УДК 626.735.33

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СЕТОЧНОГО И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АЭРОПОРТА

Л.Н. ЕЛИСОВ[1], Н.И. ОВЧЕНКОВ[2]
[1]*Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*
[2] *ООО «Производственно-сервисный центр "Электроника"», г. Ярославль, Россия*

В работе рассматривается оригинальный подход авторов к решению задачи управления авиационной безопасностью в гражданской авиации с применением метода параллельных вычислительных процессов и с использованием нейрокомпьютеров. Представлена постановка задачи моделирования среды безопасности на сеточных моделях и с применением нейронных сетей. Предметной областью исследований данной работы является аэропортовая деятельность в гражданской авиации, рассматриваемая с точки зрения обеспечения авиационной безопасности, которая определяется как состояние защищенности авиации от незаконного вмешательства в деятельность в области авиации. Важнейшей проблемой в данной предметной области является обеспечение авиационной безопасности на приемлемом уровне, а одной из главных задач обеспечения авиационной безопасности аэропорта становится управление уровнем авиационной безопасности.

В современных системах управление авиационной безопасностью является организационно-нормативным, что уже не может соответствовать и удовлетворять изменяющимся и усложняющимся требованиям, которые определяются факторами внешней и внутренней среды и связаны с совокупностью потенциальных угроз аэропортовой деятельности.

Оптимальное управление предполагает максимально точную идентификацию параметров управления и их количественную оценку. В своих последних работах авторы исследуют возможности применения математических методов для моделирования процессов и процедур управления авиационной безопасностью. В данной работе исследуются методы параллельных вычислений и нейрокомпьтерные сети для моделирования процессов управления авиационной безопасностью аэропорта. Показано, что практическое применение методов для задач в области авиационной безопасности возможно в комплексе с системами поддержки принятия решений, где ведущая роль отводится лицу, принимающему решения.

Ключевые слова: авиационная безопасность, краевая задача, дифференциальные уравнения в частных производных, сеточные модели, нейронные сети.

ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Авиационная безопасность рассматривается как состояние защищенности объекта [1]. Это состояние возникает в результате противостояния двух физически реализованных систем: системы угроз (опасностей) и системы защиты. При этом состояние защищенности не является физически реализуемым понятием, т. е. это воображаемое понятие. Для исследования таких понятий Лакан [2] предложил достаточно четкий путь: воображаемое – символическое – реальное. Состояние защищенности оценивается понятием уязвимость, которое отвечает на вопрос: в какой степени объект соответствует требованиям по безопасности. В таком случае правомочно ввести понятие «качество защиты», которое понимается как степень соответствия характеристик системы защиты и требований к ней, и связать с понятием уязвимость. Это уже символическое представление, и, более того, качество можно измерять [3]. Безопасность обеспечивается в том числе совокупностью средств защиты (в основном технических), каждое из которых создает отдельный фрагмент защиты объекта, а все вместе формируют среду безопасности, которую можно представить как некоторое поле безопасности, характеризуемое параметром «качество». Поле безопасности – это уже реальное понятие, которое можно исследовать с помощью определенного математического аппарата. Тогда целевой функционал управления авиационной безопасностью включает параметры поля защиты объекта, измеренные как качество технических средств обеспечения авиационной безопасности. Анализ показывает, что в первом приближении формальное описание поля защиты объекта может быть представлено в формате краевой задачи.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗАДАЧИ

Ниже представлена постановка задачи решения дифференциального уравнения в частных производных, описывающего с некоторой степенью приближения поле защиты объекта транспортной инфраструктуры, на моделирующих нейронных сетях, для чего необходима конечно-разностная аппроксимация исходного уравнения, т. е. замена области непрерывного изменения аргумента областью его дискретного изменения (сеткой) и замена дифференциального оператора некоторым разностным, а также замена разностными аналогами краевых условий, в результате чего получается система алгебраических уравнений.

Предположим, что исследуемая область авиационной безопасности описывается уравнением эллиптического типа. Рассмотрим конечно-разностную аппроксимацию задачи Дирихле для двумерного уравнения эллиптического типа

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma(x,y)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma(x,y)\frac{\partial u}{\partial y}\right)=f(x,y),\ (x,y)\in S, \tag{1}$$
$$u\big|_{\Gamma}=\varphi(x,y),\ (x,y)\in\Gamma,$$

где Г – некоторый прямоугольник, адекватно соответствующий исследуемому полю, а S – внутренний узел сетки (рис. 1) [5].

