

4. *Нужнов Е.В., Барлит А.В.* Трехмерная упаковка на основе эвристических процедур // Известия ТРТУ. – 2002. – № 3. – С. 95-101.
5. *Berghman L., Leus R., Spijksma F.C.R.* Optimal solutions for a dock assignment problem with trailer transportation // Annals of Operations research. Springer Netherlands, 2011.
6. *Луцан М.В., Нужнов Е. В.* Трехмерная упаковка прямоугольных объектов с определением последовательности их погрузки // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным системам «IS-IT'11». Научное издание в 4-х томах. Т. 3. – М.: Физматлит, 2011. – С. 285-291.
7. *Луцан М.В.* Генетический алгоритм трехмерной упаковки // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: труды VIII-ой Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Таганрог: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2011. – С. 64-69.
8. *Луцан М.В., Нужнов Е.В.* Эвристики интеллектуальных агентов автоматизированного грузового терминала // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 232-237.
9. *Барабанова М.И., Кияев В.И.* Информационные технологии: открытые системы, сети, безопасность в системах и сетях: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2010. – 267 с.
10. *Курейчик В.М., Курейчик В.В., Родзин С.И.* Модели параллелизма эволюционных вычислений // Вестник ростовского государственного университета путей сообщения. Научно-технический журнал. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС. – 2011. – № 3. – С. 91-96.
11. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И.* Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2012. – 260 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

**Луцан Максим Васильевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: maxim.lutsan@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79185682732; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Нужнов Евгений Владимирович** – e-mail: nev@tgn.sfedu.ru; тел.: 88634371625; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

**Lutsan Maxim Vasilievich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: maxim.lutsan@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185682732; the department of computer aided design; postgraduate student.

**Nuzhnov Evgeny Vladimirovich** – e-mail: nev@tgn.sfedu.ru; phone: +78634371625; the department of computer aided design; professor.

УДК 629.733+004.942

**Р.А. Нейдорф, А.А. Болдырева**

### **ОБЪЕМНЫЙ ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМОМ/СПУСКОМ ЧЕЛНОКОВ СИСТЕМЫ МААТ\***

*Анализируются задачи и возможности объемного принципа управления, реализуемого в связи с выполнением проекта МААТ, относящегося к седьмой рамочной программе, финансируемой Евросоюзом. Исследуются физические закономерности подъема тела с переменным объемом под действием естественных Архимедовых сил. Приведены результаты компьютерного эксперимента по исследованию аэродинамических свойств аэростата-челнока при подъеме с различными скоростями. Расчетным путем получен профиль соот-*

\* Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № НШ-1557.2012.10, гранта Евросоюза «МААТ – многоуровневая транспортная система на базе стратосферных дирижаблей» в рамках Седьмой рамочной программы FP7.

ношения скоростей и сил идеального всплывания. Это позволяет оценить экономию энергии активного управления, необходимую для достижения заданных скоростей. Статья иллюстрируется данными экспериментов и результатов расчета энергетических оценок управления всплыванием.

*Система МААТ; аэростат-челнок; аэродинамические свойства; активное управление; идеальное всплывание.*

**R.A. Neidorf, A.A. Boldyreva**

### **THE MAAT SYSTEM FEEDERS ASCENDING/DESCENDING CONTROL VOLUME PRINCIPLE**

*In this article volume control principle tasks and possibilities, which is realized in connection with MAAT project implementation in the Seven framework program, financing by Euro Union, are realized. The physical laws of variable volume body ascending under natural Archimedean forces action are researched. The computer experiment results on aerostat-feeder aerodynamic properties during ascending with different velocities are presented. The velocities and ideal ascending forces ratios profile is received by the calculations. It gives the opportunity to estimate active control energy economy which is necessary for given velocities achievement. The article is illustrated by the data experiments and calculations results of ascending control energetic estimation.*

*MAAT system; aerostat – feeder; aerodynamic properties; active control; ideal ascending.*

**Введение.** Современная реактивная авиация и быстрое увеличение количества авиаперелетов являются существенной составляющей загрязнения окружающей среды. На эту проблему ориентирован проект МААТ, поддерживаемый и финансируемый Евросоюзом в рамках седьмой рамочной программы. Целью этого проекта является обеспечение экологически безопасной и комфортной транспортировки людей и грузов, причем на большие расстояния трансконтинентальных масштабов [1].

