

3. Поздеев, Г. Л. Исследование существующих возможностей и путей совершенствования заправочно-нейтрализационных станций космодромов «Байконур» и «Плесецк» для обеспечения заправки компонентами топлива летательных аппаратов в интересах Украины. Тема «Байконур» [Текст]: научно-технический отчет / Г. Л. Поздеев. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 1994. – Кн. 1, Ч. 2. – 144 с.
4. Денисов, О. Е. Комплект оборудования для заправочной станции [Текст]: инженерная записка. 46-400-07 / О. Е. Денисов. – М.: ФГУП КБТХМ, 2007. – 72 с.
5. Белых, В. С. Экспериментальные исследования процессов непрерывной подготовки компонентов топлива на потоке [Текст] / В. С. Белых // Ракетно-космическая техника. Серия III. – 1988. – Вып. 3. – 31 с.
6. Козлов, А. А. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок [Текст] / А. А. Козлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
7. Дегтярев, А. В. Заправочно-нейтрализационная станция. Основные характеристики [Текст]: документ MSA YZH ANL054 02 / А. В. Дегтярев. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2015. – 130 с.
8. Поздеев, Г. Л. Описание процедуры заправки КА. Программа Днепр [Текст]: документ DNR YZH PRC 003 00 / Г. Л. Поздеев, В. П. Фролов. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2004. – 51 с.
9. Поздеев, Г. Л. Организация заправки АКБ «Кречет» компонентами топлива сжатым гелием на объекте «Ясное» [Текст]: технический отчет. Днепр-АКБ «Кречет». 21.15337.155 ОТ / Г. Л. Поздеев, В. П. Фролов. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2006. – 74 с.
10. Белых, В. С. Разработка универсального способа и устройства дискретно-непрерывного весового дозирования для технологических систем заправки двигательных установок космических аппаратов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В. С. Белых. – КБ Общего Машиностроения, 1988. – 200 с.
11. Егоров, Ю. В. Закономерности массообмена и расчета параметров при дегазировании компонентов топлива на потоке методом барботирования инертным газом [Текст] / Ю. В. Егоров // Ракетно-космическая техника. Серия III. – 1985. – Вып. 3. – 46 с.

#### УНІФІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ЗАПРАВНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАПРАВКИ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ, РОЗГІННИХ БЛОКІВ І ДВИГУННИХ УСТАНОВОК МАЛОЇ ТЯГИ КОСМІЧНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Досліджено можливість уніфікації обладнання для заправки розгінного блоку, космічного апарату, рухової установки малої тяги в умовах однієї заправної станції. Дослідження виконані на основі аналізу комплексу чинників, що визначають особливості заправки апаратів різного призначення, що беруть участь спільно в запуску ракети-носія. Зроблено висновок про принципову можливість використовувати власне технологічне обладнання станції заправки для заправки космічних апаратів без залучення додаткової організації-виконавця.

**Ключові слова:** заправна станція, компонент палива, космічний апарат, розгінний блок, уніфікація, паливний бак.

*Поздеев Геннадий Леонидович, кандидат технических наук, начальник группы, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: pozdejevgl@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-5960>*

*Фролов Виктор Петрович, кандидат технических наук, заместитель начальника комплекса по разработке и созданию наземных ракетных и космических ракетных комплексов, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепр, Украина, e-mail: vpfrolov@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5786-8765>*

УДК 681.32:519.673

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.91794

Грицюк Е. М.

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ТЕЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

*Рассмотрены вопросы создания специализированных интеллектуальных систем, используемых при проектировании тел сложной формы. Предметной областью созданной системы является моделирование и анализ температурных и термомеханических полей в телах сложной геометрической формы. Для решения краевых задач теплопроводности и термоупругости используется аппарат теории R-функций. Рассмотрены некоторые характеристики базы знаний системы, а также метод представления знаний.*

**Ключевые слова:** проектирование, моделирование, краевые задачи, интеллектуальная система.

### 1. Введение

При проектировании конструкций, работающих в условиях высокого теплового нагружения, возникают задачи моделирования температурных и термомеханических полей. Компьютерное моделирование процессов теплопроводности и термоупругости является важной задачей, решаемой при проектировании изделий

в машиностроительной, энергетической, атомной промышленности, в технологических процессах химической, строительной, текстильной и других отраслях промышленности. При решении этих задач возникает необходимость в проведении расчетов температурных и термомеханических полей с учетом самых различных факторов физического и геометрического характера. Значительного повышения эффективности можно

достигнуть благодаря возможностям современных компьютеров и развитию методов решения задач, применяемых при создании систем автоматизированного проектирования.

Информационная база САПР, отвечающая современным требованиям, исходящим из особенностей проектирования новых изделий, должна быть основана на методах автоматизации обработки знаний, то есть существует необходимость повысить интеллектуальность САПР. Таким образом, в состав САПР должны входить системы, основанные на знаниях, которые позволяют максимально автоматизировать процесс выбора рациональных параметров конструкций.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объектом исследования* является проектирование тел сложной формы с учетом температурных и термомеханических полей.

