

создания штатной прошивки Измерительного блока. Она выполняется в климатической камере, на специальных оснастках, в зависимости от типа датчика Измерительного блока.

Во время калибровки производится определение масштабного коэффициента и коэффициента смещение нуля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Broadbent M. Powered by the Sun// Air International. – 2014. №3. – С. 90 – 93.
2. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах- М.: Издательство МЭИ, 2005. Том I. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – 2005. – 568 с.
3. Белоцерковский С.М. Введение в аэроупругость – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 384 с.
4. Селенов В.С. Метрологическое обеспечение полетов. Изд. 2 – е, испр. – М.: книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2010. – 192 с.
5. Миртова К.Д. Конструкция и прочность самолетов и вертолетов – М.: Книга по требованию, 2013. – 440 с.
6. Бюшгенс Г.С. Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1995. – 772 с.
7. Пэнкхёрст Р. Техника эксперимента в аэродинамических трубах – М.: Издательство иностранной литературы, 1955 – 654 с.

#### **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕДУРЫ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ САМОЛЕТОВ**

Пань Я.

Научный руководитель: Вавилов В.П., профессор, д.т.н.  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050 E-mail: panytj@163.com

#### **OPTIMIZING PARAMETERS OF NUMERICAL MODELLING OF THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF WATER INGRESS IN AVIATION HONEYCOMB PANELS**

Pan Y.

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Vavilov V.P.  
Tomsk Polytechnic University  
Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: panytj@163.com

*Оптимизированы параметры пространственно-временной сетки при численном моделировании теплового контроля влагосодержания в авиационных сотовых панелях. Использована программа ThermoCalc-2D, реализующая двухмерную модель теплового контроля в цилиндрических координатах. В качестве эталона выбрано аналитическое решение задачи нагрева трехслойной пластины, реализованное в программе Layer-3 Analytic.*

*Parameters of spatial-temporal numerical grid are optimized in the framework of the solution to heat conduction in honeycomb panels containing hidden water. The 2D numerical model in cylindrical coordinates is implemented in the ThermoCalc-2D software, and the Layer-3 Analytic program is used as a reference.*

С увеличением объема использования композиционных материалов в авиакосмической промышленности возрастают требования к технологиям неразрушающего контроля. В авиационной промышленности, выполненные из композиционных материалов сотовые панели составляют основу

конструкции рулей высоты и направления, фюзеляжа и гондол двигателей. Существенным недостатком таких панелей при эксплуатации самолетов является попадание воды в ячейки сот, что вызывает коррозию клеевого слоя и разрушение панелей в целом вследствие циклов замерзания/размерзания. Для обнаружения скрытой воды наиболее перспективен тепловой/инфракрасный метод контроля [1-2]. Однако, в выполненных к настоящему времени исследованиях, включая соответствующие нормативы корпораций Airbus и Boeing, основное внимание уделено качественному обнаружению воды, в то время как оценка массы воды на практике проводится ультразвуковым методом, который является контактным и малопродуктивным. Наши исследования посвящены разработке теплофизического метода оценки массы воды в процедуре активного теплового контроля. Двухмерное моделирование задачи теплового контроля в цилиндрической системе координат выполнено численным методом с использованием неявной конечно-разностной схемы. Вопросы погрешностей численного моделирования хорошо изучены для однородных материалов, в то время как в тепловом контроле целью моделирования является расчет дифференциальных температурных сигналов в зонах дефектов, погрешность расчета которых малоизучена. На рис. 1 показана модель авиационной сотовой панели, использованная для численного анализа.

В реальных изделиях обшивка из стекло- или углепластика представляет большее тепловое сопротивление, нежели слой связующего (эпоксидного клея) и стенки бумажных (бумага Nomex) ячеек. Поэтому модель рис. 1 можно упростить до вида, показанного на рис. 2.