Транспортная система МААТ ориентирована на использование летательных аппаратов (ЛА) стратостатного типа на стратосферных высотах. В основу системы МААТ заложен принцип двухуровневой коммуникации. Уровень трансконтинентальных коммуникаций реализуется аэростатом-крейсером, движущимся в стратосфере по энергетически экономным маршрутам. Вспомогательный уровень реализуется универсальными аэростатами-челноками, осуществляющими перевозки людей и грузов между землей на крейсером. Широкий диапазон атмосферных параметров создает проблемы для энергетического обеспечения и управления воздушным судном. В связи с этим челноки являются центральным объектом разработки в системе МААТ.

**Описание базового варианта конструктивной реализации челнока МААТ.** В исходной постановке задачи проекта челнок системы МААТ представляет собой аэростат, имеющий переменный объем всплывания  $V_{вспл}(h)$ , за счет использования эластично-упругих материалов оболочки. Аэростат должен подниматься или опускаться на заданную высоту  $h$  с заданной скоростью подъема  $v_{вспл}(h,t)$ . Ориентировочные конфигурации корпуса аэростата, создаваемые упруго-эластичной оболочкой на разных высотах  $h$ , представлены на рис. 1.

**Постановка задачи исследования подъема челнока МААТ.** Необходимо найти механизм и стратегию управления процессом вертикального перемещения челнока с наименьшими энергетическими затратами. Следовательно, выделяется задача управления подъемом, т.к. управление горизонтальным движением без активной тяги практически маловероятно.

Во всех аэростатах подъемную силу создает "подъемный газ" (ПГ). От его количества и занимаемого в воздухе объема зависит подъемная сила. Этим количеством можно варьировать, чтобы поднимать аэростат с заданной скоростью на заданную высоту. Возникает задача анализа возможностей управления челноком описанной конструкции при подъеме под действием естественных стратостатных сил.



Рис. 1. а, б, в – Модели аэростата-челнока для различных высот

**Условия зависания и движения челнока МААТ.** Условие «идеального подъема» челнока под действием естественных Архимедовых сил имеет вид:

$$F_{\text{сопр}}(h) = F_{\text{вспл}}(h) - G_{\text{челн}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{сопр}}(h)$  – сила аэродинамического сопротивления подъему, зависящая от высоты  $h$ ;  $G_{\text{челн}}$  – вес челнока.

Факторы изменения  $F_{\text{сопр}}(h)$  связаны со значением аэродинамического коэффициента (АДК) сопротивления подъему  $C(h, V)$  [2]:

$$F_{\text{сопр}}(h) = 0.5 \cdot C(h, V, v) \cdot \rho_{\text{возд}}(h) \cdot v_{\text{вспл}}^2(h) \cdot S(h), \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{возд}}(h)$  – функция изменения плотности воздуха с высотой;  $v_{\text{вспл}}(h)$  – скорость подъема челнока;  $S(h)$  – изменяющаяся с высотой площадь горизонтального сечения челнока.

В (2) зависимость плотности воздуха от высоты  $\rho_{\text{возд}}(h)$  имеет вид:

$$\rho_{\text{возд}}(h) = \frac{P_{\text{атм}}(h) \cdot \mu_{\text{возд}}}{R \cdot T(h)}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{атм}}(h) = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu_g \cdot g \cdot h}{R \cdot T(h, t_0)}}$  описывается известной «барометрической формулой» [3];  $\mu_{\text{возд}}$  – молярная масса воздуха;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T(h)$  – функция изменения температуры атмосферного воздуха с высотой.