Возникла необходимость в повышении степени автоматизации процессов моделирования и анализа температурных и термомеханических полей в осесимметричных объектах сложной формы. Для этого необходимо создать интеллектуальную систему для моделирования и анализа температурных и термомеханических полей в объектах сложной формы.

## **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – создать интеллектуальную систему для моделирования и анализа температурных и термомеханических полей при проектировании осесимметричных тел сложной формы.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Провести анализ существующих методов решения задач теплопроводности и термоупругости в телах сложной формы.
2. Создать математическую базу специализированной системы.
3. Создать базу знаний системы, разработать интерфейс для работы пользователя в системе.

## **4. Исследование существующих решений проблемы**

Существует много работ, в которых есть информация об украинских и зарубежных исследованиях в области решения задач теплопроводности и термоупругости в однородных и кусочно-однородных средах.

Возможность построения функции  $\omega(x, y, z)$ , обращаемой в нуль на граничных точках сколь угодно сложного геометрического объекта, решила проблему точного удовлетворения граничным условиям, присутствующим в постановке краевых задач. Задание  $\omega(x, y, z)$  с помощью  $R$ -функций решает проблему точного удовлетворения граничным условиям. Так,  $R$ -функции были положены в основу нового метода решения задач – вариационно-структурного или структурного метода (метода  $R$ -функций, RFM) [1].

Решению задач теплопроводности и термоупругости методами структурным и регионально-структурным посвящены работы:

- моделирование различных объектов с помощью аппарата теории  $R$ -функций представлено в работах [1–6];
- задач упругости и термоупругости методом  $R$ -функций для цилиндров – работы [7, 8].

В работах [9, 10] рассмотрены моделирование тепловых процессов в поршнях двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и моделирование термомеханических полей в поршнях ДВС. Так, в частности в работе [10] представлены построенные новые структуры решения задачи термоупругости для поршня ДВС в дифференциально-разностной форме. Разработка новых структур решения задач теплопроводности и термоупругости для моделирования тепловых и термомеханических полей в поршнях ДВС позволяет повысить устойчивость существующих методов решения задач.

В современных САПР, проектирующих объекты, работающие в условиях высокого теплового нагружения, существует необходимость в моделировании и анализе температурных и термомеханических полей в соответствующих объектах.

Во многих научных центрах в Украине и за рубежом ведутся работы по созданию специализированных систем для моделирования предметных областей. Включение в состав систем баз знаний о предметных областях повышает эффективность создаваемых специализированных систем. Вопросам создания систем, основанных на знаниях, посвящены работы многих украинских и зарубежных авторов, например работы [11, 12].

## **5. Методы исследования**

В большинстве случаев математические модели полей имеют вид краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными.

Рассмотрим температурное поле  $u(x, y, z, t)$  в теле, занимающем область  $\Omega$  в пространстве  $xOyz$ . Пусть  $C(x, y, z, t)$  – функция, характеризующая удельную теплоемкость тела,  $\rho = \rho(x, y, z, t)$  – его плотность, а  $\theta = \theta(x, y, z, t)$  – плотность источников тепла внутри области  $\Omega$ . Тогда во внутренних точках области  $\Omega$  выполняется условие:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C u) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} u) + \theta, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. Если среда изотропна,  $\rho, C, \lambda$  – константы, то:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \Delta u + f, \quad (2)$$

где  $a^2 = \lambda(\rho C)^{-1}$  – коэффициент теплопроводности по Максвеллу,  $f = \theta(\rho C)^{-1}$ ,  $\Delta$  – оператор Лапласа. Для стационарного температурного поля получим уравнение:

$$\Delta u = -f a^{-2}. \quad (3)$$

Картина температурного поля тела сложной геометрической формы зависит не только от теплофизических характеристик материала тела, но также от формы тела  $\Omega$ , формы площадок контакта тел, составляющих тело, характера их теплового взаимодействия между собой и с внешней средой, а также начального распределения температуры в теле. Это отражается существованием множества решений, из которых единственное

выделяют с помощью краевых и начальных условий. Например, краевые условия вида:

$$\left( \frac{\partial u}{\partial \nu} + \frac{\alpha}{\lambda} u \right) \Big|_{\partial \Omega} = \frac{\alpha}{\lambda} u_c, \quad (4)$$

где  $\nu$  – внутренняя нормаль к поверхности тела  $\partial \Omega$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $u_c$  – температура внешней среды, являются условиями третьего рода и обеспечивают существование единственного решения задачи. Задание этих условий позволяет также учитывать участки изменения параметров теплообмена по теплопроводящей поверхности.