Построим равномерную сетку на плоскости *XOY*. Для этого построим два семейства эквидистантных прямых

$$x_i = x_0 + ih,\ i = 0, 1, 2, ..., \tag{2}$$
$$y_j = y_0 + jh,\ j = 0, 1, 2, ...,$$

где h – шаг сетки.

Тогда на плоскости XOY получим сетку с узлами $(ih, jh), i = 0, 1, 2,..., j = 0, 1, 2,...$ Сетка равномерна по осям X и Y. Рассмотрим узлы, которые принадлежат области $\bar{S} = S + \Gamma$. Те узлы, которые попали внутрь области S, называются внутренними (o), а их множество называется сеточной областью S_h. Точки пересечения прямых с границей Г называются граничными узлами (■), а их множество называется сеточной границей Γ_h. Ближайшие к границе узлы называются приграничными узлами (•) (рис. 1).

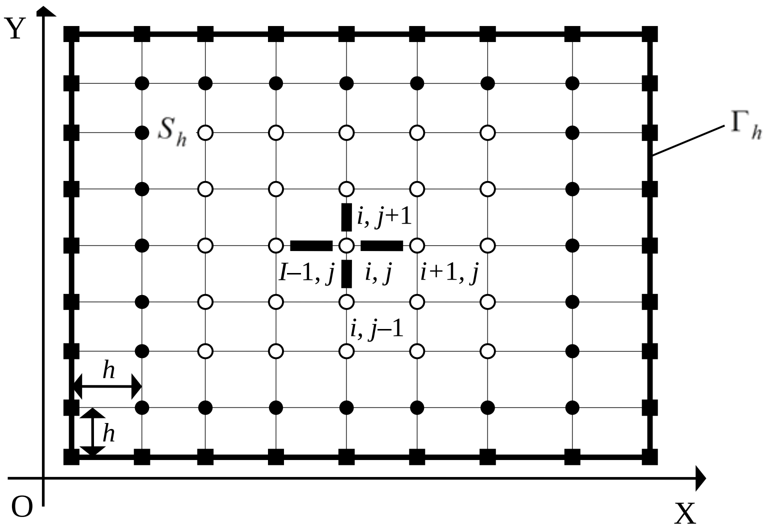

Рис. 1. Пример сеточной области
Fig. 1. An example of a mesh region

Вместо функций $u(x, y)$ непрерывных аргументов $x, y \in S$ будем рассматривать сеточные функции $u_h(x_i, y_j)$ узлов сетки. Если дан линейный дифференциальный оператор L, действующий на функцию u, то, заменяя входящие в Lu производные разностными отношениями, получим разностное выражение $L_h u_h$, являющееся линейной комбинацией значений сеточной функции u_h на некотором множестве узлов сетки, называемом шаблоном. То есть шаблон задает множество узловых точек, входящих в разностное выражение

$$\left(L_h u_h\right)_{ij} = \sum_{x_{kl} \in N\left(x_{ij}\right)} A_h\left(x_{ij}, x_{kl}\right) u_h\left(x_{kl}\right),$$

где $A_h\left(x_{ij}, x_{kl}\right)$ – коэффициенты;
h – шаг сетки;
$N\left(x_{ij}\right)$ – шаблон в узле x_{ij}.

Такая замена называется разностной аппроксимацией оператора L.

Используя интегро-интерполяционный метод и пятиточечный шаблон, запишем разностную аппроксимацию уравнения (1) для внутреннего узла:

$$-\left[\frac{\sigma(x_i + h/2, y_j)}{h^2} + \frac{\sigma(x_i - h/2, y_j)}{h^2} + \frac{\sigma(x_i, y_j + h/2)}{h^2} + \frac{\sigma(x_i, y_j - h/2)}{h^2}\right] u_{i,j} +$$
$$+\frac{\sigma(x_i + h/2, y_j)}{h^2} u_{i+1,j} + \frac{\sigma(x_i - h/2, y_j)}{h^2} u_{i-1,j} + \frac{\sigma(x_i, y_j + h/2)}{h^2} u_{i,j+1} +$$
$$+\frac{\sigma(x_i, y_j - h/2)}{h^2} u_{i,j-1} = f(x_i, y_j), \quad (x_i, y_i) \in S_h$$