Челнок имеет переменный объем, а сила всплывания  $F_{\text{вспл}}(h, m)$  зависит от объема, который зависит от высоты и массы ПГ  $m$ :

$$F_{\text{вспл}}(h, m) = V_{\text{вспл}}(h, m) \cdot \rho_{\text{возд}}(h) \cdot g, \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Подставляя зависимости (2) и (4) в (1), и преобразуя, выразим скорость установившегося «идеального подъема» челнока в функции текущих значений высоты подъема, объема и массы ПГ:

$$v_{\text{вспл}}(h, m) = \sqrt{\frac{2g \cdot (V_{\text{вспл}}(h, m) \cdot \rho_{\text{возд}}(h) - M_{\text{челн}})}{C(h, V_{\text{вспл}}, v_{\text{вспл}}) \cdot \rho_{\text{возд}}(h) \cdot S(h)}}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что для получения полностью идентифицированной зависимости  $v_{\text{вспл}}(h, m)$  необходимо найти связь АДК  $C(h, V_{\text{вспл}})$  с  $h$  и  $V_{\text{вспл}}$ . Эта задача может быть решена только экспериментально. Поэтому далее описывается процесс и результаты экспериментального компьютерного исследования аэродинамических свойств челнока при подъеме.

**Описание и результаты эксперимента по исследованию аэродинамических свойств челнока при подъеме.** С помощью OpenFOAM исследовались свойства форм аэростата-фидера, предложенных конструкторами МААТ-проекта. Для этого проведен эксперимент по получению величин АДК при обдуве челнока сверху на высотах: 0, 4, 8, 12 км. При этом проверялся ряд скоростей: 2, 4, 6, 8, 10 (м/с), близкий к возможным скоростям подъема челнока.

Результаты компьютерного моделирования приведены в табл. 1. По столбцам задан диапазон высот полета, объемы челнока, параметры атмосферы, ряд проверяемых скоростей подъема и полученные в результате продувки значения силы и АДК. В строках данных по группе опытов для одной высоты, приводится среднее значение силы и АДК, а также дисперсии и среднеквадратического отклонения (СКО) для АДК.

Таблица 1

**Силы и моменты и АДК челнока при подъеме/спуске**

Высота, $h$ , км	Объем, $V$ , тыс.м <sup>3</sup>	Давление, $P$ , кПа	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость, $v$ , м/с	Сила, $F$ , Н	АДК, $C_y$
0	66,68	101,325	1,225	2	-21562,6	-1,12101
				4	-86967,6	-1,13033
				6	-197104	-1,13857
				8	-352311	-1,14476
				10	-552559	-1,14907
Среднее значение:					-242100,84	-1,136748
Дисперсия:						0,000127055
СКО:						0,011271855
4	98,10	61,600	0,81935	2	-14391,7	-1,11864
				4	-57899,9	-1,12511
				6	-131048	-1,13178
				8	-234193	-1,13771
				10	-367485	-1,14255
Среднее значение:					-161003,52	-1,12831
Дисперсия:						6,805E-05
СКО:						0,008249238
8	158,90	35,652	0,52579	2	-9230,95	-1,11753
				4	-37067,9	-1,12189
				6	-83768	-1,1268
				8	-149574	-1,1317
				10	-234662	-1,13635
Среднее значение:					-102860,57	-1,126854
Дисперсия:						5,631E-05
СКО:						0,007503981
12	287,30	19,399	0,31194	2	-5405,81	-1,1031
				4	-21670,7	-1,10552
				6	-48885,6	-1,10839
				8	-87147,9	-1,11145
				10	-136557	-1,11462
Среднее значение:					-59933,402	-1,108616
Дисперсия:						2,104E-05
СКО:						0,004586451
Среднее значение:					-113179,67	-0,90068
Дисперсия:						0,253616182
СКО:						0,503603299

Анализ самих данных и их статистик показывает, что АДК сопротивления среды всплыванию, хоть и слабо, но зависит, как от высоты полета, так и от его скорости. Поэтому далее результаты опытов для высот 0–12 км используются для математического описания изменения АДК челнока при подъеме.

**Построение аналитической зависимости АДК челнока при подъеме/спуске от его параметров.** Математическая модель АДК ищется в виде многомерной зависимости

$$C_y = f(h, V, v), \quad (6)$$

где  $C_y$  – АДК сопротивления воздуха вертикальному подъему челнока, и для упрощения обозначено  $V = V_{вспл}$ ,  $v = v_{вспл}$ .

