

УДК 62.91

¹В.И. Чепиженко, к.т.н., с.н.с.²В.В. Павлов, д.т.н., проф.³С.В. Павлова, д.т.н., доц.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЭЙНШТЕЙНОВСКИЕ СИЛОВЫЕ ПОЛЯ В СИНЕРГИИ НАВИГАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА СЛОЖНЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

^{1,3}Национальный авиационный университет²Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем¹E-mail: chiv@nau.edu.ua²E-mail: pavlov@irtc.org.ua³E-mail: psv@nau.edu.ua

Обосновано использование свойств эйнштейновских силовых полей для разрешения поликонфликтов динамических систем в ограниченных навигационных пространствах.

Ключевые слова: гомеостазис, концепция Free Flight, силовое поле, синергетика, сложная система, среда CNS/ATM.

Обґрунтовано використання властивостей ейнштейнових силових полів для розв'язання поліконфліктів динамічних систем в обмежених навігаційних просторах.

Ключові слова: гомеостазис, концепція Free Flight, середовище CNS/ATM, силове поле, синергетика, складна система.

Наши математические затруднения Бога не беспокоят. Он интегрирует эмпирически.

Альберт Эйнштейн

Постановка проблеми

Сложная эргатическая система (СЭС) – это совокупность различно целеустремленных человеко-машинных (эргатических) систем.

К сложным эргатическим системам, образованным большой совокупностью подвижных объектов, относятся:

- современные подвижные робототехнические системы;
- аэронавигационные системы;
- системы наземного транспорта;
- космические системы;
- подводные системы.

Средой функционирования СЭС является навигационное пространство, которое:

- образовано большой совокупностью свободно движущихся объектов, подвижных и неподвижных препятствий, ограничений, запретных зон и т.д.;
- содержит средства наблюдения, связи и управления с заданными характеристиками;
- сформировано таким образом, чтобы обеспечить и гарантировать безопасность движения всех участников, входящих в навигационное пространство.

Примером такого навигационного пространства является мировая система управления

© Чепиженко В.И., Павлов В.В., Павлова С.В., 2012

воздушным движением (УВД) в аэронавигационной среде (АНС), которая претерпевает глобальную трансформацию как на структурном, так и на функциональном уровнях.

Трансформация структурного уровня системы УВД характеризуется:

- вводом в эксплуатацию принципиально новых динамических элементов, таких, как спутниковые навигационные системы, беспилотные летательные аппараты и т. д.;

- разработкой и внедрением новых систем связи, навигации и наблюдения, позволяющих проводить их интеграцию на основе использования концепций сетцентрических систем, функциональных виртуальных динамических систем и методов распределенного управления сложными динамическими системами.

Трансформация функционального уровня системы УВД характеризуется внедрением новых концепций и режимов, таких, как CNS/ATM, Free Flight, Free Route, PBN, ADS-B и др.

Одним из главных условий внедрения этих трансформаций в АНС является обеспечение безопасности полетов в рамках единой АНС.

Сложность структуры аэронавигационного пространства обусловлена необходимыми временными горизонтами УВД методов разрешения конфликтов (рис. 1).

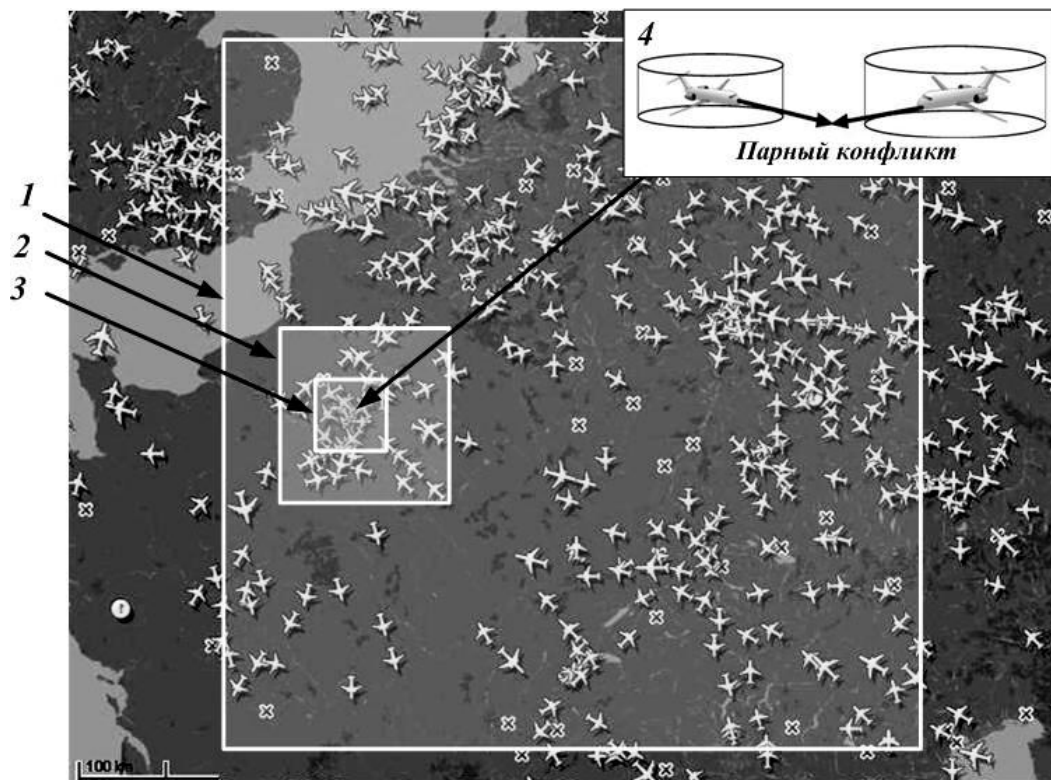


Рис. 1. Аэронавигационная обстановка над Европой:

- 1 – дальний горизонт;
- 2 – средний горизонт;
- 3 – ближний горизонт;
- 4 – микрогоризонт

Временные горизонты методов разрешения конфликтов характеризуются [1]:

- дальний горизонт (Long Term Conflict Resolution) временем сближения воздушных судов до 1 ч и протяженностью 800–200 км;
- средний горизонт (Mid Term Conflict Resolution) временем сближения воздушных судов 15–6 мин и протяженностью 200–80 км;
- ближний горизонт (Short Term Conflict Resolution) временем сближения воздушных судов 6–1 мин и протяженностью 80–10 км;
- микрогоризонт (Micro Term Conflict Resolution) временем сближения воздушных судов менее 1 мин и протяженностью менее 10 км.