или

$$a_{i,j}u_{i,j} - a_{i+1,j}u_{i+1,j} - a_{i-1,j}u_{i-1,j} - a_{i,j+1}u_{i,j+1} - a_{i,j-1}u_{i,j-1} = -f_{i,j}, \tag{3}$$

где

$$a_{i,j} = \frac{\sigma(x_i + h/2, y_j)}{h^2} + \frac{\sigma(x_i - h/2, y_j)}{h^2} + \frac{\sigma(x_i, y_j + h/2)}{h^2} + \frac{\sigma(x_i, y_j - h/2)}{h^2},$$
$$a_{i+1,j} = \frac{\sigma(x_i + h/2, y_j)}{h^2}, \quad a_{i-1,j} = \frac{\sigma(x_i - h/2, y_j)}{h^2}, \quad a_{i,j+1} = \frac{\sigma(x_i, y_j + h/2)}{h^2},$$
$$a_{i,j-1} = \frac{\sigma(x_i, y_j - h/2)}{h^2}, \quad f_{i,j} = f(x_i, y_j), (x_i, y_i) \in S_h.$$

Граничные условия Дирихле аппроксимируются следующим образом:

$$u_{i,j} = \varphi(x_i, y_j), (x_i, y_j) \in \Gamma_h. \tag{4}$$

Записав уравнения (3) для каждого узла, в котором неизвестна сеточная функция, учитывая граничные условия и перенеся все известные члены в правую часть, получим систему алгебраических разностных уравнений. В случае задачи Дирихле решение ищется только во внутренних узлах, условия (4) учитываются в разностных уравнениях вида (3).

В работах [5, 6] показано, каким образом можно записать систему разностных уравнений в матричной форме $\mathbf{AX} = \mathbf{F}$.

Таким образом, доказана принципиальная возможность вычисления параметра управления авиационной безопасностью в формате решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих с некоторым приближением поле опасности (поле защиты) объекта транспортной инфраструктуры, с помощью сеточной модели. При этом необходимо иметь в виду, что адекватность модели реальным процессам безопасности в данном случае в определяющем порядке зависит от адекватности формального представления исходных параметров поля защиты объекта. В таком случае дальнейший успех зависит от выбора метода решения, одним из которых может быть метод конечных элементов, ориентированный на дальнейшее использование нейросетевого моделирования.

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов (МКЭ) состоит в разбиении области решения Ω на ряд непересекающихся подобластей Ω^e – конечных элементов (КЭ). В пределах каждого КЭ искомое решение аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, обычно полиномом. Коэффициенты этого полинома выражаются через заранее неизвестные значения искомой функции в определенных точках КЭ, называемых узлами конечного элемента. Неизвестные узловые параметры находят, используя интегральную формулировку задачи [5].

Предварительно область решения разбивается на конечные элементы. Для двумерных задач используют треугольные или прямоугольные конечные элементы, для трехмерных задач – тетраэдры, параллелепипеды и треугольные прямые призмы. Автоматическая генерация конечно-элементных сеток и разбивка на конечные элементы представляет собой чрезвычайно актуальную и обширную область [6, 7].

Определяется аппроксимирующая функция элементов. В каждом отдельно взятом конечном элементе необходимо решить задачу приближенного представления искомой функции решения через значения этой функции в узлах. Чаще применяются лагранжевы конечные элементы, использующие лишь значения функции в узлах. Для лагранжева элемента значение функции решения $\varphi^{(e)}$ в произвольной точке e-го конечного элемента аппроксимируется полиномом

$$\varphi^{(e)} = \mathbf{A}^{(e)}\mathbf{R} + a_0,$$

где $\mathbf{A}^{(e)}$ – вектор-строка коэффициентов полинома; a_0 – свободный член; $\mathbf{R} = (x, y, z)$ – вектор координат рассматриваемой точки конечного элемента.

Для определения вектора $\mathbf{A}^{(e)}$ и свободного члена a_0 используется условие непрерывности искомой функции в узлах элемента. Подставляя координаты узлов элемента и неизвестные значения функции в узлах, получаем систему уравнений

$$\mathbf{X}^{(e)}\mathbf{A}^{(e)\mathrm{T}} + \mathbf{A}_0 = \mathbf{\Phi}^{(e)}, \qquad (5)$$

где $\mathbf{\Phi}^{(e)}$ – вектор узловых значений функции для e-го конечного элемента;
$\mathbf{X}^{(e)}$ – матрица координат узлов элемента, i, j и k – номера узлов;
$\mathbf{A}^{(e)\mathrm{T}}$ – транспонированный вектор $\mathbf{A}^{(e)}$;
$\mathbf{A}_0$ – вектор, все элементы которого равны a_0.

