

MATHEMATICAL MODELING OF ULTRASONIC SENSOR TO REALIZE MICROPROCESSOR SYSTEM FOR HIGH-TEMPERATURE PRODUCTS SCANNING

A method of ultrasonic sensors calculation is considered. The mathematical modeling of ultrasonic sensor for high-temperature products scanning is offered. The additional recommendations for microprocessor system formation for high-temperature products scanning are given.

Keywords: ultrasonic, modeling, microprocessor, sensor.

УДК 629.78.048.7.001.24

Е. Н. Васильев, В. В. Деревянко

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПАНЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Представлен программный комплекс, реализующий вычислительную модель радиационно-кондуктивного теплообмена, предназначенную для расчета температурных режимов теплонагруженных бортовой аппаратурой панелей перспективных космических аппаратов негерметичного исполнения. Пользовательский интерфейс и средства ввода-вывода информации в программном комплексе построены на основе XML-технологии.

Ключевые слова: теплообмен, численное моделирование, XML-технология, космический аппарат.

Современный подход к проектированию космических аппаратов (КА) предполагает снижение затрат на проведение экспериментальных тепловакуумных испытаний образцов КА и предъявляет повышенные требования к точности компьютерного моделирования температурных режимов блоков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и теплового состояния элементов конструкции в реальных условиях эксплуатации в космическом пространстве, в том числе в нештатных ситуациях. Для выполнения данной задачи необходима разработка компьютерных моделей для получения полной и точной информации о тепловом режиме всех элементов и узлов КА, при этом вычислительный алгоритм, интерфейс и программные средства ввода-вывода должны быть универсальны и удобны в использовании.

Перспективные космические аппараты негерметичного исполнения представляют собой конструкцию, состоящую преимущественно из плоских панелей, на которых размещена РЭА [1]. Тепловой режим КА зависит от его компоновки, параметров орбиты, распределений источников и стоков теплоты, разнообразных тепловых связей и термических сопротивлений стыков. Условия теплового баланса КА определяют температурный режим бортовой аппаратуры, который в свою очередь влияет на эксплуатационные характеристики и рабочий ресурс РЭА. Общая картина температурных полей всей конструкции КА может быть создана с помощью моделей тепловых режимов, учитывающих совокупность физических факторов, которые влияют на процесс теплообмена [2; 3]. В то же время вычисления для крупномасштабных объектов в таких моделях проводятся на сравнительно

грубой расчетной сетке, поэтому в них невозможно адекватно описать узлы и элементы, имеющие малые размеры, и учесть влияние зон локального тепловыделения. Для достижения более высокой детализации при моделировании процессов теплообмена и получения подробных температурных распределений расчеты необходимо проводить на мелкой разностной сетке.

Поскольку конструкция КА негерметичного исполнения включает достаточно большое количество различных прямоугольных панелей, то компьютерная вычислительная программа должна быть унифицирована для расчета панелей, отличающихся геометрическими размерами и комплектацией, и иметь интерфейс, позволяющий при проведении серийных расчетов максимально упростить процедуры перенастройки вычислительной программы, ввода исходных данных, обработки и анализа результатов.

Тепловой режим панели определяется теплопроводностью материала, мощностью тепловыделения и условиями теплообмена на границах. Проблемы, возникающие при разработке вычислительной программы для его моделирования, связаны с тем, что панели могут иметь сложную конструкцию, включающую применение материалов, имеющих переменные теплофизические свойства и радиационные характеристики; использование элементов с направленными теплопередающими свойствами (тепловых труб); наличие отверстий и вырезов. Кроме того, панели могут иметь разнообразные тепловые связи с другими узлами и элементами конструкции КА.

В общем случае для определения теплового режима панели необходимо решать задачу, описывающую про-

цесс теплообмена с учетом геометрических параметров панели, теплофизических свойств материалов, тепловыделения блоков РЭА, термических сопротивлений стыков, теплопереноса в тепловых трубах и радиационной энергии, которая подводится на поверхность панелей за счет излучения Солнца и солнечных батарей, а отводится посредством излучения в космическое пространство.

Авторами была поставлена цель – разработать программный комплекс на базе современных средств программирования и эффективных вычислительных алгоритмов, предоставляющих пользователю удобный интерфейс для работы и позволяющих проводить расчет тепловых режимов различных конфигураций и комплектаций панелей. Удобство использования программного комплекса подразумевает наличие возможности как визуального, так и прямого редактирования параметров конфигурационного файла задачи, а также визуализации результатов расчетов и их программной обработки. Важным моментом должна быть простота адаптации комплекса для решения других вычислительных задач, подобных исходной по конфигурации.