Проблема обеспечения безопасности полетов на каждом горизонте имеет свои особенности.

Например, микрогоризонт характеризуется необходимостью разрешения парных конфликтов (минимально различимых конфликтных процессов). Поведение динамических объектов на микрогоризонте жестко зарегулировано траекториями расхождения. При этом разрешение парных конфликтов не гарантирует безопасности на

следующем, ближнем горизонте из-за проявления «эффекта домино» [2].

Разработанные методы обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций [3], которые могут быть потенциально использованы как фундамент трансформации навигационной среды, имеют ряд недостатков:

- неспособность решить проблемы на общесистемном уровне;
- субъективная (эвристическая) основа их формирования;
- ограничения их использования из-за «проклятия размерности» при решении задач программирования.

Обычные аналитические методы решения конфликтных задач при наличии ограничений, заданных в форме равенств, не обеспечивают решения задач программирования. Аналитические методы не учитывают ограничений в форме неравенств, которые характерны для подобных задач. Решение задач программирования невозможно выразить в замкнутой аналитической форме.

Задачи маршрутизации как задачи программирования даже теоретически имеют столь высокую размерность, что время их решения является практически бессмысленным. Мультипликация сложностей в конфликтующих системах ведет к коллапсу вычислительного процесса управления свободной совокупностью различно целеустремленных систем.

Стандартные схемы дифференциального исчисления, используемые обычно для решения задач программирования, основаны на выделении некоторой конечной системы планов (минимальной системы возможных вариантов), среди которых заведомо содержится искомый оптимальный план (вариант). Далее эти планы подвергаются дополнительному анализу, который сводится к сравнению значений различных планов системы и завершается отысканием искомого решения.

Однако уже при относительно небольших количествах переменных n и уравнений m (случаи, к которым сводятся сравнительно простые практические задачи) количество вариантов, составляющих минимальную систему возможных вариантов, исчисляется многими миллиардами.

В качестве примера сошлемся на одну из классических моделей программирования – так называемую задачу выбора. Суть проблемы выбора заключается в следующем. Задана квадратная таблица с n строками и n столбцами. Требуется выбрать один элемент в каждой строке и каждом столбце так, чтобы сумма их оказалась максимальной. Эта задача, имеющая самые разнообразные приложения, является задачей линейного программирования.

Минимальная система возможных вариантов задачи насчитывает $n!$ вариантов.

Непосредственное решение проблемы выбора связано со сравнением $n!$ величин. Для вычисления каждой из этих величин необходимо произвести n сложений. При $n > 15 \dots 20$ такое количество операций нельзя провести за обозримый срок на самых быстродействующих современных машинах [4].

По формуле Стирлинга

$$n! \approx (n/e)^n \sqrt{2\pi n}.$$

При $n = 20$ имеем $n! > 2 \cdot 10^{18}$.

Машине, выполняющей 1 млрд операций в секунду, потребуется более 500 лет для того, чтобы получить решение этой относительно простой задачи.

При $n = 30$ количество возможных вариантов превысит 10^{31} . По-видимому, легче пересчитать все песчинки на земном шаре, чем перебрать все эти варианты [4].

Отмеченный прямой путь решения задач программирования – практически невыполнимая работа даже для самых быстродействующих современных вычислительных машин, если даже исследуемая задача имеет сравнительно небольшой размер. Опыт разработки робототехнических систем типа «Virtual Explorer» является тому подтверждением [5; 6].

Следовательно, возникает необходимость в построении такой схемы поиска, которая позволила бы выбирать оптимальный план, не перебирая (а следовательно, и не вычисляя) всех возможных вариантов.

Сегодня возникла проблемная ситуация, которая заключается в противоречии между потребностью в универсальном системном методе разрешения конфликтов в аэронавигационной среде, удовлетворяющем всем концептуальным запросам ее участников, и недостаточными возможностями существующего научно-методического аппарата.

Очевидный путь решения указанной проблемы – это использование естественно-научных системных подходов в качестве основы как для структурной и функциональной организации самой конфликтной среды, так и для регламентации поведения в ней динамических объектов.

Для реального преодоления отмеченных системных и вычислительных проблем в решении конфликтных задач в средах типа CNS/ATM предложено использовать естественно-научный системный подход, основанный на описании реально существующих закономерностей организации «Мира человека». Этот подход нами понимается как полная группа законов организации сложных естественных систем, гарантированно обеспечивающей их существование в форме расширенного сложного конфликта.

Важность такого понимания организации сложных систем обусловлена изначальным конфликтным состоянием любой реальной системы.

Естественно-научный системный подход организации сложных систем

Для обоснования естественно-научного системного подхода организации сложных систем [7] был проведен анализ основных законов организации материи.

Анализ законов микромира, макромира и мегамира показал, что все взаимодействующие компоненты обладают как положительным, так и отрицательным потенциалом и образуют соответствующие силовые поля, ведущие к организации сложных систем.

Принцип функционального гомеостазиса. Анализ исследований сложных распределенных динамических систем, к которым относятся и системы типа CNS/ATM, показывает, что системы управления верхнего (интеллектуального) уровня направлены на решение задач поддержания в рамках АНС потребных функциональных состояний ее элементов (динамических объектов, элементов системы CNS/ATM и т. д.).

Под функциональным состоянием системы в дальнейшем будем понимать такое состояние, которое позволяет ей реализовать совокупность структурных и динамических поведений для целевого выполнения последовательностей взаимозависимых задач (функций) на заданном интервале времени.

Такая постановка задачи полностью соответствует формулировке принципов функционального и технологического гомеостазиса, предложенных В.В. Павловым [8; 9].

Функциональный гомеостазис означает, что свойством системы является обеспечение при решении любой из своих частных или общих задач наличия некоторой совокупности стабильных в определенных пределах своих функциональных поведений в агрессивной среде.

Технологический гомеостазис определяет необходимость поддержания эргатической системой своих существенных поведений в допустимых пределах. Принцип технологического гомеостазиса формально представляет собой частную формулировку принципа функционального гомеостазиса. Технологический гомеостазис подчеркивает ту часть функционального гомеостазиса, которая относится к управлению функциональным состоянием систем.