Задача решается с использованием аппарата регрессионного анализа в рамках полиномиальной структуры второго порядка

$$C_y(h, V, v) = b_0 + b_1 \cdot h + b_2 \cdot V + b_3 \cdot v + b_{11} \cdot h^2 + b_{12} \cdot h \cdot V + b_{13} \cdot h \cdot v + b_{22} \cdot V^2 + b_{23} \cdot V \cdot v + b_{33} \cdot v^2. \quad (7)$$

Полученные значения коэффициентов приведены в табл. 2. Все коэффициенты значимы. Расчет значений АДК показал хорошую точность аналитической аппроксимации экспериментальной зависимости. Ошибки оценки истинных значений АДК лежат в диапазоне [-0,00113–0,00133].

Таблица 2

Коэффициенты уравнения регрессии										
Обозн-я	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{22}$	$b_{23}$	$b_{33}$
Знач-я	-1,105	0,0015	-0,00017	-0,0046	-0,00014	$3 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$

На рис. 2,а,б построено семейство зависимостей АДК сопротивления подъему от его скорости на исследуемых высотах (0, 4, 8, 12 км) и семейство зависимостей АДК сопротивления подъему от высоты полета при исследуемых скоростях подъема (2, 4, 6, 8, 10 м/с). Жирными сплошными линиями обозначены расчетные зависимости, а контурными значками, соединенными тонкими линиями, – опытные данные. Видна неплохая точность аппроксимации.

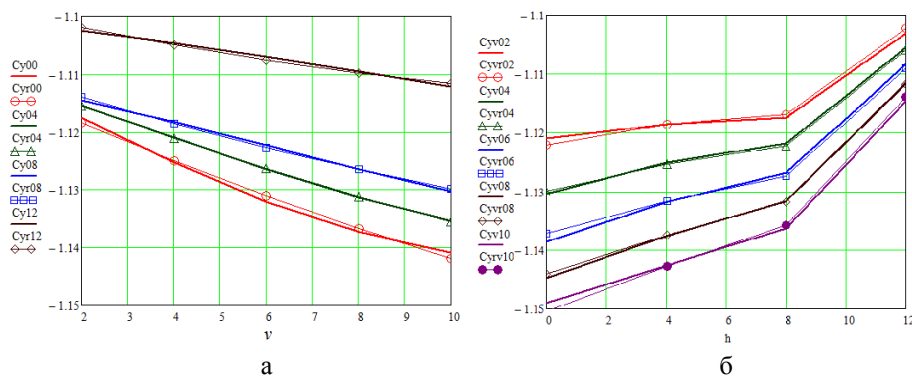


Рис. 2. Зависимости АДК сопротивления подъему челнока от: а – скорости на заданных высотах; б – высоты при заданных скоростях

На рис. 2,а хорошо просматривается отчетливое смещение характеристики для 12 километров к меньшим по модулю значениям АДК. Этот же феномен виден на рис. 2,б, где обозначается явный загиб всех характеристик к меньшим по модулю значениям АДК на диапазоне высот 8–12 километров.

Уравнения динамики подъема челнока известной массы  $M$  и объема  $V$  описываются полностью идентифицированной зависимостью (7):

$$\left. \begin{aligned} \dot{h}(t) &= v(t); \\ M \cdot \dot{v}(t) &= F_m + V(h(t), v(t)) \cdot \rho - M \cdot g + C_y(h(t), V(t), v(t)), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $F_m$  – сила тяги активных двигателей

Из системы (8) можно получить закон управления объемом для использования тяги Архимедовой силы при  $v = const$  и  $F_m = 0$

$$V(h(t), v(t)) = \frac{M \cdot g - C_y(h(t), V(t), v(t))}{\rho}. \quad (9)$$

Энергетический выигрыш от предложенного подхода к управлению подъемом челнока очевиден. Энергия подъема массы  $M$  на высоту 12 километров определится потенциальной энергией и работой преодоления силы аэродинамического сопротивления воздуха  $F_{AD}$ :

$$E = (M \cdot g + F_{AD}) \cdot h, \quad (10)$$

где

$$F_{AD} = 2 \cdot C_y(h, V, v) \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_H, \quad (11)$$

$S_H$  – характерный размер тела, задаваемый при определении АДК.