В тех случаях, когда не удается применить методы получения точного аналитического решения, применяют методы, которые позволяют получать решения с достаточной точностью. К ним относятся прямые методы – вариационные и проекционные, а также численные – метод сеток, конечных элементов и др.

Существует ряд проблемно-ориентированных систем, пакетов прикладных программ, вычислительных комплексов, которые помогают решать как отдельные задачи, так и комплекс задач перечисленными методами. В отличие от пакетов программ, которые используют методы сеток, конечных элементов и др., в разработанной системе для моделирования теплового и термонапряженного состояния тел применяется сочетание вариационных или проекционных методов со структурным или регионально-структурным методом. Метод  $R$ -функций [1–6] и регионально-структурный метод позволяют на аналитическом уровне учитывать геометрическую информацию и строить формулы решения задачи, называемые структурами решения задачи, в которые геометрические и физические параметры входят в буквенном виде.

Рассмотрим задачу определения тепловых напряжений в осесимметричном теле конечной длины, изображенном на рис. 1, а.

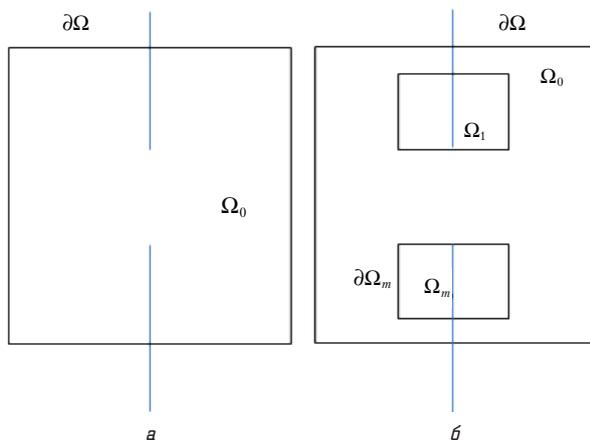


Рис. 1. Осевое сечение тела

Систему уравнений, описывающую тепловую деформацию тела, запишем в виде [8]:

$$\operatorname{div}(\beta \operatorname{grad} T) = 0, \quad (5)$$

$$-(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial r} - \mu \Delta u_r + \mu \frac{u_r}{r^2} = F_1, \quad (6)$$

$$-(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} - \mu \Delta u_z = F_2, \quad (7)$$

где  $T$  – температура;  $\bar{U}(u_r, u_z)$  – вектор перемещений;  $\lambda$  и  $\mu$  – параметры Ламе:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r};$$

$\beta$ ,  $\alpha_T$  – коэффициенты теплопроводности, температурного расширения;

$$\theta = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z};$$

$$F_1 = -\alpha_T(3\lambda + 2\mu) \frac{\partial T}{\partial r}, \quad F_2 = -\alpha_T(3\lambda + 2\mu) \frac{\partial T}{\partial z}.$$

Краевые условия задачи теплопроводности (5) прием в виде (4). Краевые условия в задаче термоупругости (6), (7): на границе  $\partial \Omega$  рассматриваем нормальное  $\sigma_n$  и касательное  $\tau_n$  напряжения:

$$\sigma_n = f_1(r, z) = -\alpha_T(3\lambda + 2\mu)T, \quad \tau_n = f_2(r, z) = 0. \quad (8)$$

Приведенная система сводится к последовательному решению [8] задачи теплопроводности (уравнение (5)) при условиях (4) на границе области  $\partial \Omega$ , затем задачи упругости (система уравнений (6), (7)) с учетом того, что в качестве объемных сил принимается вектор  $F(F_1, F_2)$ , выражающийся через температурную функцию  $T$ , найденную из решения задачи (5), заданных на  $\partial \Omega$  напряжений  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  (8).

Рассмотрим задачу определения тепловых напряжений в осесимметричном составном теле конечной длины, изображенном на рис. 1, б. Тело занимает область  $\Omega$ , состоит из частей:  $\Omega = \bigcup_{i=0}^m \Omega_i$ ,  $(\lambda_i, \mu_i)$  – упругие характеристики в пределах области  $\Omega_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ );  $\partial \Omega$  – граница тела;  $\partial \Omega_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) – границы соприкосновения сред.

Систему уравнений, описывающую тепловую деформацию тела, запишем в виде:

$$\operatorname{div}(\beta_i \operatorname{grad} T_i) = 0, \quad (9)$$

$$-(\lambda_i + \mu_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial r} - \mu_i \Delta u_{ri} + \mu_i \frac{u_{ri}}{r^2} = F_{1i}, \quad (10)$$

$$-(\lambda_i + \mu_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial z} - \mu_i \Delta u_{zi} = F_{2i}, \quad (11)$$

где  $T_i$  – температура в области  $\Omega_i$ ;  $U_i \{u_{ri}(r, z), u_{zi}(r, z)\}$  – векторы перемещений в каждой из областей  $\Omega_i$ ;  $\lambda_i$