Применительно к АНС данные принципы означают такое поведение динамических объектов, которое бы обеспечивало решение частных задач всех динамических объектов (Free Flight, Free Route и т. д.) при условии гарантированного разрешения конфликтных ситуаций между ними и обеспечения заданного уровня безопасности полетов.

Данный принцип дает системное понимание безопасности и ответственности всех участников движения за достижение коллективной безопасности.

По своей сути принцип функционального гомеостазиса формулирует проблему обеспечения безопасного движения динамических объектов в АНС, однако он не раскрывает путей решения этой проблемы. Очевидно, что эти пути необходимо искать в физических законах природы.

Рассматривая концепцию Free Flight, по сути декларируем среду, в которой динамические объекты осуществляют броуновское движение. Для обеспечения безопасности движения естественно возникает необходимость его упорядочивания (управления на структурном, динамическом и функциональном уровнях).

Разработанные методы теории управления не позволяют в полной мере решить данную проблему для систем большой размерности, к которым относятся АНС, из-за эффекта «проклятия размерности». Однако существующие в природе системы успешно функционируют, несмотря на то, что их сложность во много раз превышает сложность систем класса CNS/ATM.

Следовательно, решение данной проблемы необходимо искать в закономерных свойствах и способностях естественной природы к интеграции и самоорганизации (синергетике).

Синергетический принцип. Синергетика (от греч. – совместно, согласованно действующий) – это научно-философский принцип, рассматривающий природу, мир, как самоорганизующуюся комплексную систему [10].

Попытки использования самоорганизационного подхода для решения конфликтных задач при УВД в АНС были предприняты М. Эби [11]. В его понимании самоорганизация динамических объектов в АНС осуществляется через индивидуальные действия каждого объекта для достижения своей цели при заданном уровне безопасности, а не через планирование, навязанное на элементы извне. В качестве самоорганизационной модели АНС он предлагает использовать свойства потенциальных электрических полей. Суть этих свойств заключается в наличии сил притяжения между разнородно заряженными частицами и сил отталкивания между однородно заряженными частицами в электрическом поле. В качестве однородно заряженных частиц выступают динамические объекты (самолеты, беспилотные летательные аппараты и т. д.), а их целям (аэродромам, промежуточным пунктам маршрута и т. д.) назначаются противоположные по знаку заряды. Хотя в данном подходе и декларируется использование самоорганизационных свойств потенциальных силовых полей,

однако предложенный метод разрешения конфликтов между динамическими объектами в АНС основан лишь на стандартных геометрических расчетах и не содержит элементов, отражающих физические свойства природы.

Синергетический подход А. Колесникова для синтеза законов управления нелинейными динамическими объектами основывается на процедурах расширения и сжатия фазового пространства [12].

Фундаментальной основой предлагаемых решений выступают законы сохранения. Физический смысл процедуры расширения состоит в том, что для осуществления требуемого (целевого) движения в системе должно быть достаточное количество ресурсов (в общем случае – энергетических ресурсов). Запасы энергетических ресурсов системы должны позволить выполнить возложенные на нее функции и достичь поставленных целей. Введение энергии как дополнительной фазовой координаты в модель управления является сутью процедуры расширения фазового пространства. Введение дополнительных фазовых координат наделяет систему новыми динамическими свойствами. Под действием синтезированного синергетического управления расширенная система уменьшает располагаемое количество степеней свободы, т. е. получает асимптотически устойчивое движение к заданному многообразию в пространстве фазовых состояний.

Сжатие фазового пространства нелинейной системы есть не что иное, как процесс управления с учетом ее внутренних нелинейных динамических свойств.

В термодинамике основоположники синергетического подхода Г. Хакен [13] и И. Пригожин [14] постулируют выделение из общей совокупности параметров сложной системы параметров «порядка». В качестве основных общесистемных параметров «порядка» выступают энергия и энтропия, которые служат системообразующей основой самоорганизации систем.

Анализ существующих синергетических подходов показывает, что достижение самоорганизации и функционального гомеостаза в АНС должно основываться на характеристиках энергетического взаимодействия ее элементов.

Характерным примером реализации принципа самоорганизации в природе является сама материя. Рассмотрим более подробно модель броуновского движения молекул газа как прототип реализации концепции Free Flight, где движущиеся молекулы газа соответствуют движению динамических объектов в АНС.

Общесистемным свойством всех уровней организации материи выступает свойство масштабной инвариантности, позволившее выявить, что свойства всех компонентов системы объективно должны содержать как отрицательные, так и положительные потенциалы (см. таблицу).

Закономерность симметрии в природе

Элементы материи	Знак потенциала	Литературные источники
Атомы	(+), (-)	[15–20]
Молекулы	(+), (-)	[16–23]
Космические тела	(+), ? (-)	[24–27]
Человек	(+), (-)	[28]
Сложные системы	(+), (-)	[29; 30]

До 2010 г. космическим телам приписывался только положительный потенциал, характеризующий их гравитационное притяжение. Последние исследования показали наличие эйнштейновских сил отталкивания при взаимодействии тел в мегамире [24].

Взаимодействие частиц в микромире и макромире. Молекулы газа, находясь в состоянии теплового хаотического движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. В молекулярной физике термин «столкновение» применительно к молекулам не является буквальным и не представляет этот процесс подобным соударению твердых шаров. Под столкновением молекул подразумевается процесс взаимодействия между молекулами на определенном расстоянии, в результате которого молекулы изменяют направление своего движения и модуль скорости [21].

Молекулы взаимодействуют друг с другом на расстоянии и в веществах, находящихся в других агрегатных состояниях (твердых, жидких). Взаимодействие молекул определяется межмолекулярными силами притяжения и отталкивания, которые действуют одновременно. В противном случае тела не были бы устойчивы. Образующие их молекулы разлетались бы в разные стороны или «слипались».

Общий характер зависимости сил взаимодействия от расстояния для любых молекул качественно одинаков. Притяжение действует на больших расстояниях, а отталкивание – на малых. Качественная зависимость сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния r между двумя молекулами показана на рис. 2, где W и F обозначают кривые сил отталкивания и притяжения, а $W+F$ – их результирующая [22].

На критическом расстоянии $r = r_{кр}$ результирующая сила равна нулю, то есть силы притяжения и отталкивания уравниваются друг друга. Это расстояние $r_{кр}$ соответствует равновесному расстоянию между молекулами, на котором они находились бы при отсутствии теплового движения.