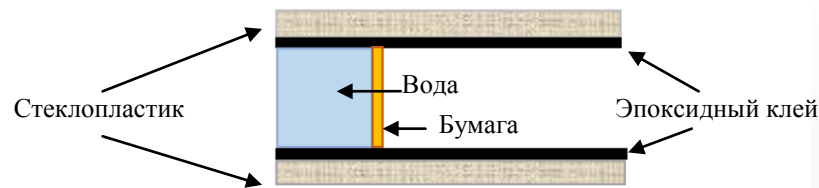


Рис. 1. Модель авиационной сотовой панели

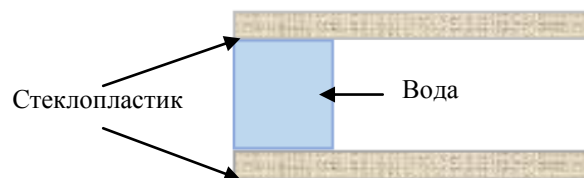


Рис. 2. Упрощённая модель авиационной сотовой панели

Для обнаружения воды применяли активный односторонний тепловой контроль, причем результатом моделирования являлось динамическое температурное поле обшивки во время и после действия теплового импульса. Двухмерная модель, реализованная в программе ThermoCalc-2D, показана на рис. 3: пересечение осей R и Z – центр дефектной зоны; зона 1- вода; зона 2- воздух. Геометрические параметры модели и теплофизические характеристики материалов приведены в Табл. 1 и Табл. 2.

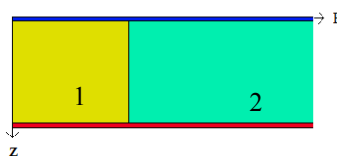


Рис. 3. Двухмерная модель сотовой панели с водой (ThermoCalc-2D)

Таблица 1. Геометрические параметры образца и характеристики теплообмена на наружной поверхности

Радиус дефекта	5 см	Толщина сотовой панели	13 мм
Радиус образца	15 см	Мощность стимуляции	10000 Втм <sup>-2</sup>
Толщина обшивки	0.5 мм	Коэффициент теплообмена на поверхности панели	10 Втм <sup>-2</sup> °С <sup>-1</sup>

Таблица 2. Теплофизические характеристики материалов

Материал	Теплопроводность, Втм <sup>-1</sup> °С <sup>-1</sup>	Температуропроводность, м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>
Стеклопластик	0.3	1.3e-7
Воздух	0.07	2.29e-5
Вода	0.59	1.4e-7

Очевидным результатом моделирования является констатация факта, что амплитуда и динамика температуры зависят от влагосодержания. В качестве информативных параметров выбрали максимальный температурный сигнал  $\Delta T_m$  и время его появления  $\tau(\Delta T_m)$ , а также максимальный контраст температуры  $C_m = (\Delta T/T)_m$  и время его появления  $\tau(C_m)$  [3]. Целью нашего исследования явилась оптимизация шагов пространственной сетки по координатам R и Z, а также шагов временной сетки.

При выбранных размерах сотовой панели и дефекта диффузия тепла по направлению R незначительна, иными словами, дефектная и бездефектная зоны не влияют друг на друга, и теплопередача является одномерной по координате Z. Для одномерной трехслойной пластины, нагреваемой прямоугольным тепловым импульсом, имеется аналитическое решение, реализованное в программе Layer-3 Analytic (разработка Томского политехнического университета). Оптимальные шаги дискретизации обеспечивают минимальное различие аналитических и численных результатов (см. Табл. 3).