и  $\mu_i$  – параметры Ламе;  $\theta_i = \frac{\partial u_{ri}}{\partial r} + \frac{u_{ri}}{r} + \frac{\partial u_{zi}}{\partial z}$  – объемная

деформация;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$  – оператор Лапласа

в уравнениях (10), (11);  $F_i(F_{1i}, F_{2i})$  – вектор объемных сил, где:

$$F_{1i} = -\alpha_{Ti}(3\lambda_i + 2\mu_i) \frac{\partial T_i}{\partial r}, \quad F_{2i} = -\alpha_{Ti}(3\lambda_i + 2\mu_i) \frac{\partial T_i}{\partial z};$$

где  $\beta_i$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha_{T_i}$  – коэффициент температурного расширения, ( $i = 0, 1...m$ ).

Краевые условия задачи теплопроводности принимаем в виде:

1) на границе тела  $\partial\Omega$  рассматриваем условия, например, третьего рода:

$$\left( \frac{\partial T_0}{\partial \nu_0} + \frac{\alpha_0}{\beta_0} T_0 \right) \Big|_{\partial\Omega=\Gamma_0} = \frac{\alpha_0}{\beta_0} T_c, \quad (12)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи;  $\nu_0$  – направление нормали к поверхности  $\Gamma_0 = \partial\Omega$ ;  $T_c$  – температура среды на границе  $\Gamma_0$ ;

2) на границах сопряжения  $\partial\Omega_j$  – условия идеального теплового контакта сред:

$$T_0 \Big|_{\partial\Omega=\Gamma_1} = T_j \Big|_{\partial\Omega=\Gamma_j}, \quad \beta_0 \frac{\partial T_0}{\partial \nu_0} \Big|_{\Gamma_1} = \beta_j \frac{\partial T_j}{\partial \nu_j} \Big|_{\Gamma_j}, \quad (13)$$

где  $\nu_0$  и  $\nu_j$  – векторы нормалей к контурам  $\Gamma_0$  и  $\Gamma_j$  (границам контакта сред).

Краевые условия в задаче термоупругости (10), (11) представим так:

1) на границе  $\partial\Omega$  рассматриваем нормальное  $\sigma_n$  и касательное  $\tau_n$  напряжения:

$$\sigma_n = f_1(r, z) = \alpha_{T_0}(3\lambda_0 + 2\mu_0)T_0, \quad \tau_n = f_2(r, z) = 0; \quad (14)$$

2) на границах  $\partial\Omega_j$  – условия жесткого сцепления упругих сред:

$$u_{r0}(r, z) = u_{rj}(r, z), \quad u_{z0}(r, z) = u_{zj}(r, z),$$

$$\sigma_{nj}^{(0)} - \sigma_{nj}^{(j)} = 0, \quad \tau_{nj}^{(0)} - \tau_{nj}^{(j)} = 0, \quad (r, z) \in \partial\Omega_j, \quad (15)$$

где

$$\sigma_{nj}^{(i)} = (\lambda_i + 2\mu_i) \left( \frac{\partial u_{ri}}{\partial \nu_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial r} + \frac{\partial u_{zi}}{\partial \nu_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial z} \right) +$$

$$+ \lambda_i \left( \frac{\partial u_{ri}}{\partial \tau_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial z} - \frac{\partial u_{zi}}{\partial \tau_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial r} + \frac{u_{ri}}{r} \right),$$

$$(i = 0, 1...m), \quad (j = 1, 2...m),$$

касательная к  $\partial\Omega_j$ :

$$\tau_{nj}^{(i)} = \mu_i \left( \frac{\partial u_{ri}}{\partial \nu_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial z} - \frac{\partial u_{zi}}{\partial \nu_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial r} + \frac{\partial u_{ri}}{\partial \tau_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial r} + \frac{\partial u_{zi}}{\partial \tau_j} \frac{\partial \omega_j}{\partial z} \right) \tau_j.$$

Приведенная система сводится к последовательному решению задачи теплопроводности (уравнение (9)) при соответствующих граничных условиях на границе области  $\partial\Omega$  и условиях теплового контакта сред на  $\partial\Omega_j$ , затем задачи термоупругости (система уравнений (10), (11)). В задаче термоупругости учитывают, что в качестве объемных сил принимается вектор  $F_i$ , выражающийся через температуру  $T_i$ , найденную из решения задачи теплопроводности, заданных на  $\partial\Omega_j$  нормального  $\sigma_n$  и касательного  $\tau_n$  напряжений (14), а также условий сопряжения (15) вдоль границ контакта сред.