Параметр $r_{кр}$ является характерным для взаимодействия молекул, так как на данном расстоянии энергия их взаимодействия достигает минимума. Кривая потенциальной энергии $E(r)$ имеет характерный вид (рис. 2) и носит название «потенциальной ямы» [23].

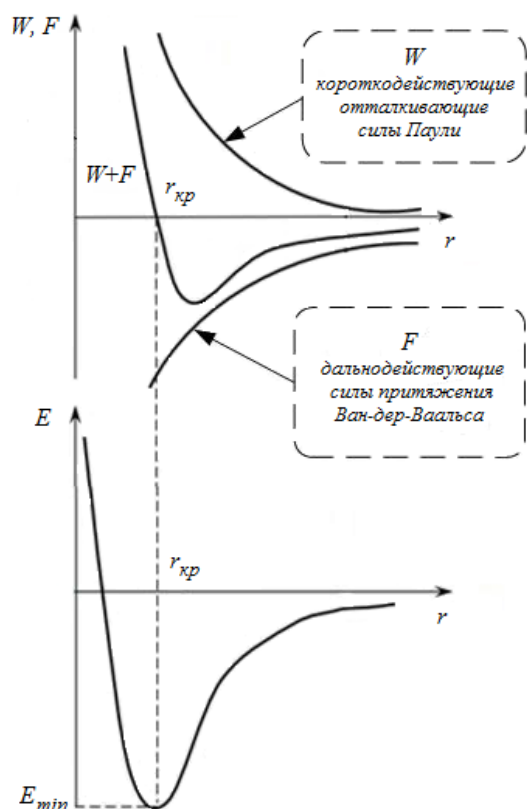


Рис. 2. Зависимость силы и энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними

Таким образом, в общем случае основной критерий структурной устойчивости системы на молекулярном уровне – это минимум потенциальной энергии взаимодействия молекул на расстоянии $r_{кр}$.

В физике кристаллов также рассматриваются различные модели взаимодействия атомов, которые разделяют на взаимодействия притяжения и отталкивания [15–20].

К межатомным взаимодействиям притяжения относят:

– индукционные силы (поляризационный эффект Дебая):

$$U_{инд}(r) = -\frac{k}{r^6},$$

где k – коэффициент, учитывающий поляризационные и другие свойства молекул;

– ориентационные силы (эффект Кeesома):

$$U_{ор}(r) = -\frac{f(T^{-1}, d_i^2, d_j^2)}{r^6},$$

где $f(T, d_i^2, d_j^2)$ – функция от температуры T и дипольных (квадрупольных) моментов d i -й и j -й полярных молекул соответственно;

– дисперсионные силы (эффект Лондона):

$$U_{д}(r) = -\frac{A}{r^6}.$$

К взаимодействиям отталкивания при сближении молекул относят силу Паули:

$$U_{от}(r) = Be^{-Cr}.$$

Таким образом, полная энергия межатомного взаимодействия определяется в общем виде выражением [20]

$$U = -\frac{a}{r^m} + \frac{b}{r^n}. \quad (1)$$

Суммарное межатомное взаимодействие неполярных сферических молекул определяется потенциалом Бакингема:

$$U_{\Sigma} = -\frac{A}{r^6} + Be^{-Cr}$$

или потенциалом Леннарда-Джонса:

$$U_{\Sigma} = -\frac{A}{r^6} + \frac{D}{r^{12}}.$$

Для обеспечения равновесного состояния молекулы функция энергии межатомного взаимодействия должна иметь минимум, определяемый условием $n > m$.

Анализ межатомного взаимодействия показывает, что необходимым и достаточным условием устойчивого равновесного состояния кристалла на суммарной кривой сил притяжения и отталкивания атомов обязательно наличие минимума, который соответствует определенной стабильной конфигурации в расположении атомов кристаллической решетки.

Взаимодействие тел в мегамире. Силы притяжения и отталкивания рассматриваются не только в физике микромира и макромира, но и в физике мегамира, где существуют убедительные аргументы в пользу утверждения, что динамику Вселенной в значительной степени определяют не только гравитационные силы притяжения, но и космологические эйнштейновские силы отталкивания [24–27].

Потенциальная энергия взаимодействия тел в мегамире [24] определяется как

$$E(r) = \frac{L}{r} \left(1 - \frac{r_g}{r} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где r_g – гравитационный радиус световой сферы переменного радиуса r в трехмерном пространстве;

L – удельный угловой орбитальный момент фотонов, отнесенный к скорости света.

Анализ формулы (1) показывает, что потенциальная энергия определяется аналогично формуле (2) двумя составляющими – притягивающей и отталкивающей, что приводит к наличию энергетической ямы с минимумом в точке (r_0, E_0) (рис. 3).

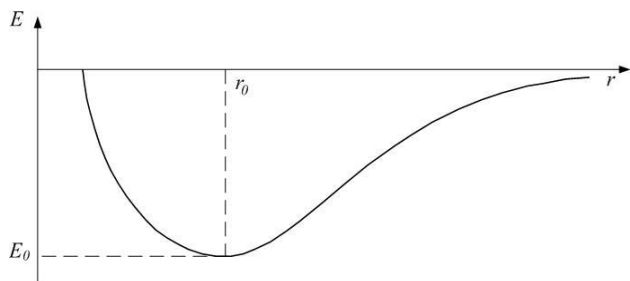


Рис. 3. Зависимость энергии взаимодействия тел в мегамире.

Взаимодействие элементов эргатических систем. Курт Левин для описания поведения человека в конфликтных ситуациях при взаимодействии с окружающим миром обосновал концепцию физического поля. Он выделяет четыре особенности поведения сил психологического поля [28]:

- сила поля исчезает или сильно ослабевает, как только объект попадает в сферу «владений индивида»;

- в некоторых случаях величина валентности (заряда) увеличивается с явной близостью, что выражается как в продолжительности, так и в интенсивности попыток к достижению цели;

- величина сил поля, соответствующих отрицательной валентности, уменьшается намного быстрее с увеличением физического расстояния, чем величина сил поля, соответствующих положительной валентности;

- возможны колебания локомоций вблизи точек равновесия сил, которые называются годологическим конфликтом.

Человек при взаимодействии с окружающим миром также проявляет свойства потенциалов отрицательного и положительного знаков, генерирующих силы отталкивания и притяжения.

