

УДК 681.518.3: 536.627

### АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ

**А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор Н. П. Жуков*

**Ключевые слова и фразы:** алгоритмическое и программное обеспечение; информационно-измерительная система; модуль поддержки принятия решений; теплофизические характеристики; полимерные композиты; процесс отверждения.

**Аннотация:** Предложено алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы, позволяющее проводить расчет теплофизических характеристик в процессе нагрева и отверждения композитов. Оно основано на наборе алгоритмов, решающих обратную задачу теплопроводности разными способами. Особенностью является разработка модуля поддержки принятия решений при выборе алгоритма расчета, гарантирующего применимость выбранного алгоритма и минимальную погрешность рассчитанных им значений при заданных условиях эксперимента.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на современном этапе развития техники являются перспективными промышленными конструкционными материалами. Они представляют собой сочетание полимерной матрицы (связующего) и армирующего наполнителя (стекло-, угле- или синтетического волокна, ткани или ровинга) [1, 2].

Качество и свойства ПКМ на стадии получения материала и изделия определяется свойствами ингредиентов и температурно-временными режимами отверждения. При расчете оптимальных режимов формования и отверждения изделий из ПКМ необходимо использовать аппарат математического моделирования, в связи с чем возникает необходимость в идентификации параметров используемых моделей, характеризующих

---

Живенкова Анна Александровна – соискатель кафедры «Физика»; Дмитриев Олег Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», e-mail: phys@nnt.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

процесс отверждения ПКМ, к которым относятся теплофизические, кинетические и реологические характеристики [2 – 5].

Для определения указанных характеристик предполагается использовать большой объем экспериментальных данных, получать которые необходимо с помощью автоматизированных средств, а обрабатывать с помощью специальных алгоритмов и программ. Для решения поставленной задачи разработана и построена информационно-измерительная система (ИИС) исследования теплофизических характеристик (ТФХ) полимерных композитов в процессе отверждения [6].

Теплофизические характеристики полимерных композитов, то есть объемная теплоемкость  $C(T, \beta, \gamma)$  и теплопроводность  $\lambda(T, \beta, \gamma)$ , являются нелинейными функциями температуры  $T$ , степени отверждения  $\beta$  и содержания связующего  $\gamma$ . Разработано множество методов расчета ТФХ, обладающих различными особенностями их применения, достоинствами и недостатками. Однако пока не существует универсального метода определения ТФХ, дающего одинаково хорошие результаты расчетов при исследовании любых материалов, в широком диапазоне температур и при любых условиях проведения эксперимента, включая процесс отверждения.

Поэтому актуальной задачей и целью данной работы является разработка алгоритмического и программного обеспечения ИИС, построенного на основе различных методов определения ТФХ ПКМ в процессе нагрева и отверждения и способного, анализируя входные условия, давать пользователю ИИС рекомендации по выбору оптимального, имеющего минимальную погрешность, метода определения ТФХ.

Согласно поставленной цели, для ИИС разработан математический аппарат, включающий четыре метода определения ТФХ, на основе которых построены алгоритмы расчета ТФХ как функции:

- времени на основе температур внутри образца;
- времени на основе температур поверхностей образца;
- времени на основе фильтра Калмана.
- температуры на основе интегрального преобразования обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) в виде решения интегро-функционального уравнения.

Основываясь на алгоритмическом обеспечении ИИС, разработано прикладное программное обеспечение (ППО), состоящее из набора программных модулей. Структурная схема ППО ИИС представлена на рисунке. В зависимости от решаемых в них задач все ППО делится на следующие модули:

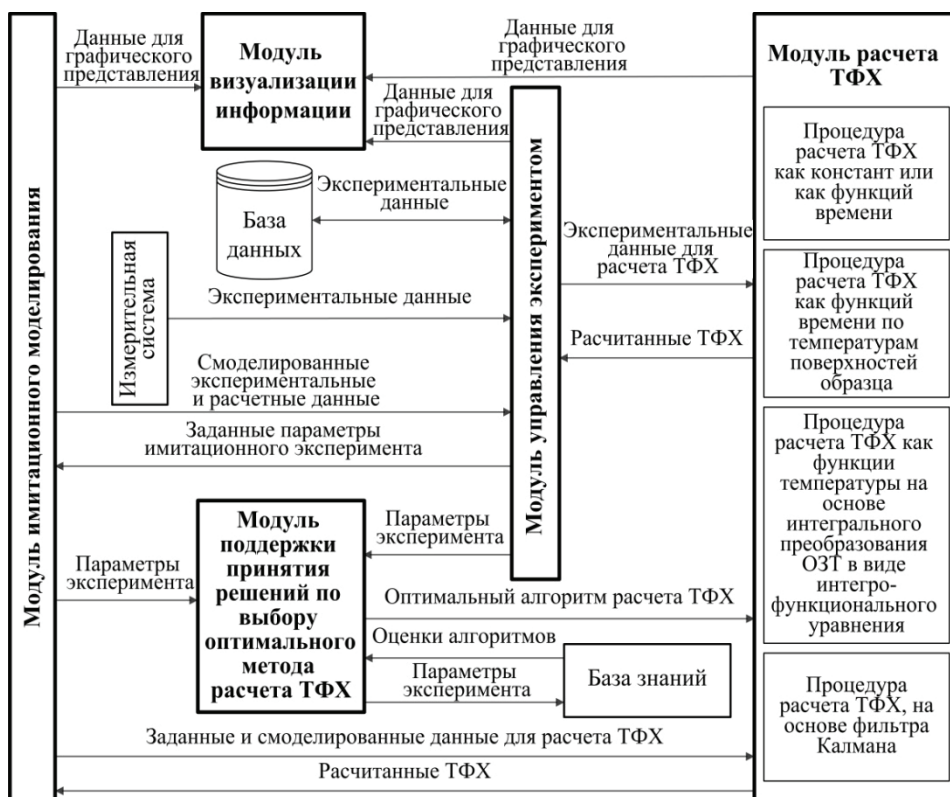
- управления экспериментом – обеспечивает диалоговый ввод входных параметров эксперимента, управление ходом эксперимента и сбором экспериментальных данных; выполняет расчет поправок и обеспечивает устранение систематической погрешности;
- визуализации информации – выполняет построение графиков и таблиц по расчетным и экспериментальным данным;
- расчета ТФХ – выполняет расчет ТФХ ПКМ по одному из четырех алгоритмов;
- поддержки принятия решений (ППР) по выбору оптимального алгоритма расчета ТФХ – обеспечивает выбор алгоритма, позволяющего получить минимальную погрешность расчета ТФХ при заданных условиях эксперимента;

– имитационного моделирования – обеспечивает проведение имитационных экспериментов.

– управляющий – осуществляет координацию и перераспределение потока данных между модулями согласно алгоритму функционирования и командам пользователя ИИС.

Эффективность работы ИИС исследования ТФХ ПКМ осуществляется за счет обеспечения интерактивного диалога с экспериментатором, позволяющего управлять ходом эксперимента, информационными потоками и расчетами. Работа с определенным программным модулем начинается с выбора пользователем пункта меню, либо в результате автоматического перехода. Пользовательский интерфейс позволяет при необходимости получать контекстную помощь, что упрощает работу с ИИС и предотвращает выполнение ошибочных действий.

Наличие в программном обеспечении модуля имитационного моделирования позволяет провести имитационные эксперименты для сравнения разработанных методов и алгоритмов и оценить возможности применения этих алгоритмов для расчета ТФХ при различных значениях каждого из входных параметров эксперимента [7]. В результате анализа проведенных имитационных экспериментов получена сводная таблица, характеризующая взаимосвязь между входными условиями экспериментов по нагреву и отверждению ПКМ и возможностью использовать один из четырех алгоритмов расчета ТФХ.



Структура прикладного программного обеспечения ИИС

Приведенные в таблице данные подтверждают отсутствие универсального для различных комбинации входных условий эксперимента алгоритма расчета ТФХ и свидетельствуют о наличии ограничений в применении каждого из предложенных алгоритмов. Таким образом, разработанные алгоритмы дополняют возможности друг друга и расширяют область условий проведения экспериментов.

Обобщенные и структурированные результаты имитационных исследований применимости и точности алгоритмов определения ТФХ использованы при разработке модуля поддержки принятия решений [6, 7]. Модуль автоматически выбирает один из четырех алгоритмов расчета ТФХ, устойчивый и имеющий минимальную погрешность при заданных условиях эксперимента, и рекомендует его пользователю ИИС для обработки опытных данных при расчете ТФХ.

Основой алгоритма работы модуля ПППР является модифицированный метод анализа иерархий, заключающийся в описании анализируемой

### Оценки возможности использования алгоритмов расчета ТФХ при различных комбинациях условий проведения экспериментов

Условия эксперимента			Возможность использования алгоритма расчета ТФХ как функции			
Перепад температуры по толщине образца	Вид функции ТФХ	Число термопар	времени на основе			температуры на основе интегрального представления ОЗТ
			фильтра Калмана	температур внутри образца	температур на поверхностях образца	
$\Delta T < 5 \text{ K}$	$C = \text{const}, \lambda = \text{const}$	2	+	+	+	-
		3	+	+	+	+
		4	+	+	+	+
		5	+	+	+	+
	$C(T); \lambda(T)$	2	+	+	+	-
		3	+	+	+	-
		4	+	+	+	-
		5	+	+	+	-
$5 \text{ K} \leq \Delta T \leq 25 \text{ K}$	$C = \text{const}, \lambda = \text{const}$	2	+	+	+	-
		3	+	+	+	+
		4	+	+	+	+
		5	+	+	+	+
	$C(T); \lambda(T)$	2	-	-	-	-
		3	-	-	-	+
		4	-	+	-	+
		5	-	+	-	+
$\Delta T > 25 \text{ K}$	$C = \text{const}, \lambda = \text{const}$	2	+	+	+	-
		3	+	+	+	+
		4	+	+	+	+
		5	+	+	+	+
	$C(T); \lambda(T)$	2	-	-	-	-
		3	-	-	-	+
		4	-	-	-	+
		5	-	-	-	+