Определение стационарного переноса тепла в определенном поршне ДВС со вставкой из другого материала, показанном, например, на рис. 2, б, сводится к интегрированию уравнения:

$$\text{div}(\lambda(u)\text{grad}u) = 0, \quad (16)$$

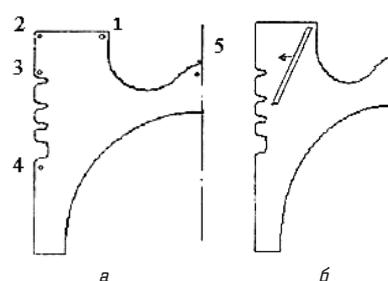
где  $\lambda(u) = \lambda_i(u)$ ;  $P(\rho, z) \in \Omega_i$ ;  $i = 1, 2$  при краевом условии:

$$\left( \frac{\partial u_1}{\partial \nu_0} + \frac{\alpha_1}{\lambda_1(u)} u_1 \right) \Big|_{\partial\Omega=\Gamma_0} = \frac{\alpha_1}{\lambda_1(u)} u_c, \quad (17)$$

и условиях теплового контакта сред:

$$u_1 \Big|_{\Gamma_1} = u_2 \Big|_{\Gamma_1}, \quad \lambda_1(u) \frac{\partial u_1}{\partial \nu_{12}} \Big|_{\Gamma_1} = \lambda_2(u) \frac{\partial u_2}{\partial \nu_{12}} \Big|_{\Gamma_1}, \quad (18)$$

где  $\lambda_i(u) = \lambda_{0i}(1 + \varepsilon u)$ ;  $\lambda_{0i}$  – начальное значение коэффициента теплопроводности;  $\varepsilon$  – температурный коэффициент;  $\partial\Omega$  – граница тела поршня;  $\Gamma_1$  – граница подобласти вставки;  $\nu_0$  и  $\nu_{12}$  – векторы внутренних нормалей к контурам  $\Gamma_0$  и  $\Gamma_1$ .



**Рис. 2.** Осевое сечение поршня ДВС: а – однородного; б – составного

Региональные структуры решения имеют вид:

$$u_1 = \Phi - (\omega_1^2 \wedge_0 \omega_2^2) \left( D_1^{(1)} \Phi - \frac{\alpha}{\lambda_1(u)} \Phi + \frac{\alpha}{\lambda_1(u)} u_c \right),$$

$$u_2 = \Phi + \left( \frac{\lambda_1(u)}{\lambda_2(u)} - 1 \right) \omega_2 D_1^{(2)} \Phi,$$

где  $\omega_1 = 0$  – уравнение границы тела поршня;  $\omega_2 = 0$  – уравнение границы подобласти вставки;  $\wedge_0$  – R-конъюнкция;  $\Phi$  – функция, которую можно аппроксимировать, например, полиномом:

$$\Phi = \sum_{k=1}^n c_k \phi_k,$$

где  $c_k$  – неизвестные постоянные;  $\phi_k$  – функции, удовлетворяющие некоторым условиям;

$$D_1^{(i)} = \frac{\partial \omega_i}{\partial \rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{\partial \omega_i}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z}.$$

## 6. Результаты исследования

Построенные структуры решения задачи теплопроводности и термоупругости для однородного и составного тела в дифференциально-разностной форме позволяют повысить численную устойчивость регионально-структурного метода. Так, для задачи теплопроводности с краевыми условиями (4) для однородного тела построена структура решения в дифференциально-разностной форме:

$$T = \Phi + h_1 \frac{\partial \Phi}{\partial r} + h_2 \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \omega^1 \left( \frac{\alpha}{\beta} \Phi - \frac{\alpha}{\beta} T_{cp} \right), \quad (19)$$

$$h_1(X) = -\omega \left( r + \frac{1}{2} \omega(X), z \right) + \omega \left( r - \frac{1}{2} \omega(X), z \right),$$

$$h_2(X) = -\omega \left( r, z + \frac{1}{2} \omega(X) \right) + \omega \left( r, z - \frac{1}{2} \omega(X) \right), \quad (20)$$

$$\omega^1(X) = \omega(X) + \frac{1}{3} \omega(X + h(X)), \quad (21)$$

где  $\omega^1(X) = 0$  – нормализованное до второго порядка уравнение границы  $\partial\Omega$ ;  $h(X) = (h_1(X), h_2(X))$ .

Исследована картина температурного и термомеханического полей для поршней на рис. 2. Из проведенных исследований сделан вывод, что при смещении подласти вставки в поршне ДВС в направлении, указанном стрелкой, значение температуры в зоне кромки камеры сгорания увеличивается.

Значения температуры в контрольных точках поршня ДВС приведены в табл. 1:  $t_e$ ,  $t_r$  – экспериментальные и расчетные значения температуры в однородном поршне, I – поршне со вставкой, II – поршне при смещении подласти вставки в указанном стрелкой направлении.