Таким образом, в микромире, макромире и мегамире устойчивость системы взаимодействующих динамических элементов достигается при выполнении условия минимума энергии их взаимодействия. В рамках теории эргатических систем этому соответствует правило наименьшего взаимодействия. Истинна лишь та система, в которой некоторая ее подсистема при минимальном своем действии обеспечивает заданный или максимальный уровень эффективности всей системы [29; 30].

Применительно к среде АНС с наличием конфликтующих элементов эффективность системы можно понимать как ее устойчивость, т. е. отсутствие эффекта домино [2; 31]. Это свидетельствует об обеспечении заданного уровня безопасности при условии, что проблема единичных конфликтов будет решена.

Результаты анализа показали, что модели взаимодействия тел в микромире, макромире и мегамире полностью соответствуют принципам функционального гомеостаза и синергетическому подходу для сложных систем и поэтому могут быть использованы в качестве основы для формирования физических и информационных полей в аэронавигационной среде, а также для управления гарантированным безопасным поведением динамических объектов в данной среде.

Интегрированное управление системой конфликтующих динамических объектов в АНС будем рассматривать в рамках концепции виртуальных динамических функциональных систем [31]. В соответствии с данной концепцией полная распределенная нелинейная динамическая система формализуется моделью с стратифицированной структурой, содержащей виртуальную и физическую страты (рис. 4).

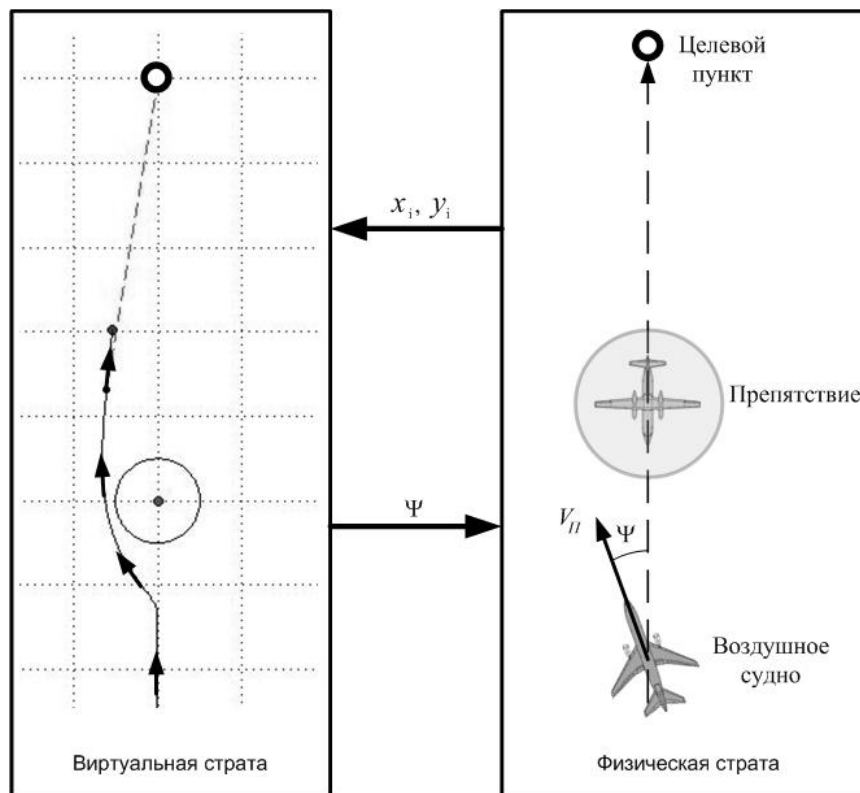


Рис. 4. Стратифицированная структура распределенной нелинейной динамической системы

Формализация виртуальной страты

Определение параметров относительного движения тел, между которыми действуют силы вида (1), в общем случае является сложной задачей. В небесной механике известна задача определения относительного движения N тел (материальных точек), взаимодействующих по закону тяготения Ньютона. Аналитического решения данной задачи в общем виде для $N > 3$ не существует. До настоящего времени было найдено лишь пять точных решений для специальных начальных скоростей и координат тел.

Численные методы решения данной задачи сталкиваются с теми же проблемами, что и аналитические – при тесных сближениях тел необходимо уменьшать шаг интегрирования. Однако при этом быстро растут численные ошибки. Кроме того, при «прямом» интегрировании число вычислений силы растёт приблизительно как N^2 , что делает практически невозможным моделирование систем, состоящих из десятков и сотен тысяч тел. Для получения упрощенных решений этой задачи применяют специальные алгоритмы (алгоритм Ахмада-Коэна, «древесный алгоритм» и др.).

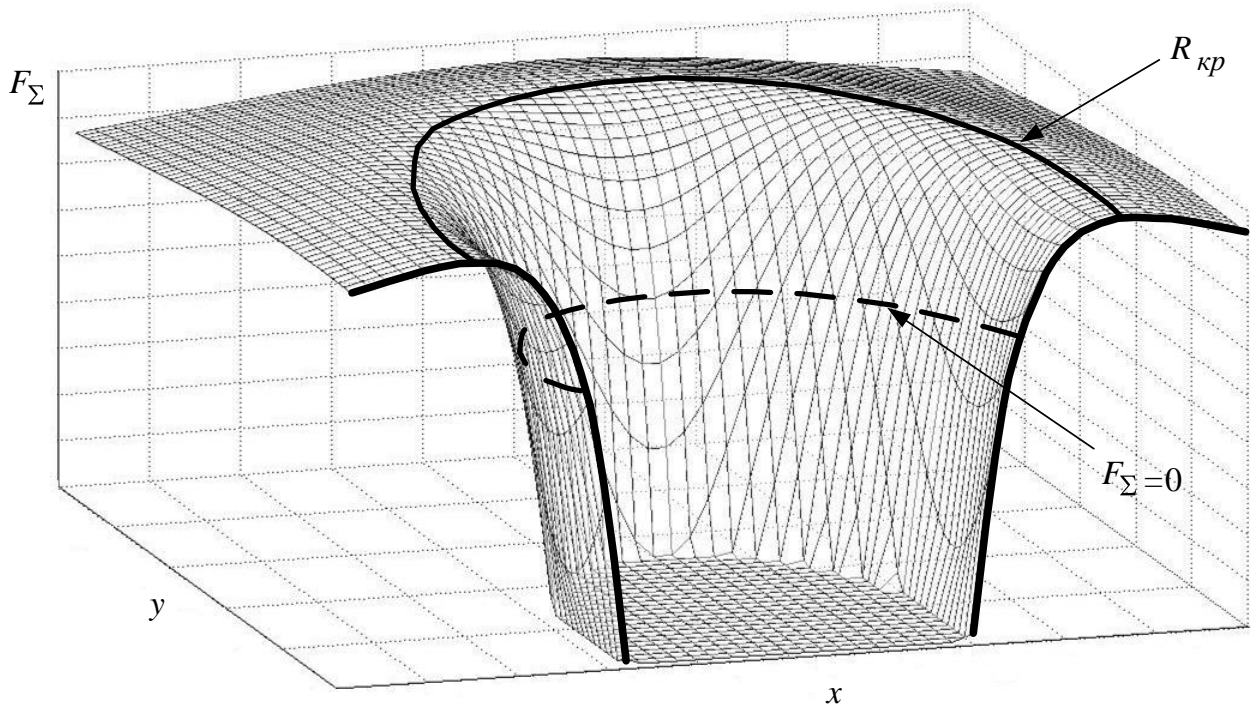
Указанный недостаток численного решения задачи движения N тел устраняется при учете в математической модели гравитационных сил притяжения F и гравитационных сил отталкивания W .

