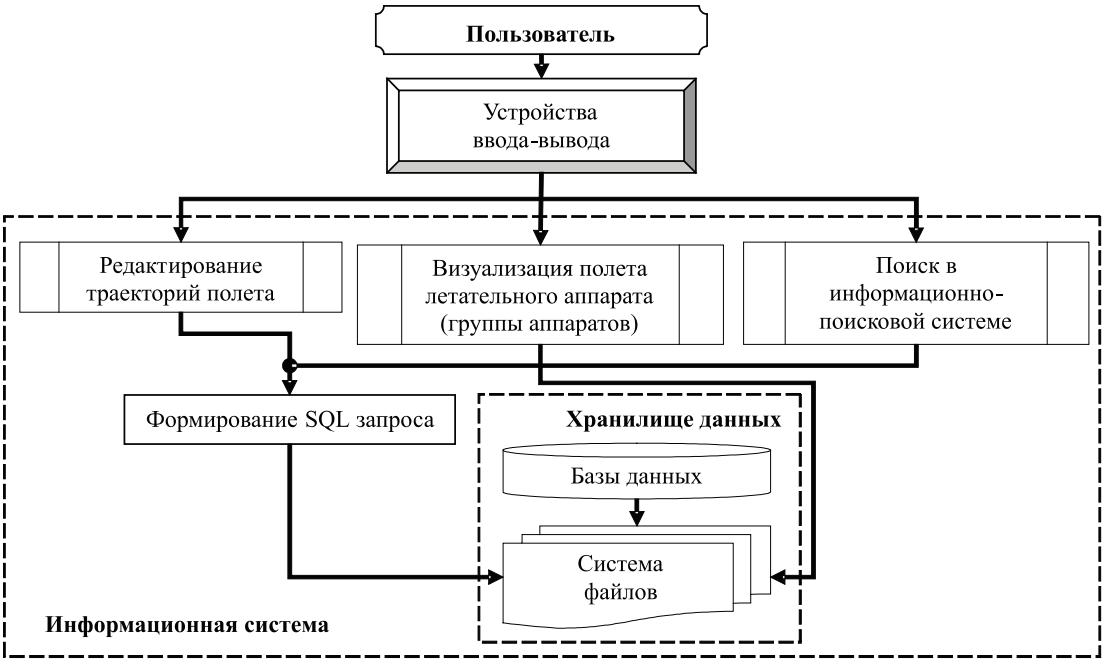
1) «Редактирование траекторий полета» – создает и редактирует траектории полета летательного аппарата (групп аппаратов);

2) «Визуализация полета летательного аппарата (группы аппаратов)» – визуализирует полет летательного аппарата (группы аппаратов) по заданной траектории с возможностью отслеживания хода полета из любой точки в виртуальном пространстве компьютера;

3) «Поиск в информационно-поисковой системе» – выдает на запрос пользователя текстовую, графическую, звуковую и видеоинформацию;

4) «Хранилище данных» – отвечает за размещение баз данных на физическом носителе и разграничение прав доступа к ним; организацию файловой системы хранения разных типов файлов, используемых другими подсистемами.

Информационная система относится к типу систем поддержки принятия решения пользователями [5, 7]. Ее пользователями является летный состав военно-воздушных сил и гражданской авиации. Цель разработки – используя начальные условия, построить траекторию полета летательного аппарата (группы аппаратов) с последующей визуализацией в трехмерном пространстве компьютера. Траектория полета описывает одну или комплекс взаимосвязанных фигур пилотажа [2, 3].



Концептуальная модель информационной системы

Подсистема «Хранилище данных» (см. рисунок) состоит из двух элементов:

1) «База данных»;

2) «Система файлов».

Эта подсистема отвечает за хранение и организацию доступа другим подсистемам к данным, хранящимся на физическом носителе информации: о летательных аппаратах; о конструкторских бюро и их основателях; о вооружении летательных аппаратов, т.е. любая информация, которая относится к летательным аппаратам. Информационный массив решено разделить на две части и для каждой части спроектировать свою базу данных, а именно:

1) «Aircraft_Database» – здесь содержится вся информация о летательных аппаратах. База данных состоит из таблиц: «Aircraft» – летательные аппараты; «Power_System» – силовые установки; «Constructor» – разработчик; «Type_aircraft» – типы летательных аппаратов; «Geometrical_data» – основные геометрические данные; «Audio_Video_Graphics» – аудио-, видеографика; «Type_files» – типы файлов; «Basic_data» – основные данные летательного аппарата; «Arming_aircraft» – вооружение летательного аппарата; «Type_arming» – типы вооружения; «ArmConstructor» – конструкторы; «Arming» – вооружение.

2) «Aerobatics_Database» – здесь содержится информация о параметрах выполнения фигур пилотажа. База данных состоит из таблиц: «Aerobatics» – фигуры пилотажа; «Category_aerobatics» – категории фигур пилотажа; «Parameters_figures» – параметры фигур.