Таблица 1

Значения температуры в контрольных точках тела

| Точка | $t_e$ | $t_r$ | I   | II    |
|-------|-------|-------|-----|-------|
| 1     | 294   | 297   | 286 | 295,7 |
| 2     | 255   | 255   | 252 | 254   |
| 3     | 225   | 224   | 223 | 223   |
| 4     | 185   | 187   | 184 | 187   |
| 5     | 279   | 283   | 281 | 282   |

После нахождения функции распределения температуры переходим к решению задачи теории упругости (10), (11) – находим в каждой из подластей  $\Omega_i$  компоненты  $u_{ri}$  и  $u_{zi}$  векторов перемещений  $U_i = \{u_{ri}(r, z), u_{zi}(r, z)\}$ .

Создана специализированная интеллектуальная система для анализа температурных и термомеханических полей при проектировании тел сложной формы. При решении этих задач с помощью созданной специализированной системы и некоторой программирующей системы (ПС) определяются следующие факторы:

- математическая модель (уравнение, краевые условия);
- геометрические характеристики рассматриваемых объектов ( типовые формы областей и участков границы);
- методы решения краевых задач (Ритца, Галеркина и др.);
- используемые структуры решения задач.

Разработанная специализированная система представляет собой систему знаний. База знаний системы включает в себя:

- базу данных с математическими моделями температурных и термомеханических полей тел, конструктивными средствами для реализации структурного и регионально-структурного методов их исследований, геометрическими формами объектов, их физическими характеристиками;
- базу правил, которые позволяют автоматизировать выбор метода и структуры решения, уравнений границы области и участков и другую информацию;

– средства, которые позволяют дополнять созданную базу знаний новыми структурными формулами, краевыми условиями, геометрическими объектами, а также преобразовывать информацию, полученную от пользователя с помощью созданного интерфейса, в компьютерную модель.

При этом быстро и эффективно строятся математические модели исследуемых полей и программы на языке RL. Затем ПС находит распределение температурного и термомеханического полей в рассматриваемых объектах. Используется реляционная база правил и база данных. Созданные в данной работе файлы содержат поля, значениями которых являются выражения, используемые при создании системы меню, компоненты структурной формулы, уравнения границы области и ее участков, описания геометрических, физических и аналитических объектов и др.

Общение пользователя с системой организовано в форме диалога, который обеспечивает поиск в базе знаний необходимой информации, обработку ее, построение программы на языке RL, выдачу результатов на средства отображения информации. Разработанная система является системой, основанной на правилах [11, 12] или системой с выводом, использующим сопоставление по образцу, или продукционной системой. Знания в системе представлены набором правил, имеющих вид: если <условие>, то <действие>, где условие задано на экране, а действие – совокупность команд, управляющих ходом решения задачи. Так, выбор структуры решения задачи осуществляется с использованием правила следующего вида: ЕСЛИ краевые условия первого рода И точное удовлетворение краевым условиям И тело однородное ТО выбрать структуру 1, где структура 1 находится в одном из файлов базы правил. Фрагменты базы данных и базы правил представлены на рис. 3, 4.

На рис. 4 обозначено:

P3 – тело однородное или составное;

KR\_USL – краевые условия задачи;

Met – метод решения краевой задачи: структурный или регионально-структурный;

FSTR – форма структуры решения задачи – дифференциальная или дифференциально-разностная;

U1 – компонента структурной формулы (номер);

W2, DEL – переменные в регионально-структурном методе решения задачи;

U2D – компонента структурной формулы решения задачи регионально-структурным методом, выраженная в дифференциальной форме;

U2DR – компонента структурной формулы решения задачи регионально-структурным методом, выраженная в дифференциально-разностной форме;

UU, UUU, U – переменные для обозначения решения задачи регионально-структурным методом;

W1X, W1Y, X1, 1, GA1, PL1, W0K – переменные в структурном методе решения задачи для составного тела.

Вся необходимая пользователю в ходе диалога информация отображается на экране в виде системы меню и вопросов. Для информирования пользователя о ходе процесса решения задачи предусмотрена система подсказок-сообщений, а также визуализация результатов. Система ориентирована на специалистов, инженеров-технологов, конструкторов, испытателей, применяется в научных исследованиях, инженерных расчетах и учебном процессе.

| N0B | 1                                | 2   | 3                                  | ... |
|-----|----------------------------------|---|------------------------------------|-----|
| G1  | (F1!(F3!F4)!F12)&F5&(011&021)    | ((F1!F2)!(F3!F4)!F12)&F5&(011&021)          | ((F1!F2)!(F3!F4)!F12)&F5&(011&021) |     |
| G2  | FK1&FK2&FK3!FK                   | FK1&FK2&FK3&FK4!FK                          | FK1&FK2&FK3&FK4!FK                 |     |
| G3  | (FX1!FX2)!(FX3!FX4)!(FX5!FX)!O22 | ((FX1!FX2)!(FX3!FX4))!(FX&022)! B1&(09&010) | ((FX1 !FX2)!FX3)!FX&022            |     |
| G4  | F&FP                             | F&FP  | F&FP                               |     |
| W   | G1&G2&G3&G4                      | G1&G2&G3&G4                                 | G1&G2&G3&G4                        |     |
| Ob  | GEN                              | GEN   | GEN                                | ... |