Каждый гравитирующий объект в виртуальной страте представляет собой материальную точку с собственной массой m и является носителем полного набора гравитационных сил (рис. 5).

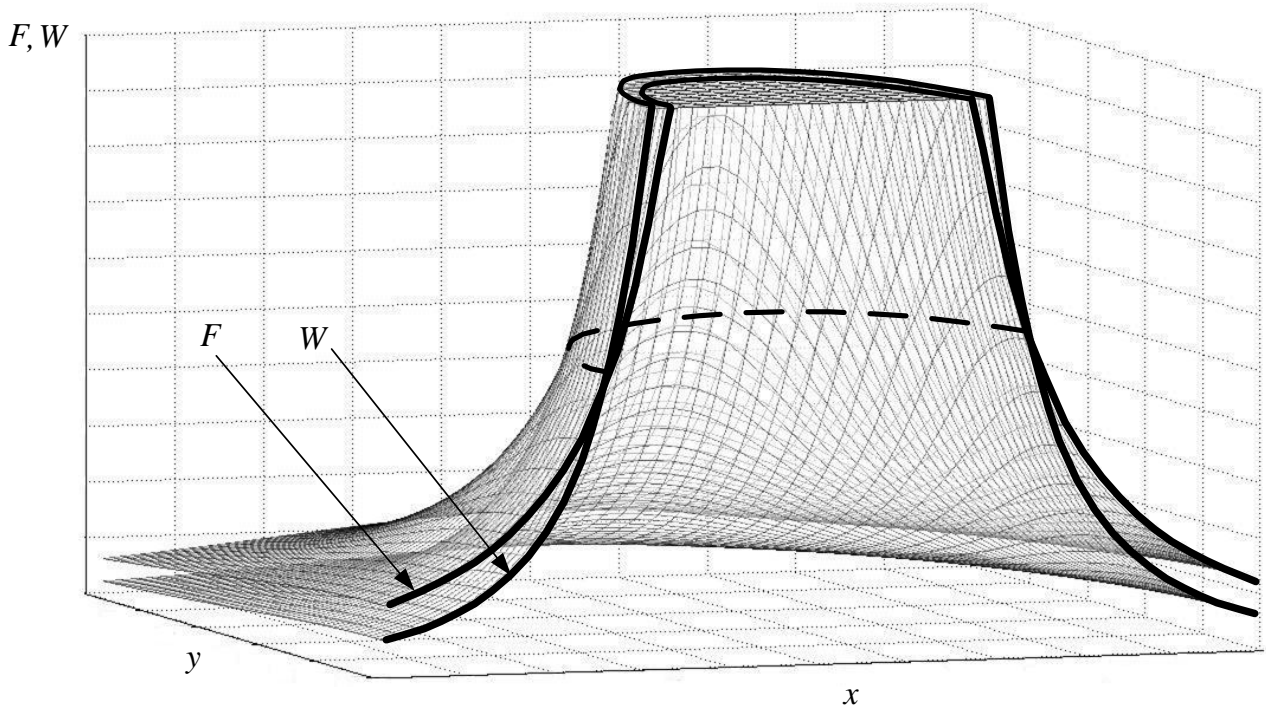
Полный набор гравитационных сил любого объекта виртуальной страты обладает свойством симметрии.

С позиций классической механики симметрия гравитационных полей каждого объекта означает, что положительное гравитационное поле (притягивающее) существует одновременно с отрицательным гравитационным полем (отталкивающим).

Силы притяжения и отталкивания образуют гравитационные поля, которые являются фундаментом реализации синергетического принципа управления – единства возможного и желаемого.



a



б

Рис. 5. Поверхности уровней гравитационных полей:
a – поверхности сил притяжения и отталкивания;
б – результирующая гравитационная сила

Виртуальная страта с позиций классической механики представляет собой полную распределенную динамическую систему гравитирующих объектов. Она образована открытым множеством объектов и является неоднородной. Объекты виртуальной страты имеют различные приоритеты, определяемые их характеристической массой.

Стартовые и финишные позиции каждого динамического объекта являются гравитирующими объектами с массами, существенно превосходящими массы активных (подвижных) элементов виртуальной страты.

Кинематические свойства динамических объектов виртуальной страты определяются энергетическими, технико-экономическими и параметрическими характеристиками соответствующих им в физической страте реальных объектов аэронавигационного пространства, а также физико-механическими свойствами реальной аэронавигационной среды. Движение каждого активного объекта осуществляется в соответствии с располагаемой энергией.

Ограничения на перемещения динамических объектов в виртуальной страте рассматриваются как «плотная» выпуклая совокупность неподвижных гравитирующих объектов.