Схема реализации программного комплекса. При проектировании программного комплекса ставились две основные задачи:

- первая задача – предоставить пользователям комплекса удобный интерфейс, позволяющий изменять значения любых параметров конструкции без перекомпиляции программного комплекса; редактировать значения параметров как напрямую, в конфигурационном файле, так и через графический интерфейс; визуализировать геометрию узлов исследуемой конструкции КА и редактировать размеры и расположение узлов с помощью компьютерной мыши;
- вторая задача – обеспечить простоту использования комплекса для решения аналогичных вычислительных задач. В подобных задачах, в частности, могут варьироваться количество панелей, входящих в исследуемую конструкцию КА; состав узлов, размещенных на каждой панели; детальность описания каждого узла конструкции; вычислительные алгоритмы, используемые в расчетах; набор и детальность получаемых вычислительных результатов.

Вычислительный комплекс должен быть адаптирован ко всем подобным изменениям при минимальных усилиях, а именно: чтобы при адаптации изменялись только конфигурационные файлы и проводилась соответствующая доработка вычислительного алгоритма.

Для решения поставленных задач программный комплекс построен таким образом, чтобы интерфейсная и вычислительная части были в нем полностью разделены и максимально независимы друг от друга, а все параметры вычислительной задачи описывались с помощью отдельного конфигурационного файла. Такое построение достигнуто за счет использования двух современных технологий программирования: модели компонентного программирования COM и языка разметки данных XML. В качестве формата конфигурационного файла выбраны RSD-схемы, построенные на основе XML.

Программный комплекс реализован на языке C++ и включает четыре независимых программных компонента:

- вычислительную процедуру, реализующую модель радиационно-кондуктивного теплообмена;

- модуль управления вычислениями, предоставляющий графический интерфейс пользователя. Он позволяет выполнять операции открытия, редактирования и сохранения конфигурационного файла задачи, запуска, останова и отслеживания хода выполнения вычислений, просмотра результатов вычислений и т. д.;

- визуализатор результатов, позволяющий просматривать результирующее температурное поле как в числовом, так и в графическом виде;

- визуальный редактор конфигурационного файла задачи.

Модуль управления вычислениями является основным приложением, к которому остальные компоненты подсоединяются через COM. Обмен данными между компонентами комплекса организован на основе формата XML.

Главной особенностью программного комплекса является использование RSD-схемы для описания параметров вычислительной задачи. RSD-схема – это специальный XML-формат, разработанный для описания структуры конфигурационных файлов. RSD-схема позволяет задать детальную информацию для каждого параметра: тип, краткое описание, значение по умолчанию, флаги, указывающие на возможность просмотра и изменения значения данного параметра пользователем и т. п. Набор кодогенераторов и программных компонентов (рис. 1) существенно упрощает использование и обработку RSD-схем. По сути, RSD-схемы заменяют собой традиционные ini-файлы, существенно расширяя при этом их возможности.

При использовании ini-файлов для хранения настроек приложения всегда возникает ряд проблем:

- отсутствие типизации данных;
- сложности с кодировкой;
- необходимость вручную реализовывать в приложении функции считывания и записи данных в файл;
- отсутствие встроенной поддержки документирования параметров конфигурационного файла;
- отсутствие стандартного визуального редактора параметров;
- сложность изменения набора параметров конфигурационного файла при переходе к новой версии программы;
- слабая поддержка параметров, содержащих списки данных.

Все эти проблемы приходится каждый раз решать заново. Более того, любые изменения в наборе конфигурационных параметров неизбежно приводят к необходимости перекомпиляции приложения и корректировки его интерфейса.