Подсистема «Редактирование траекторий полета» состоит из блоков: «Территория» – добавление и изменение файла 3D-модели подстилающей поверхности; «Летательный аппарат» – добавление, удаление файла 3D-модели летательного аппарата; «Строй (боевой порядок)» – создание нового или редактирование существующего боевого строя группы летательных аппаратов; «Траектория полета» – создание новой или редактирование существующей траектории полета летательного аппарата (группы аппаратов).

Подсистема визуализации полета летательного аппарата (группы аппаратов) отвечает только за формирование трехмерных образов на дисплее, т.е. визуализацию полета. Разделение на подсистемы («Редактирование траекторий полета» и «Визуализация полета летательного аппарата (группы аппаратов)») обусловлено тем, что время на запуск программы и визуализацию полета должно быть минимально (несколько секунд). Пользователь один раз строит траекторию полета, потом в любое время визуализирует полет летательного аппарата (группы аппаратов) по этой траектории.

Подсистема поиска в информационно-поисковой системе предоставляет пользователю полный доступ к ресурсам информационной системы: текстовая, графическая, аудио- и видеоинформация, виртуальный

обзор трехмерных моделей авиации. Пользователь формирует свой запрос в виде строки дескрипторов, и информационно-поисковая система выводит на экран всю информацию, имеющуюся в базах данных и отвечающих на запрос пользователя.

Заключение

Информационная система позволяет моделировать траектории полета с выполнением всех фигур пилотажа. Информационная система является универсальной, так как в ней предусмотрена возможность добавления различных ресурсов. Например, в пилотаже может участвовать группа истребителей или группа спортивных летательных аппаратов. Главное – добавить в систему соответствующие трехмерные модели и указать их характеристики.

Достоинством системы является то, что она позволяет создавать траектории полета и потом осуществлять их просмотр без затрат на топливо и другие ресурсы. Эта система наглядно демонстрирует то, как может группа летательных аппаратов выполнить фигуру пилотажа при различных условиях без участия пилотов в пилотировании летательных аппаратов. Используя информационную систему, можно избежать ошибок в пилотировании группы летательных аппаратов и сохранить жизни пилотам. Аналогов такой системы нами пока не обнаружено.

Список литературы

1. Байдуков В.Б., Климов А.С. Аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов: учебник для учащихся авиационных техникумов. – М.: Машиностроение, 1979. – 344 с., ил.

2. Жабров А.А. Теория полета и пилотирования самолета. – М.: ДОСААФ, 1959. – 411 с.

3. Медников В.Н. Маневрирование на самолете-истребителе. – М.: Воениздат, 1975. – 326 с.

4. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1969. – 500 с.

5. Терелянский П.В. Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования: монография // ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 127 с.

6. Тявкин И.В. База данных для хранения параметров выполнения фигур пилотажа // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 11. – С. 32–33.

7. Finlay P.N. Introducing decision support systems. – Oxford, UK Cambridge, Mass., NCC Blackwell: Blackwell Publishers, 1994.

8. Gibson W. Burning Chrome // Omni. – 1982, july.

References

1. *Baydukov, V.B., Klimov A.S. Aerodinamikaidinamik apoletaletatelnykhapparatov [Uchebnik dlya uchaschikhsya aviatsionnykh tekhnikumov].* Moscow, *Mashinostroenie*, 1979. 344 p.

2. *ZHabrov, A.A. Teoriyapoletaipilotirovaniyasamoleta.* Moscow, *DOSAAF*, 1959. 411 p.

3. *Mednikov, V.N. Manevrirovanienasamolete-istrebitele.* Moscow, *Voenizdat,* 1975. 326 p.

4. *Ostoslavskiy, I.V., Strazheva I.V. Dinamikapoleta. Traektorii letatelnykh apparatov [izd. 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe].* Moscow, *Mashinostroenie*, 1969. 500 p.

5. *Terelyanskiy, P.V. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy. Opyt proektirovaniya monografiya* [VolgSTU]. Volgograd, 2009. 127 p.

6. *Tyavkin, I.V. Baza dannykh dlya khraneniya parametrov vypolneniya figur pilotazha [Sovremennye naukoemkie tekhnologii].* 2010, no. 11. pp. 32–33

7. Finlay, P.N. Introducing decision support systems. – Oxford, UK Cambridge, Mass., NCC Blackwell: Blackwell Publishers, 1994.

8. Gibson, W Burning Chrome // Omni. – 1982, july.

Рецензенты:

Гусятников В.Н., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой прикладной математики и информатики ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный социально-экономический университет», г. Саратов;

Громов Ю.Ю., д.т.н., профессор, декан факультета информационных технологий ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» Министерства образования и науки РФ, г. Тамбов.

Работа поступила в редакцию 13.04.2012