Решая системы (5), находим вектор $\mathbf{A}^{(e)}$, т. е. выражаем коэффициенты полинома через координаты узлов элемента и неизвестные значения функции в узлах (вектор $\mathbf{\Phi}^{(e)}$). Подставляя найденный вектор $\mathbf{A}^{(e)}$, получаем

$$\varphi^{(e)} = \mathbf{N}^{(e)\mathrm{T}}\mathbf{\Phi}^{(e)},$$

где $\mathbf{N}^{(e)\mathrm{T}}$ – вектор-строка, элементы которой называются функциями формы конечного элемента.

Определяется вектор узловых значений функции. Для решения этой задачи применяются два основных метода: метод, основанный на вариационной постановке задачи, и метод Галеркина [7].

Таким образом, наиболее простым для реализации в нейросетевом базисе представляется метод конечных разностей с использованием регулярных сеток. Для решения систем разностных уравнений перспективны клеточные нейронные сети.

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ НА НЕЙРОПОДОБНЫХ СЕТЯХ

Решение краевых задач на нейроподобных сетях выстраивают в соответствии с общей методикой решения математических задач в нейросетевом логическом базисе [4, 8, 9], которая включает следующие этапы: математическая постановка задачи; геометрическая постановка задачи; нейросетевая постановка задачи.

При решении систем линейных уравнений реализация сводится к заданию структуры нейронной сети, определяемой математической постановкой задачи. Формируемые таким образом сети названы формируемыми нейронными сетями или сетями прямой аналогии.

Структура нейроподобных сетей для решения систем линейных алгебраических уравнений строится исходя из выбранной энергетической функции (функционала оптимизации или функционала ошибки). Энергетическая функция должна быть выбрана таким образом, чтобы ее минимум достигался на точном решении $\mathbf{X}^*$ системы линейных алгебраических уравнений. Дифференцирование энергетической функции дает возможность преобразовать задачу минимизации в систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Аналоговая нейроподобная сеть с непрерывным представлением времени должна описываться полученной системой обыкновенных дифференциальных уравнений, т. е. нейроподобная сеть представляет собой аналоговую схему для решения полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для построения сети, работающей в дискретном времени, необходимо заменить дифференциальные уравнения разностными.

Рассмотрим аналоговые нейронные сети для решения систем разностных уравнений вида, основанные на непрерывной модели сети Хопфилда [9]. Каждый i-й нейрон описывается обыкновенным дифференциальным уравнением

$$c_i \frac{du_i}{dt} = -g_{ii}u_i + \sum_{\substack{j \\ j\neq i}} g_{ij} f\left(u_j\right) + I_i, \tag{6}$$

где u_i – вход (состояние) i-го нейрона;

c_i – входная емкость нейрона;

g_{ij} – элементы матрицы связей (g_{ij} – проводимость, связывающая выход j-го нейрона с входом i-го);

$f\left(u_j\right)$ – функция активации (непрерывная монотонно возрастающая нелинейная функция входа u_j);

I_i – входной ток (смещение нейрона);

$g_{ii} = \rho_i^{-1} + \sum_j g_{ij}$, ρ_i – входное сопротивление i-го усилителя (для современных усилителей можно принять $\rho_i = \infty$).

Классически подразумевается полносвязная сеть, т. е. каждый нейрон связан с каждым $i,\ j = 1, 2, \ldots,\ n$, где n – число нейронов в сети.

Запишем систему (6) в матричной форме:

$$\mathbf{C}\frac{d}{dt}\mathbf{U} = -\mathbf{DU} + \mathbf{T}f(\mathbf{U}) + \mathbf{I}, \tag{7}$$

где $\mathbf{U}$ – вектор состояния сети;

$\mathbf{D} = \operatorname{diag}(g_{11}, g_{22}, g_{33}, \ldots, g_{nn})$ – диагональная матрица;

$\mathbf{T}$ – матрица связей выходов и входов нейронов $(T_{ii} = 0, T_{ij} = g_{ij})$;

$f(\mathbf{U})$ – вектор-функция активации нейронов;

$\mathbf{I}$ – вектор внешних входов (смещений) нейронов;

$\mathbf{C}$ – диагональная матрица входных емкостей нейронов.