Применение RSD-схем значительно упрощает процесс реализации настроек в приложении. Для этого необходимо лишь составить RSD-схему, описывающую требуемый набор конфигурационных параметров. Все остальные проблемы решаются автоматически:

- с помощью кодогенератора на основании RSD-схемы генерируется файл настроек. Это обычный текстовый файл XML. Его использование автоматически решает проблему с кодировками;
- с помощью кодогенератора на основании RSD-схемы генерируется заголовочный файл C++, содержащий

класс настроек задачи и задающий константы для каждого параметра конфигурации. Пользователь подключает к программе два заголовочных файла: сгенерированный файл и библиотеку шаблонных классов RSD, реализующую необходимый функционал для работы класса настроек. Класс настроек уже содержит код для считывания и записи параметров конфигурационного файла;

- для визуального редактирования конфигурационных файлов RSD используется программный компонент RsdConfig. В нем заложена возможность работы с RSD-схемами и предоставляется отдельный интерфейс редактирования для элемента каждого возможного типа. Кроме того, RsdConfig не зависит от конкретного содержания RSD-схемы, благодаря чему он не требует перекомпиляции при внесении изменений в состав параметров конфигурации задачи;

- комментарии к параметрам конфигурации прописываются в RSD-схеме один раз, но используются они многократно: во-первых, комментарии заносятся собственно в файл настроек, так что если возникнет необходимость отредактировать файл вручную, то будет понятно, что каждый параметр описывает; во-вторых, они вносятся в код программы, что существенно упрощает кодирование вычислительной процедуры; в-третьих, они показываются при визуальном редактировании в RsdConfig;

- компоненты RsdConfig поддерживает возможность подключения внешних редакторов для элементов любого типа. Например, для визуализации параметров, описывающих конструкцию и комплектацию панели, разработан специальный редактор, позволяющий редактировать геометрические параметры объектов визуально с помощью мыши;

- все результаты расчетов записываются в конфигурационный файл согласно RSD-схеме. Визуализатор результатов также работает на основе RSD-схемы и не зависит от других компонентов комплекса. Поэтому для настройки параметров вывода результатов достаточно правильно настроить RSD-схему.

Помимо описанных выше, RSD-схемы позволяют решать также и ряд других проблем: автоматическое совмещение файлов конфигурации двух разных версий, раздельное генерирование отладочной и релизной версий файлов в процессе автосборки и т. д.

На практике подобное построение программного комплекса позволяет достичь высокой гибкости. Во-первых, любой компонент может быть заменен аналогом, обладающим, например, более богатой функциональностью. При этом перекомпиляции остальных компонентов не требуется. Во-вторых, набор параметров решаемой задачи полностью задается RSD-схемой. Поскольку интерфейсные компоненты не зависят от содержания RSD-схемы, то для адаптации комплекса к другой вычислительной задаче необходимо изменить только две составляющие комплекса: RSD-схему и связанную с ней вычислительную процедуру. Интерфейсные компоненты при этом изменять не нужно.

Однако применение данного программного комплекса имеет и свои ограничения. В частности, при переходе к другому классу вычислительных задач может потребоваться изменение интерфейсных компонентов. Например, при переходе к трехмерной задаче необходима разработка другого визуализатора, а для динамической визуализации промежуточных результатов расчета потребуется другой модуль управления. Поэтому в общем случае можно говорить о том, что подобный вычислительный комплекс предоставляет инфраструктуру лишь для заданного класса вычислительных задач, в нашем случае – для двумерных нестационарных задач теплопроводности.

Описание вычислительной процедуры. Вычислительная модель в программном комплексе реализована в виде отдельного программного компонента – вычислительной процедуры. Входными данными для нее служит подготовленный конфигурационный файл с параметрами вычислительной задачи. Результаты расчетов записываются в этот же файл.