Преобразуя (7) в (9) и (11) и беря скорость  $v = 5$  м/с, получим выражение для  $F_{AD}$  в функции  $h$ . Подставляя его в (11) и интегрируя, получим экономию энергии от пассивного подъема  $E = 10,53$  ГДж. Это эквивалентно 0,84 тонны топлива, при использовании топливного тонно-эквивалента по нефти в 41,8 ГДж и среднего по высоте КПД активных винтовых двигателей в 30 %.

**Выводы.** Полученные расчетные соотношения позволяют решать задачи управления и анализа энергетики не только подъема, но и спуска. Кроме того, проиллюстрированный подход применим и к боковым силам и моментам. Это позволяет выстроить алгоритм идентификации системы уравнений Эйлера – неизменного атрибута получения математических моделей динамики ЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pshikhopov V., Medvedev M., Neydorf R., Krukhmalev V., Kostjukov V. and other.* Impact of the Feeder Aerodynamics Characteristics on the Power of Control Actions in Steady and Transient Regimes // Доклад и статья на МНК SAE 2012 Aerospace Electronic and Avionics Systems Conference: 2012-01-2112 ISSN 0148-7191 Southern Federal University; University of Hertfordshire 1.
2. *Фабрикант Н.Я.* Аэродинамика. – М., 1964.
3. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. – М., 1958.

Статью рекомендовал к публикации д.т.н., профессор В.А. Фатхи.

**Нейдорф Рудольф Анатольевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Южный федеральный университет; e-mail: ran\_pro@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79034722292; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

**Болдырева Анна Александровна** – Донской государственный технический университет в г. Ростове-на-Дону; e-mail: lenivec88@mail.ru; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: +79034369850; кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; аспирант, ассистент; член Международной дирижабельной ассоциации.

**Neidorf Rudolf Anatol'evich** – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: ran\_pro@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79034722292; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

**Boldyreva Anna Aleksandrovna** – Don state technical university; e-mail: lenivec88@mail.ru; 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: +79034369850; the department of the software of computer facilities and the automated systems; post-graduate student; lecturer; International Airship Association member.

УДК 519.876.5

**А.В. Малков, О.Н. Зенкина, В.И. Помеляйко, И.С. Помеляйко**

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ И МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД НА КУРОРТЕ КИСЛОВОДСК**

*Построена математическая модель геофильтрации и миграции загрязненных грунтовых вод. Задача решается в два этапа. На первом выстраивается естественная пьезометрическая поверхность зеркала грунтовых вод при нулевых значениях техногенных утечек. Искомой величиной является активность инфильтрационного питания в каждом блоке модели. На втором этапе решается задача массопереноса с заданными техногенными нагрузками и дается прогноз распространения ореолов загрязнения на 20 летний период. Для улучшения экологической ситуации предложено создание систематической дренажной системы на наиболее подтопленных городских районах.*

*Математическая модель; фильтрационные свойства; миграция; грунтовые воды; подтопление; засоление.*

**A.V. Malkov, O.N. Zenkina, V.I. Pomelyayko, I.S. Pomelyayko**

### **MATHEMATICAL MODEL MIGRATION AND GEOFI POLLUTED GROUNDWATER HEALTH RESORT KISLOVODSK**

*The paper presents the state data of ground waters federal resort Kislovodsk. Assessed the extent and nature of contamination. Identified and analyzed the main sources of pollutants in the ground water in the city. A mathematical model geofi and migration of contaminated groundwater. The problem is solved in two stages. The ground is built natural piezometric surface the water table at zero values of man-made diversions. The unknown quantity is the activity of infiltration in each block of the model. In the second step we solve the problem of mass transfer with specified development pressure and a forecast distribution of halos pollution by 20 year period. To improve the environmental situation prompted the creation of a systematic drainage system in the most flooded urban areas.*

*Mathematical model; filtration properties; migration; ground water; water logging; salinity.*

Основой сохранения лечебных факторов курорта является удовлетворительная экологическая ситуация городского округа. В рамках проведенного системного анализа экологического состояния территории курорта было оценено состояние всех природных сред [1–3], в том числе, состояние грунтовых вод [4]. Обработка полученной информации осуществлялась при помощи математического моделирования. Задачей моделирования являлся прогноз и динамика ореолов распространения загрязняющих веществ, приуроченных к областям повышенной антропогенной нагрузки.

Предлагается математическая модель, которая позволяет улучшать экологическое состояние подземных вод.