Решение системы разностных уравнений вида будем искать в классе состояний асимптотически устойчивого равновесия нейроподобной сети, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений (7). Параметры нейроподобной сети должны быть заданы таким образом, чтобы точка асимптотически устойчивого равновесия сети совпадала с решением системы.

В работе [6] предложена и исследована нейронная сеть Хопфилда для решения систем линейных алгебраических уравнений общего вида. В работе использована линейная функция активации $f(u_j) = -u_j$, $\mathbf{C} = \mathbf{E}$, где $\mathbf{E}$ – единичная матрица. Параметры нейронной сети выбираются следующим образом

$$D_{ii} = a_{ii}^2,\ T_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ki}a_{kj}, T_{ii} = 0,\ I_i = \sum_{k=1}^{n} a_{ki}F_i,\ i,\ j = 1, 2,\ \ldots, n. \tag{8}$$

С учетом линейной функции активации и (6) система (7) примет вид

$$\frac{d}{dt}\mathbf{U} = -\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{AU} + \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{F}.$$

Таким образом, нейросетевые модели (дискретные или аналоговые) вполне применимы для исследования поля опасности и поля защиты объектов транспортной инфраструктуры с целью идентификации параметров управления авиационной безопасностью. Остается открытым вопрос о погрешностях исследования.

К ВОПРОСУ О ПОГРЕШНОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложенный математический подход на основе нейросетевых моделей к решению задачи управления авиационной безопасностью аэропорта нельзя отнести к классу простых задач. На этапе математической формализации исследователь сталкивается с множеством проблем, из которых основными являются:

– существенная неопределенность в лингвистическом описании предметной области,

– методологические трудности в подборе адекватного математического аппарата для формализации,

– многокритериальность решаемой задачи, определяемая высоким порядком матрицы критериев оптимизации управления, элементы которой соответствуют множеству типов технических средств защиты объекта,

– неизбежная неадекватность любой предложенной модели, включая формат краевой задачи, вытекающая из неоднозначности понятийного аппарата,

– определенные трудности в задании граничных и начальных условий, связанные с неопределенностью исходной информации,

– практически непреодолимые сложности исследования динамики процессов управления авиационной безопасностью, поскольку введение фактора времени в модель приводит к неконтролируемому росту сложности математического аппарата или переводит задачу в класс NP-сложных задач, не имеющих решения.

Отсюда следует, что точного, даже относительно точного, решения предложенный подход применительно к задаче управления авиационной безопасностью не дает.

Вместе с тем условия практического использования предложенного подхода к управлению авиационной безопасностью не требуют точного решения с учетом следующих обстоятельств:

– абсолютной безопасности не существует, к ней можно только стремиться, т. е. речь идет о приемлемом уровне авиационной безопасности,

– управляемым параметром поля защиты объекта является качество, количественное значение которого определяется квалиметрическими (экспертными) методами, изначально дающими приближенные (субъективные) оценки,

– исполнительный механизм в системе управления авиационной безопасностью является эргатическим, где главная роль отведена лицу, принимающему решения.

Таким образом, вопрос о погрешностях предложенного подхода остается открытым, но переходит в разряд не самых главных. Следует заметить, однако, что в данном случае процедуры управления авиационной безопасностью должны быть дополнены процедурами оценки рисков возникновения негативных событий, которые адекватно встраиваются в общую схему управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен подход к моделированию процессов управления авиационной безопасностью аэропортов в гражданской авиации, основанный на использовании сеточных моделей и нейрокомпьютеров и представлении поля защиты объекта в формате краевой задачи.

2. Практическое применение метода становится возможным только в комплексе с системой поддержки принятия решений, поскольку в процессе формирования исходных данных не удается исключить эвристические процедуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисов Л.Н. Введение в теорию авиационной безопасности / Елисов Л.Н., Овченков Н.И., Фадеев Р.С.; [под. ред. Л.Н. Елисова]. Ярославль: Филигрань, 2016. 320 с.

2. Miller J.-A. "Microscopia" in Jacques Lacan. Book I. Cambridge, 1988, 188 p.

3. Елисов Л.Н., Баранов В.В. Управление и сертификация в авиационной транспортной системе. М.: Воздушный транспорт, 1999. 352 с.

4. Горбаченко В.И. Нейрокомпьютеры в решении краевых задач теории поля: учеб. пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2003. 336 с.

5. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. М.: Мир, 1985. 384 с.

6. Вазов В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963. 488 с.

7. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. М.: Наука, 1986. 296 с.

8. Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы. М.: Наука, 1980. 519 с.

9. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 288 с.

10. Параллельные вычисления / под ред. Г. Родрига. М.: Наука, 1986. 376 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Елисов Лев Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, lev.el@list.ru.

Овченков Николай Иванович, кандидат технических наук, генеральный директор «ООО ПСЦ "Электроника"», ovchenkov@electronika.ru.

SOME QUESTIONS OF THE GRID AND NEURAL NETWORK MODELING OF AIRPORT AVIATION SECURITY CONTROL TASKS

Lev N. Elisov[1], Nikolaj I. Ovchenkov[2]
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia
Electronika, PSC, LLC, Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

The authors' original problem-solution-approach concerning aviation security management in civil aviation applying parallel calculation processes method and the usage of neural computers is considered in this work. The statement of secure environment modeling problems for grid models and with the use of neural networks is presented. The research subject area of this article is airport activity in the field of civil aviation, considered in the context of aviation security, defined as the state of aviation security against unlawful interference with the aviation field. The key issue in this subject area is aviation safety provision at an acceptable level. In this case, airport security level management becomes one of the main objectives of aviation security. Aviation security management is organizational-regulation in modern systems that can no longer correspond to changing requirements, increasingly getting complex and determined by external and internal environment factors, associated with a set of potential threats to airport activity. Optimal control requires the most accurate identification of management parameters and their quantitative assessment. The authors examine the possibility of application of mathematical methods for the modeling of security management processes and procedures in their latest works. Parallel computing methods and network neurocomputing for modeling of airport security control processes are examined in this work. It is shown that the methods' practical application of the methods is possible along with the decision support system, where the decision maker plays the leading role.

Key words: aviation security, boundary value problem, differential equations in partial derivatives, grid model, neural network.

REFERENCES

1. Elisov L.N. Ovchenkov N.I., Fadeev R.S. *Vvedenie v teoriyu aviatsionnoy bezopasnosti* [Introduction to theory of Aviation Security]. Ed. by L.N. Elisov. Yaroslavl, Filigree, 2016, 320 p. (in Russian)

2. Miller J.-A. "Microscopia" in Jacques Lacan. Book I. Cambridge, 1988, 188 p.

3. Elisov L.N., Baranov V.V. *Upravlenie i sertifikatsiya v aviatsionnoy transportnoy sisteme* [Management and certification in aviation transport system]. M., Air transport, 1999, 352 p. (in Russian)

4. Gorbachenko V.I. *Neyrokompyuteryi v reshenii kraevyih zadach teorii polya.* [Neurocomputers in solving boundary value problems of field theory]. Educational Guidance for higher educational institutions. M., Radio Engineering, 2003, 336 p. (in Russian)

5. Farlou S. *Uravneniya s chastnyimi proizvodnyimi dlya nauchnyih rabotnikov i inzhenerov* [Partial Derivative Equations for Scientists and Engineers]. M., Mir, 1985, 384 p. (in Russian)

6. Vazov V., Forsyth J. *Raznostnyie metodyi resheniya differentsialnyih uravneniy v chastnyih proizvodnyih* [Different methods for solving differential equations in particular derivatives]. M., Foreign literature Publ., 1963, 488 p. (in Russian)

7. Voevodin V.V. *Matematicheskie modeli i metodyi v parallelnyih protsessah* [Mathematical models and methods in parallel processes]. M., Nauka, 1986, 296 p. (in Russian)

8. Golovkin B.A. *Parallelnyie vyichislitelnyie sistemyi* [Parallel computing systems]. M., Nauka, 1980, 519 p. (in Russian)

9. Callan R. *Osnovnyie kontseptsii neyronnyih setey* [Basic concept of neural networks]. M.: Publishing House "Williams", 2001, 288 p. (in Russian)

10. *Parallelnyie vyichisleniya* [Parallel computing]. Ed. by Mr. Rodrigues. M., Nauka, 1986, 376 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lev N. Elisov, Doctor of Technical Science, Professor, Full Professor of Flight and Life Safety Chair, MSTUCA, lev.el@list.ru.

Nikolaj I. Ovchenkov, Candidate of Technical Science, CEO of OOO PSC Elektronika, ovchenkov@electronika.ru.

Поступила в редакцию	07.11.2016	Received	07.11.2016
Принята в печать	27.02.2017	Accepted for publication	27.02.2017