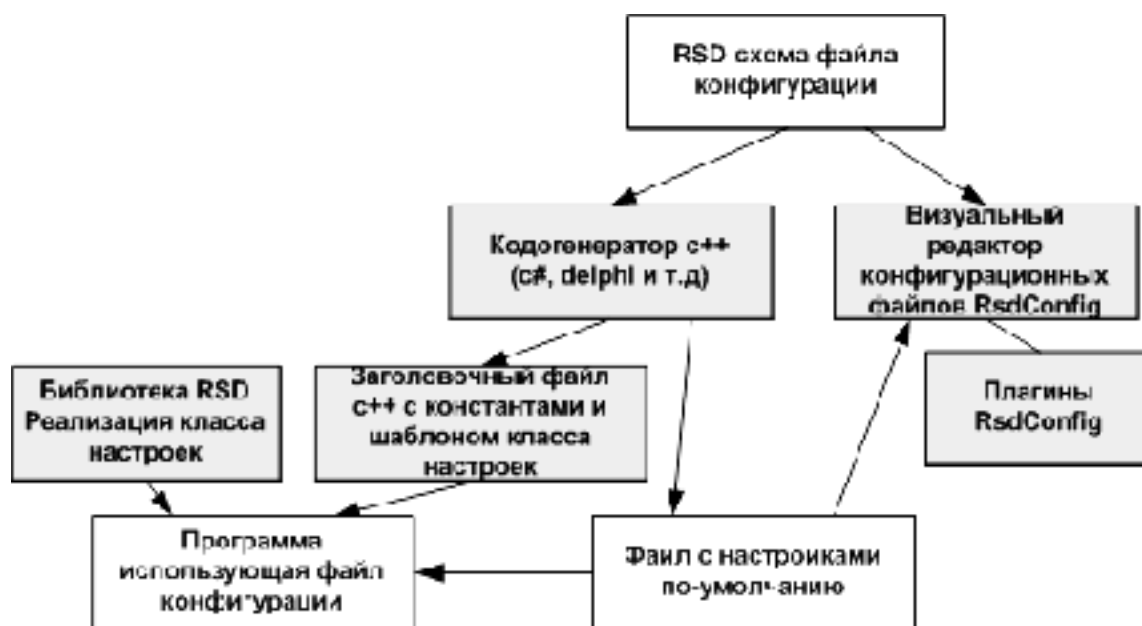


Рис. 1. Набор кодогенераторов и программных компонентов

Для решения поставленной задачи реализует следующая математическая модель.

Распределение температурного поля определяется по численному решению нестационарного уравнения теплопроводности с переменными коэффициентами:

$$\begin{aligned} c_v(x, y) \rho(x, y) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ + q_v(x, y, t) - \alpha_v(x, y, t) T, \end{aligned}$$

где c_v – удельная объемная теплоемкость материала; ρ – плотность; T – температура; λ – теплопроводность; t – время; x, y – пространственные координаты; q_v – объемная плотность теплового потока от источников тепла; α_v – объемная плотность теплового потока стоков тепла. При этом используются граничные условиями третьего рода

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{x=0, L} = q|_{x=0, L}$$

и условие сопряжения на тепловых стыках

$$(T_1 - T_2) = Rq.$$

Это условие определяет величину и направление тепловых потоков, перетекающих через тепловой стык, который имеет термическое сопротивление R и значения температуры по обе стороны стыка T_1 и T_2 . Начальное условие имеет вид

$$T|_{t=0} = T_0(x).$$

Для описания радиационного теплообмена используется приближение серого тела, основанное на законе Стефана–Больцмана: $\varepsilon \sigma T^4(x, y, t)$. Суммарный тепловой поток на поверхности панели определяется выражением

$$q_v(x, y, t) = \frac{q_p(x, y) + q_r(x, y) - \varepsilon \sigma T^4(x, y, t)}{\delta_s},$$

где q_p – поток тепла, попадающий на поверхность панели от блоков РЭА; q_r – распределение падающего радиационного потока от внешних источников; δ_s – толщина панели.

Использование нестационарного двумерного уравнения теплопроводности с переменными коэффициентами теплоемкости и теплопроводности дает возможность описывать широкий круг практических задач, в том числе определять тепловые режимы панелей сложной конструкции с разнообразными тепловыми связями с элементами КА и окружающей средой.

Численная реализация нестационарной задачи теплопроводности проводится методом конечных разностей по экономичной аддитивной неявной локально-одномерной схеме [4]. Алгоритм расщепления по пространственным координатам позволяет задавать анизотропию коэффициента теплопроводности для описания направленного переноса теплоты с помощью тепловых труб.

Порядок работы с программным комплексом. Порядок работы пользователя с комплексом следующий. После запуска программы (рис. 2) либо создается новая задача с параметрами по умолчанию, либо открывается ра-

нее сохраненный конфигурационный файл задачи и редактируются параметры панели (рис. 3). Затем дается команда выполнения вычислений (рис. 4). По завершению расчетов имеется возможность просмотра результатов вычислений в визуализаторе (рис. 5) и сохранения результатов расчета в файле (при необходимости).

Универсальный редактор параметров (см. рис. 3) позволяет изменить значение любого параметра задачи, в том числе параметров тепловыделяющих элементов, размещенных на панели. Специальный дополнительный программный компонент, подключаемый к RsdConfig, дает возможность выполнять такое редактирование в визуальном режиме. Каждый элемент отображается на панели в виде прямоугольника, размеры и координаты которого можно редактировать с помощью мыши (см. рис. 5).

После завершения расчетов результаты сохраняются в XML-файле, имеющем ту же структуру, что и файл конфигурации задачи. Поэтому при обработке файла результатов может быть использована исходная RSD-схема. Кроме того, программа обработки имеет автоматический доступ не только к рассчитанным значениям, но и к исходным значениям всех параметров задачи.