| N0B | 1      | 2      | 3      | ... |
|-----|--------|--------|--------|-----|
| F1  | line   | line   | line   |     |
| F2  |        | line   | line   |     |
| F3  | line   | line   | line   |     |
| F4  | line   | line   | line   |     |
| F5  | line   | line   | line   |     |
| ... |        |        |        | ... |
| F12 | line   | line   | line   |     |
| FP  | pol1   | pol1   | pol1   |     |
| F   | bandy  | bandy  | bandy  |     |
| B1  |        | mbandy |        |     |
| O1  |        |        |        |     |
| ... |        |        |        | ... |
| O10 |        | mcircl |        |     |
| O11 | mcircl | mcircl | mcircl |     |
| O21 | mcircl | mcircl | mcircl |     |
| O22 | mcircl | mcircl | mcircl |     |
| FK1 | mbandx | mbandx | mbandx |     |
| FK2 | mbandx | mbandx | mbandx |     |
| FK3 | mbandx | mbandx | mbandx |     |
| FK4 |        | mbandx | mbandx |     |
| FK  | bandy  | bandy  | bandy  |     |
| FX1 | line   | line   | line   |     |
| FX2 | line   | line   | line   |     |
| FX3 | line   | line   | line   |     |
| FX4 | line   | line   | line   |     |
| FX  | line   | line   | line   | ... |

**Рис. 3.** Фрагмент базы данных геометрических форм объектов: G1, G2, G3, G4 – описание участков границ областей; Ob – изображение области; F1, F2, F3, F4, F5, O1, O2...FX4, FX – описание опорных геометрических объектов

| P3  | KR_USL | MET | FSTR | U1 | W1X  | dx(w1)                                |
|-----|--------|-----|------|----|------|---------------------------------------|
| 1   | 1      | СТР |      | 1  | W1   | dy(w1)                                |
| 1   | 2      | СТР | Д    | 2  | Ga1  | (L1-L2)/(L1+L2)                       |
| 1   | 3      | СТР | Д    | 3  | X1   | $x+(ga1*abs(w1)*w*w*W1X)/(w*w+w1*w1)$ |
| 1   | 3      | СТР | ДР   | 4  | Y1   | $y+(ga1*abs(w1)*w*w*W1Y)/(w*w+w1*w1)$ |
| 1   | 4      | СТР | Д    | 5  | Pl1  | Sup(X1,Y1,pl)                         |
| 2   | 1      | СТР |      | 6  | W0K  | Sup(X1,Y1,w)                          |
| 2   | 2      | СТР | Д    | 7  | W2   | -W1                                   |
| 2   | 3      | СТР | Д    | 8  | DEL  | (L1/L2-1)                             |
| 2   | 1      | РЕГ |      | 1  | U2D  | PL+DEI*W1*D1(PL,W1)                   |
| 2   | 2      | РЕГ | Д    | 2  | U2DR | PL-DEI*(H11*DX(PL)+H12*D(PL))         |
| 2   | 3      | РЕГ | Д    | 3  | UU   | SUM(1,U0,U1)                          |
| 2   | 3      | РЕГ | ДР   | 4  | UUU  | SUM(1,0,U2)                           |
| 2   | 4      | РЕГ | Д    | 5  | U    | REG(W2)*UU+REG(W1)*UUU                |
| ... |        |     |      |    |      |                                       |

**Рис. 4.** Фрагмент базы правил выбора метода и структуры решения

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить полученные результаты по построению структур решения задач теплопроводности и термоупругости. Это повысило устойчивость методов решения рассматриваемых задач, а также точность расчетов. Также была создана интеллектуальная система, которая повышает степень автоматизации при моделировании и анализе температурных и термонапряженных полей при проектировании тел сложной формы.

Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что при добавлении произвольной геометрической области в базу данных геометрических форм объектов пользователь системы должен описать эту область в виде конъюнкций и дизъюнкций опорных геометрических областей, что иногда требует дополнительных знаний.

Дополнительные возможности кроются в создании дополнительных баз данных для описания самых разнообразных геометрических форм объектов.

## 8. Выводы

1. Проведен анализ существующих методов решения задач теплопроводности и термоупругости в осесимметричных телах сложной формы, используя в качестве основы методы структурный и регионально-структурный. Построены структуры решения задачи теплопроводности и термоупругости для однородного и составного тела.

2. Создана математическая база системы знаний. Для нее подобраны соответствующие структуры решения в дифференциальной и созданные в дифференциально-разностной формах для осесимметричного тела.

3. Создана база знаний, разработан интерфейс для работы пользователя в созданной системе для моделирования и анализа температурных и термомеханических полей в осесимметричных телах сложной формы.