Динамика системы N гравитирующих объектов (в двумерном случае) в виртуальной страте определяется системой уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= \frac{1}{m_i} \sum_{i \neq j}^N (F_{xij} - W_{xij}); \\ \ddot{y}_i &= \frac{1}{m_i} \sum_{i \neq j}^N (F_{yij} - W_{yij}); \end{aligned} \quad (3)$$

$i \in N, j \in N.$

В системе (3) силы притяжения определяются из выражений:

$$\begin{aligned} F_{xij} &= F_{ij} \frac{|x_i - x_j|}{R_{ij}}; \\ F_{yij} &= F_{ij} \frac{|y_i - y_j|}{R_{ij}}; \end{aligned}$$

$$F_{ij} = \frac{Gm_i m_j}{R_{ij}^n}; \quad (4)$$

$$W_{xij} = W_{ij} \frac{|x_i - x_j|}{R_{ij}};$$

$$W_{yij} = W_{ij} \frac{|y_i - y_j|}{R_{ij}};$$

$$W_{ij} = \frac{Gm_i m_j R_{кр}}{R_{ij}^m}; \quad (5)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2},$$

где x_i, y_i – координаты i -го тела;

R – расстояние между телами;

G – гравитационная постоянная;

m_i – масса i -го тела;

$R_{кр}$ – критическое расстояние между телами,

значение которого выбирается исходя из условий безопасности и бесконфликтности движения динамических объектов в АНС.

В выражениях (4) и (5) отношением n/m выбирается агрегатное состояние аэродинамической среды или синергетическое вещество, которое характеризует степень ее самоорганизации.

Аналогией агрегатного состояния аэродинамической среды может служить агрегатное состояние материи – газообразное, жидкое, кристаллическое и т. д.

Направление движения тел в силовом поле задается угловым положением Ψ виртуального измерителя. В качестве измерителя могут быть использованы маятниковые системы, состоящие из тела маятника с массой m_i , закрепленной на жесткой, не имеющей массы, оси. Второй конец оси является подвесом маятника с координатами, соответствующими координатам динамического объекта в физической страте.

В каждый момент времени виртуальным измерителем производится измерение угла Ψ , который затем передается в физическую страту как управляющий сигнал на отклонение вектора скорости динамического объекта в физической страте.

Формализация физической страты

Динамические объекты (в двумерном случае) в реальной страте описываются системой уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f(V_i, \Psi_i, x_i); \\ \dot{y}_i &= f(V_i, \Psi_i, y_i); \\ x_{0i}(t_0) &\in X_0; \\ x_{ki}(t_k) &\in X_k; \\ y_{0i}(t_0) &\in Y_0; \\ y_{ki}(t_k) &\in Y_k; \\ V_i &\in (0, V_{i\max}); \\ \Psi_i &\in (0^\circ, 360^\circ), \end{aligned} \quad (6)$$

где x_i, y_i – координаты объектов в физическом пространстве;

V_i – вектор скоростей объектов, обусловленный индивидуальными потребностями участников навигационного пространства;

X_0, Y_0 – множество стартовых позиций объектов;

X_k, Y_k – терминальное множество.

Управление объектами осуществляется в кинематической модели (6) выбором величины (модуля) вектора скорости и выбором его ориентации.

Эволюция функционального состояния каждого объекта физической страты существенно зависит от энергии, вложенной в него для целевого функционирования, характера топологии геодезических траекторий движения объекта и определяет интервалы жизненного цикла объекта в виртуальной страте.

Иллюстрацией использования естественно-научного системного подхода для организации и синергии навигационного пространства и управления в нем сложной конфликтной системой типа CNS/ATM является пример синтеза управления двадцатью конфликтующими объектами (летательными аппаратами), использующими принцип Free Flight (рис. 6).

На каждом шаге алгоритм вычисляет допустимое направление, движение по которому обеспечивает минимизацию целевой функции – относительного пройденного летательным аппаратом пути $S_{\text{отн}}$ от точки старта до цели. Тем самым каждый объект «сидит» на своей «брахистохроне», а их совокупность образует сложную синергетическую динамическую систему (рис. 6).

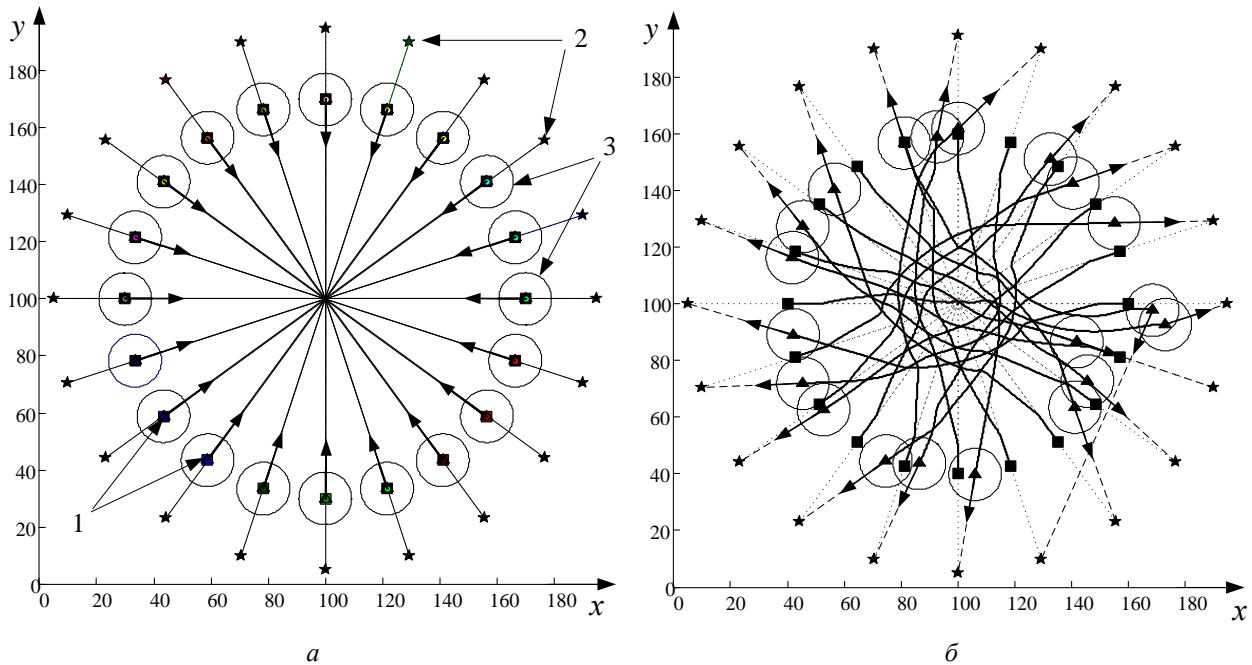


Рис. 6. Поликонфликт подвижных объектов на плоскости:
 а – начальное состояние конфликтующих подвижных объектов;
 б – реализация бесконфликтных траекторий;
 1 – точка старта;
 2 – цель;
 3 – окружность радиуса $R_{\text{кр}}$

Моделирование проводили на компьютере с процессором Intel Core2 с частотой 1,83 ГГц в среде Matlab 7.0. На полигоне 200×200 км моделировался полет 20 самолетов Boeing 747, летящих на высоте 10 000 м со скоростью 800 км/ч. Была выбрана наиболее тяжелая схема конфликта – «звезда».