Результатом математического моделирования является двумерное поле температуры панели и значения температуры расположенных на ней элементов и блоков. Результаты могут просматриваться как в численном, так и в графическом виде (см. рис. 5). В окне визуализатора отображается результирующее температурное поле с указанными позициями тепловыделяющих элементов. Справа отображается шкала температур, внизу – координаты и значение температуры в позиции, на которую указывает курсор мыши, слева показан полный список элементов панели и представлена подробная информация о выделенном элементе.

В приведенном на рис. 5 примере вывода результатов расчета температурного поля панели максимальные значения температуры соответствуют посадочным местам тепловыделяющих элементов, минимальные значения – местам тепловых контактов с внешними элементами. В целом распределение температуры отражает совокупное влияние следующих физических факторов: переноса теплоты механизмом теплопроводности, тепловыделения элементов, стока теплоты в местах контактов и на границах, теплообмена излучением с внешней средой.

Помимо теплового проектирования панелей КА, представленный программный комплекс может быть использован при разработке других технических устройств, имеющих аналогичные условия теплообмена и плоскую конструкцию, например радиоэлектронных блоков и плат.

Разработанный авторами программный комплекс позволяет решать разнообразные задачи теплообмена, возникающие при тепловом проектировании РЭА и отсеков КА, и получать полную и точную, практически важную информацию о температурном поле панели при различных условиях. Применение XML-технологии позволяет добиться гибкости интерфейса и удобства работы при вводе и выводе информации. Предложенный подход может быть применен при вычислительном моделировании широкого круга задач в различных областях науки и техники.