База знаний созданной системы содержит:

1) базу данных с математическими моделями температурных и термомеханических полей тел, конструктивными средствами для реализации структурного и регионально-структурного методов их исследований, геометрическими формами объектов, их физическими характеристиками;

2) базу правил, которые позволяют автоматизировать выбор метода и структуры решения, уравнений границы области и участков и другую информацию, необходимую для повышения степени автоматизации процесса компьютерного моделирования;

3) средства, которые позволяют дополнять созданную базу знаний новыми структурными формулами, краевыми условиями, геометрическими объектами;

4) средства преобразования информации, полученной от пользователя с помощью созданного интерфейса, в компьютерную модель.

Разработанный диалоговый интерфейс для работы пользователя в системе реализован в виде системы меню, которые последовательно разворачиваются, пункты которых отображают понятия инженера-конструктора, исследователя.

Благодаря разработанной системе повышена степень автоматизации процесса компьютерного моделирования, исследована картина температурного и термомеханического полей в рассматриваемых объектах сложной формы, поршнях ДВС, при различных теплофизических характеристиках частей, составляющих осесимметричный объект. Исследовано влияние материала вставки, формы и расположения на картину температурного и термомеханического полей в рассматриваемых поршнях ДВС, на снижение температуры в критических точках объекта. Полученные результаты помогают в создании оптимальной конструкции поршня ДВС на стадии проектирования этого объекта.

#### Литература

1. Рвачев, В. Л. Теория  $R$ -функций и некоторые ее приложения [Текст] / В. Л. Рвачев. – К.: Наукова думка, 1982. – 551 с.
2. Maksimenko-Sheiko, K. V.  $R$ -functions in mathematical modeling of geometric objects with symmetry [Text] / K. V. Maksimenko-Sheiko, T. I. Sheiko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2008. – Vol. 44, № 6. – P. 855–862. doi:10.1007/s10559-008-9061-5
3. Shapiro, V. Semi-analytic geometry with  $R$ -functions [Text] / V. Shapiro // Acta Numerica. – 2007. – Vol. 16. – P. 239–303. doi:10.1017/s096249290631001x
4. Varvak, M. S. Pattern Classification Using Radial Basis Function Neural Networks Enhanced with the Rvachev Function Method [Text] / M. S. Varvak // Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications. Springer Nature, 2011. – P. 272–279. doi:10.1007/978-3-642-25085-9\_32
5. Литвинова, Ю. С. Математическое и компьютерное моделирование строительных конструкций на основе  $R$ -функций [Текст] / Ю. С. Литвинова, К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // Проблемы машиностроения. – 2014. – Т. 17, № 3. – С. 12–18.
6. Nazirov, S. A. Study of Numeric Convergence of the Method of  $R$ -functions in Problems of Constraint Torsion [Text] / S. A. Nazirov, F. M. Nuraliev, S. A. Anorova // American Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 2, № 4. – P. 189–196. doi:10.5923/j.ajcam.20120204.07
7. Рвачев, В. Л. Осесимметричная задача теории упругости для неоднородного цилиндра [Текст] / В. Л. Рвачев, Н. С. Синекон // Прикладная механика. – 1986. – Т. 22, № 1. – С. 18–23.
8. Синекон, Н. С. Алгоритм решения задач термоупругости методом  $R$ -функций [Текст] / Н. С. Синекон // Математические методы в проектировании. – 1985. – С. 10–14.
9. Грицюк, Е. М. Регионально-аналитический метод моделирования тепловых процессов в поршнях ДВС [Текст] / Е. М. Грицюк, Л. П. Шевченко // Вестник ХГПУ. – 1999. – Вып. 47. – С. 142–144.
10. Грицюк, Е. М. Моделирование термомеханических полей [Текст] / Е. М. Грицюк // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2001. – Вып. 117. – С. 161–165.
11. Karra, F. O. Soft Computing and Intelligent Systems Design: Theory, Tools and Applications [Text] / F. O. Karra, C. W. de Silva. – Addison Wesley, 2004. – 560 p.
12. Negnevitsky, M. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems [Text] / M. Negnevitsky. – Addison Wesley, 2011. – 435 p.

#### МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ТА ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПОЛІВ В ТІЛАХ СКЛАДНОЇ ФОРМИ В СПЕЦІАЛІЗОВАНІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Розглянуто питання створення спеціалізованих інтелектуальних систем, що використовуються при проектуванні тіл складної форми. Предметною областю системи, яка створена, є моделювання та аналіз температурних та термомеханічних полів у тілах складної геометричної форми. Для вирішення крайових задач теплопровідності і термоджорсткості використовується апарат теорії  $R$ -функцій. Розглянуті деякі характеристики бази знань створеної системи, а також метод уявлення знань.

**Ключові слова:** проектування, моделювання, крайові задачі, інтелектуальна система.

*Грицюк Катерина Марковна, кандидат технічних наук, старший преподаватель, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: gritc\_ekat@mail.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3241-9482*