Результаты моделирования показали, что отношение времени реального полета самолетов к времени моделирования приблизительно составляет отношение 1:8, что свидетельствует о преодолении барьера «проклятия размерности» и практической значимости использования естественно-научного системного подхода для реализации управления всеми объектами в реальном масштабе времени.

Выводы

Теоретически доказана и моделированием подтверждена реальность использования в управлении движением сложной совокупности автономных конфликтующих объектов естественно-научного системного подхода, включающего полную группу виртуальных симметрий навигационного пространства, законов организации эргатических систем (функциональный и технологический гомеостазисы) и законов эксплуатации сложных технических систем (управление функциональным состоянием).

Литература

1. *Analysis of conflict resolution needs of the A³ operational concept* / N. Kantas, J.M Maciejowski, A. Lecchini-Visintini, etc. // iFly Deliverable D5.2. 2011. – 41 p. – Режим доступа: <<http://www.flightradar24.com>>.
2. *Krozel J. Decentralized control techniques for distributed air/ground traffic separation* / J. Krozel, M. Peters // Seagull Technology INC. – 2000. 110 p.
3. *Kuchar J.K. A Review of Conflict Detection and Resolution Modelling Methods* / J.K. Kuchar, L.C. Yang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – December 2000. – Vol. 1, N 4. – P. 179–189.
4. *Юдин Д.Б. Линейное программирование. Теория, методы и приложения* / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
5. *Павлова С.В. Интеллектуальный метод компьютерного построения границы оболочки конуса включения нелинейной динамической системы управления* / С.В. Павлова // Проблемы

управления и информатики. – 2007. – № 2. – С. 30–39.

6. *Павлова С.В. Интеллектуальная стратегия автоматического исследования конуса включений нелинейной динамической управляемой системы в задачах компьютерной геометрии* / С.В. Павлова // Труды шестой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 98.

7. *Энциклопедия кибернетики. Т. 2.* – К.: Гл. ред. укр. сов. энцикл., 1974. – 624 с.

8. *Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления* / В.В. Павлов. – К.: Наукова думка, 1971. – 272 с.

9. *Технические эргатические системы* / В.В. Павлов, А.Н. Воронин, В.Н. Голего, А.М. Мелешев и др. – К.: Вища школа, 1977. – 344 с.

10. *Большой толковый словарь русского языка* / под ред. С.А. Кузнецова. – СПб.: Норинт, 2000. – 1536 с.

11. *Eby M.S. A Self-Organizational Approach for Resolving Air Traffic Conflicts* / M.S. Eby // The Lincoln Laboratory Journal. – 1994. – Vol. 7, N 2. – P. 239–254.

12. *Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. II* / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.

13. *Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам* / Г. Хакен. – М.: Мир, 1991. – 240 с.

14. *Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур* / И. Пригожин, Д. Кондепури. – М.: Мир, 2002. – 464 с.

15. *Преждо В.В. Межмолекулярные взаимодействия и электрические свойства молекул: науч. изд.* / В.В. Преждо, И.П. Крайнов. – Х.: Основа, 1994. – 240 с.

16. *Физическая химия. В 2 кн. Кн. 1: Строение вещества. Термодинамика.* / под ред. К.С. Краснова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1995. – 512 с.

17. *Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство: учеб. пособие для вузов.* – 2-е изд., перераб. и доп. / Б.П. Никольский, Н.А. Смирнова, М.Ю. Панов и др. / под ред. акад. Б.П. Никольского. – Л.: Химия, 1987. – 880 с.

18. Каплан И.Г. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий / И.Г. Каплан. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 312 с.
19. Zhen S. Calculation of the Lennard-Jones n–m potential energy parameters for metals. – Issue 2 / S. Zhen, G.J. Davies // *Physica status solidi*. – Vol. 78, 16 August 1983. – P. 595–605.
20. Коулсон К. Межатомные силы – от Максвелла до Шрёдингера / К. Коулсон // *Успехи физических наук. Из истории физики*. – 1963. – Т. LXXXI, Вып. 3. – С. 545–556.
21. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1970. – 517 с.
22. Векилов Ю.Х. Межатомное взаимодействие и электронная структура твердых тел / Ю.Х. Векилов // *Соросовский образовательный журнал*. – 1996. – № 11. – С. 80–86.
23. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <[http://www.fizika.khstu.ru/files/posob/\\$file/molek.pdf](http://www.fizika.khstu.ru/files/posob/$file/molek.pdf)>.
24. Жилкин А.Г. Об эйнштейновских силах отталкивания / А.Г. Жилкин, В.А. Клименко, А.М. Фридман // *Доклады Академии наук РФ*. – 2010. – Т. 435, № 6. – С. 748–751.
25. Горбунов Д.С. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего большого взрыва / Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. – М.: ЛКИ, 2006. – 464 с.
26. *The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set* / P. Astier, J. Guy, N. Regnault, et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2006. – Vol. 447. – P. 31–48.
27. Лукаш В. Н. Темная энергия: мифы и реальность / В.Н. Лукаш, В.А. Рубаков // *Успехи физических наук*. – 2008. – Т. 178, № 3. – С. 301–308.
28. Левин К. Топология и теория поля: Хрестоматия по истории психологии / К. Левин. – М.: МГУ, 1980. – С. 122–131.
29. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем / В.В. Павлов. – К.: Наукова думка, 1975. – 240 с.
30. Jardin M.R. Air Traffic Conflict Models / M.R. Jardin // *AIAA 4th Aviation Technology Integration and Operations (ATIO) Forum*, 20-22 September 2004, Chicago, Illinois. – P. 1–13.
31. Харченко В.П. Функціональна «віртуальність» – концепція майбутніх CNS/ATM систем / В.П. Харченко, В.В. Павлов, С.В. Павлова // *Вісник КМУЦА*. – 2004. – № 2. – С. 19–23.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2012.