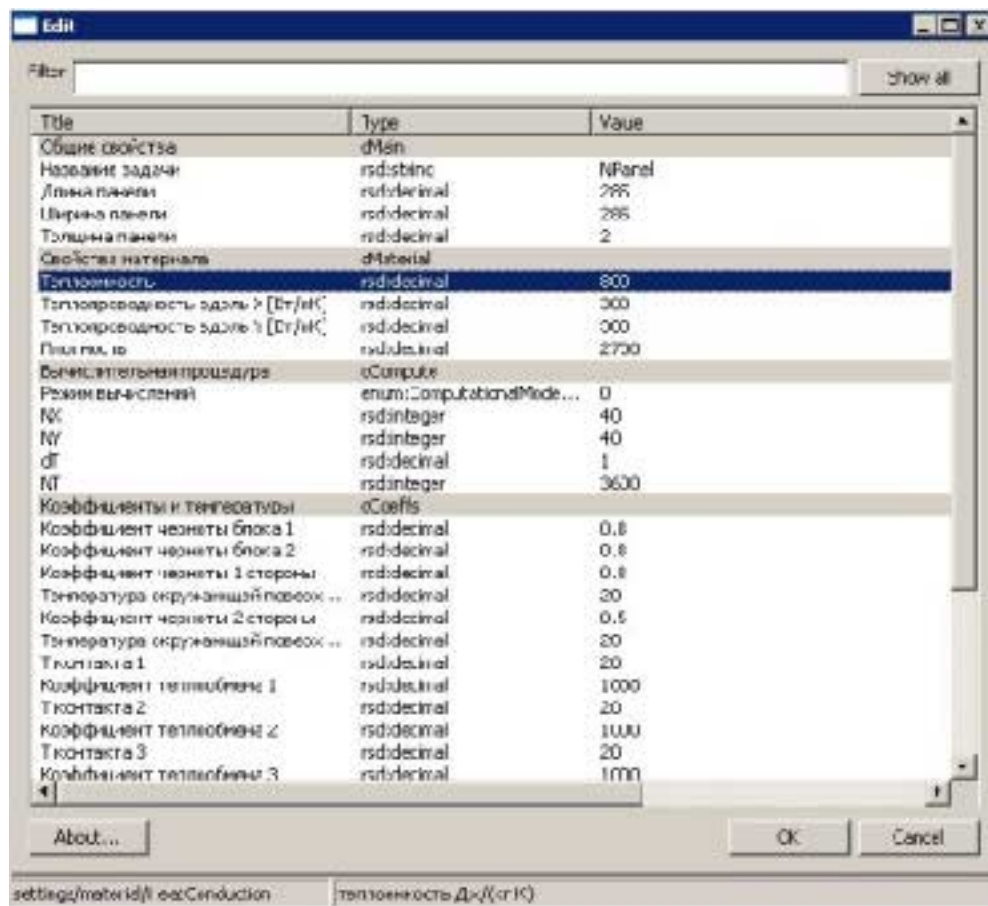


Рис. 2. Запуск программы

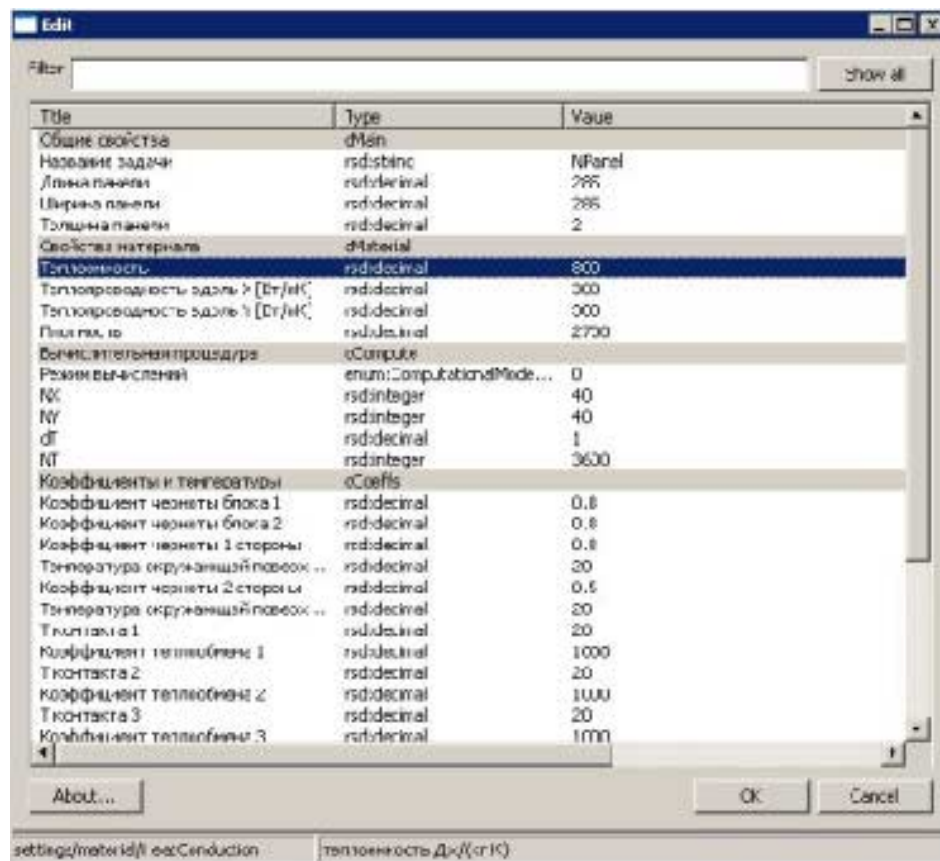


Рис. 3. Ранее сохраненный конфигурационный файл задачи и редактируемые параметры панели