Таблица 3. Результаты аналитического и численного решений при оптимальных шагах дискретизации пространственно-временной сетки

Решение	$\Delta T_m, ^\circ\text{C} (\tau_m, \text{с})$	$C_m (\tau_m, \text{с})$
Аналитическое	-31.47, (10.92)	-0.8961, (46.77)
Оптимальное численное	-31.33, (11.00)	-0.8945, (46.70)

Оптимальное численное решение получено методом проб и ошибок при шаге дискретизации по направлению R, равным 0.3 мм, по направлению Z - 0.02 мм и шаге по времени - 0.1 секунды. Значение выполненного исследования состоит в том, что для решения практических задач теплового контроля воды, в том числе, малой массы, аналитическое решение непригодно, а применение численного метода требует выбора оптимальных параметров расчета. Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для разработки алгоритма количественного определения воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Vavilov, A. Klimov, D. Nesteruk. Detecting water in aviation honeycomb structures by using transient IR thermographic NDT. Proc SPIE "Thermosense-XXV", 2003, Vol. 5073, pp. 345-354.

2. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Григорьев С.В. (2002). Тепловизионный контроль воды в авиационных неметаллических сотовых конструкциях. *Изв. ТПУ*, 305(5), 118-122.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ.ред. В.В. Ключева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. /В.П. Вавилов. Кн. 2:Электрический контроль. /К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужижский. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.: ил.и цветная вкладка 24 с.- 17 с.

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ  
И ДИАГНОСТИКИ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Панычев С.А., Гузик В.Ф., Самойленко А.П., Панычев А.И.

Научные руководители: Гузик В.Ф., профессор, д.т.н; Самойленко А.П., доцент  
Южный федеральный университет, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности  
Россия, г. Таганрог, Некрасовский пер., 44, 347928  
E-mail: ruu2011@mail.ru

**INTEGRATION OF HARDWARE AND SOFTWARE FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS  
ONBOARD SPACECRAFT CONTROL COMPLEX**

Panychev S.A., Guzik V.Ph., Samoilenko A.P., Panychev A.I.

Scientific Supervisors: Prof., Dr. Guzik V.Ph.; As. Prof. Samoilenko A.P.  
Southern Federal University, Institute of Computer Technology and Information Security  
Russia, Taganrog, Nekrasovsky, 44, 347928  
E-mail: ruu2011@mail.ru

*Показана актуальность проблемы совершенствования средств контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата. Предложена методология синтеза самодиагностирующегося автомата контроля работоспособности в базе порядковой логики, основным элементом которого является реляторный процессор, функционирующий по алгоритму «дейзи-кольцо». Приведен марковский граф состояний, позволяющий описать изменения вероятностного состояния диагностируемого комплекса системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена.*

*The urgency of the problem of improving the means of control and diagnostics of onboard spacecraft control complex is shown. The methodology of synthesis of self-diagnosing performance control machine in the basis of ordinal logic, the main element of which is the relator processor that operates according to the algorithm «daisy-ring» is proposed. An Markov state graph that allows you to describe the changes in the state diagnosed probabilistic complex system by means of Kolmogorov-Chapman differential equations is given.*

Отказоустойчивость бортового комплекса управления космического аппарата (БКУ КА) обеспечивается аппаратными и программными методами контроля работоспособности и локализации отказавшего элемента с последующим его замещением одним из способов резервирования [1-3]. Всякое резервирование предполагает введение в систему аппаратной, временной, информационной, программной избыточности. В связи с жесткими ограничениями на массу, габариты, энергопотребление КА живучесть БКУ должна достигаться комплексированием аппаратно-программных средств, гарантирующим решение диагностической задачи при минимальной степени избыточности.

БКУ КА относятся к классу объектов, параметры которых наряду со случайным изменением внутри регламентируемых допусков имеют тенденцию к случайным выбросам значений в сторону увеличения или уменьшения. Диагностическая модель БКУ КА отображается  $N$  контролируемыми параметрами  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, N}$  с соответствующими допусками  $[x_i^H, x_i^B]$ , каждый из которых представляет собой случайную функцию  $x_i(t, \xi_i, S_i)$  времени  $t$ , режима функционирования  $\xi_i$ , динамического состояния  $S_i$ -го элемента системы и других флуктуационных факторов. Наступление сбоев и отказов БКУ КА может