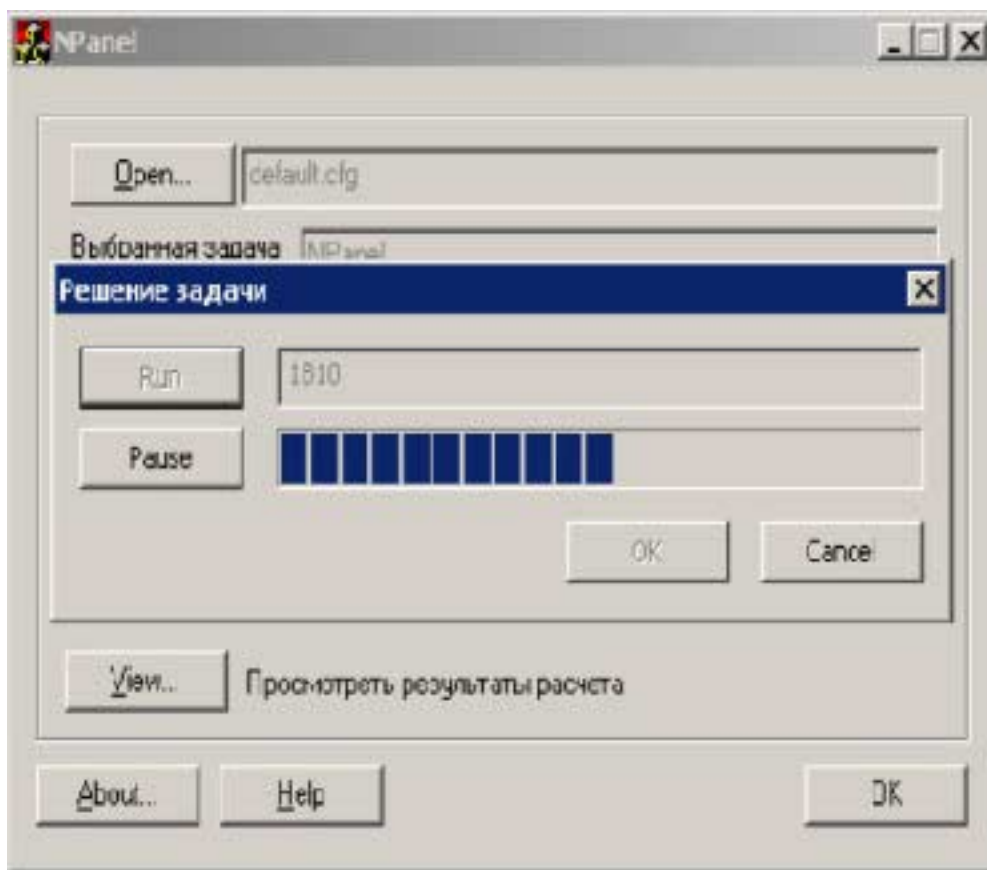


Рис. 4. Команда выполнения вычислений

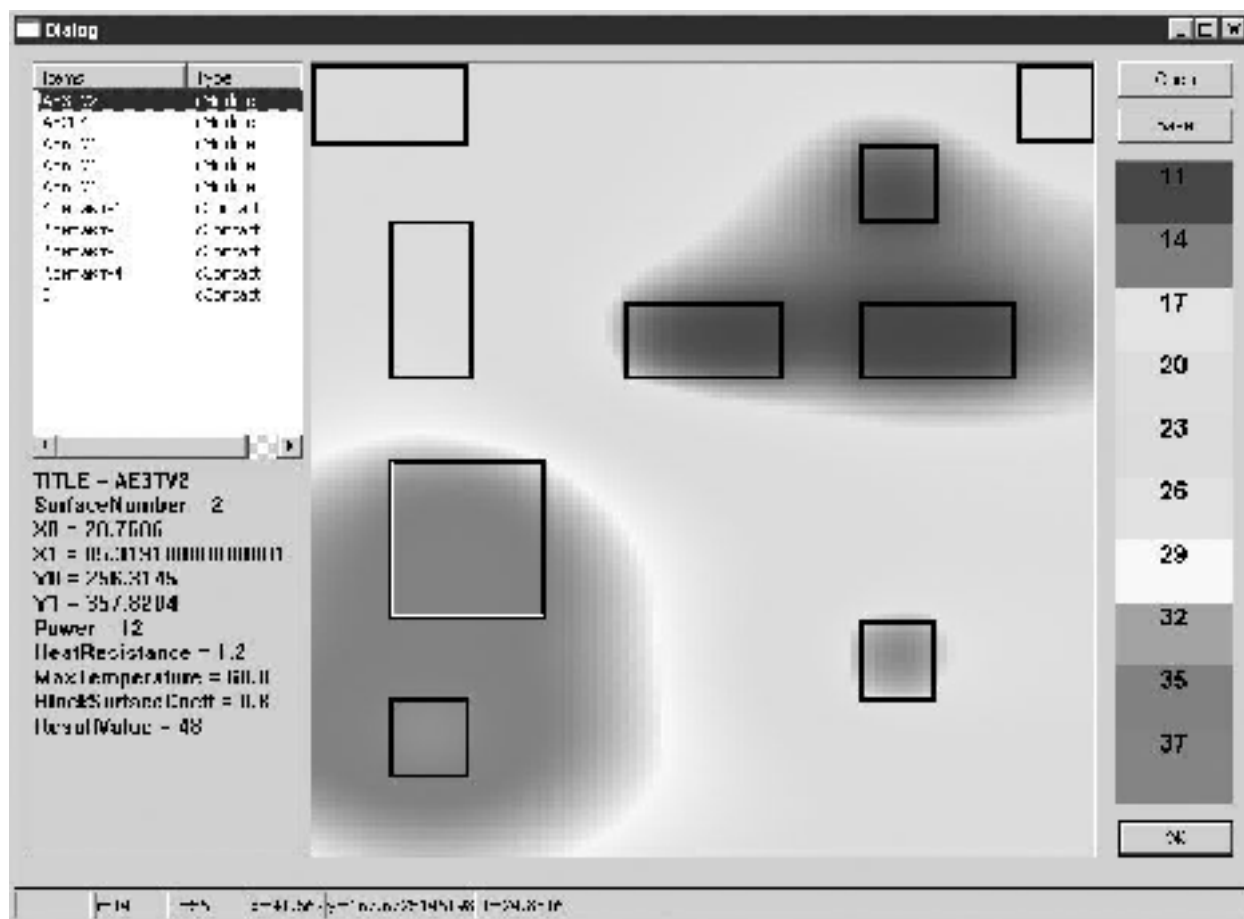


Рис. 5. Просмотр результатов вычислений в визуализаторе

Библиографический список

1. Пат. 2092398 Российская Федерация, МКИ Б 6461/10. Космический аппарат блочно-модульного исполнения / Е. А. Ашурков, В. П. Кожухов, А. Г. Козлов и др. // Оpubл. 10.10.97, Бюл. № 28.

2. Математическое моделирование теплообмена в космических аппаратах негерметичного исполнения / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко, А. В. Макуха и др. // Тр.

2-й Рос. нац. конф. по теплообмену. М., 1998. Т. 7. С. 45–48.

3. Васильев, Е. Н. Расчет теплообмена в негерметичных космических аппаратах / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко, В. Е. Косенко // Теория и эксперимент в современной физике : сб. науч. тр. / Краснояр. гос. ун-т. Красноярск, 2000. С. 47–57.

4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. М. : Наука, 1989.

E. N. Vasiljev, V. V. Derevyanko

BUNDLED SOFTWARE TO COMPUTE TEMPERATURE FIELDS OF SPACE VEHICLES PANELS WITH LEAKY CONSTRUCTION

Bundled software based on the computational model of radiation-convective heat exchange is presented. The model allows to calculate temperature modes of panels, loaded with heat sources for perspective space vehicles with leaky construction. The user interface and input/output tools of the software are built on the base of XMT-technology.

Keywords: heat transfer; numerical simulation, XML technology, spacecraft.

УДК 004.3

Р. П. Туркенич

СТРУКТУРНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрено значение информационного обеспечения процессов создания изделий космической техники, задачи его совершенствования на современном этапе, изложены рекомендации по решению этих задач.

Ключевые слова: космическая техника, информационное обеспечение, экспертное звено.

Проектно-конструкторские и технологические работы, выполняемые в процессе создания изделий космической техники, всегда относились к наиболее ресурсоемкой области созидательной человеческой деятельности. Для получения достойного результата эти работы должны стать объектом высокоорганизованной системы управления, построенной на основе совершенного (насколько возможно) информационного обеспечения. Проектирование и разработка конструкции и технологии изготовления сложных технических объектов (СТО) «до сих пор были и останутся, видимо, в предвиденном будущем областью инженерного искусства» [1].

За последнее время произошло существенное усложнение как конструкций космических аппаратов (КА), так и стратегии их проектирования. Невозможность формализованной постановки задачи проектирования, неопределенность исходных данных, многофункциональность разрабатываемых систем и вызванная этим многокритериальность оптимизации – таковы основные причины, ограничивающие применение традиционных методов синтеза.

Зависимость решения оптимизационных задач от имеющегося информационного обеспечения (ИО) тре-

бует совместного рассмотрения проблем оптимизации и устранения дефицита информации при разработке КА, которые, как правило, не имеют аналогов.

Все цели, на достижение которых направлено информационное обеспечение, можно подразделить на два больших класса: поддержание и достижение.

В рамках первого класса осуществляется поддержание достигнутого (или заданного) состояния и перевод в новое состояние. К этому классу можно отнести поддержание работоспособности КА на заданном техническом задании (ТЗ) уровне, обеспечение определенного запаса прочности разрабатываемого изделия.

Ко второму классу относятся процессы, связанные с переводом разрабатываемого изделия из одного состояния в другое, например внедрение научно-технических достижений и мероприятий, направленных на повышение технического уровня разработок, модернизация оборудования и т. д.

При переходных процессах необходимость достижения той или иной цели в конкретных условиях формулируется в виде задачи управления для преодоления противоречия между достигнутым и требуемым уровнями характеристик СТО.