проблемы с помощью иерархической структуры. Основываясь на экспертных оценках, выполняется сравнение элементов каждого уровня иерархии по важности, результаты которого записываются в матрицу парных сравнений. Оценки экспертов применяются лишь при определении важности каждого критерия относительно других. При оценке альтернатив по критериям используются результаты имитационного моделирования, что сокращает влияние экспертных оценок на итоговый выбор.

В построенной иерархической структуре модуля ППР первый уровень представлен целью выбора того или иного алгоритма. Второй уровень иерархии занимают критерии, в качестве которых выступают входные параметры эксперимента, оказывающие влияние на точность вычислений и применимость алгоритмов расчета. Третий уровень иерархии содержит альтернативы, обеспечивающие достижение цели. Ими являются предложенные алгоритмы расчета ТФХ ПКМ.

Таким образом, разработано алгоритмическое и программное обеспечение ИИС исследования ТФХ полимерных композитов в процессе отверждения, построенное на альтернативном использовании четырех алгоритмов расчета ТФХ. Применение четырех алгоритмов имеет несомненное преимущество, так как они дополняют возможности друг друга и расширяют область условий проведения экспериментов. Предложенный модуль ППР по выбору оптимального алгоритма расчета ТФХ ПКМ, обеспечивает уменьшение погрешности определения ТФХ. Дополнительным преимуществом использования модуля ППР в ИИС является поддержка работы пользователей, не обладающих специальными знаниями о принципах построения методов и алгоритмов расчета, а также условиях их пользования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзадания № 2014/219, код проекта 2079, а также в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-2411.2014.3.*

#### *Список литературы*

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер [и др.] ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
2. Автоматизированные производства изделий из композиционных материалов / В. С. Балакирев [и др.]. – М. : Химия, 1990. – 240 с.
3. Мищенко, С. В. Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, С. В. Пономарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 390 – 399.
4. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формирования в технологическом пакете / С.В. Мищенко [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 7 – 19.
5. Влияние типа наполнителя на оптимальные режимы отверждения толсто-стенных ПКМ / О. С. Дмитриев [и др.] // Клеи, герметики, технологии. – 2011. – № 11. – С. 27 – 36.
6. Дмитриев, О. С. Интеллектуальная информационно – измерительная система для определения теплофизических характеристик полимерных композитов /

О. С. Дмитриев, А. А. Живенкова, А. О. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 73 – 83.

7. Живенкова, А. А. Аспекты моделирования процесса принятия решения при выборе метода расчета теплофизических свойств в ИИС / А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27 : сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф. : в 12 т., Тамбов, 3 – 5 июня 2014 г. / под общ. ред. А. А. Большакова. – Тамбов, 2014. – Т. 4. – С. 169 – 172.

#### References

1. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Gorbatkina Yu.A., Kryzhanovskii V.K. *Polymernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tehnologiya* (Polymer composite materials: structure, properties, technology), Saint Petersburg: Professiya, 2008, 560 p.

2. Balakirev V.S., Bol'shakov A.A., Zaev A.V., Zaretskii I.B., Koshcheev V.A., Oleksyuk V.I., Fandeev E.I. *Avtomatizirovannye proizvodstva izdeliy iz kompozitsionnykh materialov* (Automated production of articles made of composite materials), Moscow: Himiya, 1990, 240 p.

3. Mishchenko, S.V., Dmitriev, O.S., Ponomarev S.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1998, vol. 4, no. 4, pp. 390-399.

4. Mishchenko, S.V., Dmitriev, O.S., Shapovalov, A.V., Kirillov, V.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2001, vol. 7, no. 1, pp. 7-19.

5. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Zuev A.V., Cherepakhina (Zhyvenkova) A.A. *Adhesives, Sealants and technology*, 2011, no. 11, pp. 27-36.

6. Dmitriev, O.S., Zhyvenkova, A.A., Dmitriev, A.O. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 73-83.

7. Zhyvenkova, A.A., Dmitriev, O.S. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh - MMTT-27* (Mathematical Methods in Engineering and Technology - MMTT-27), Proceedings of the XXVII International Conference, Tambov, 3-5 June 2014, Tambov, 2014, vol. 4 of 12, pp. 169-172.

---

### Algorithms and Software of Computer-Measuring System for Research of Thermophysical Characteristics of Polymer Composites in Curing

A. A. Zhyvenkova, O. S. Dmitriev

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** algorithms and software; computer-measuring system; curing process; decision support module; polymer composites; thermophysical characteristics.

**Abstract:** The algorithms and software of the computer-measuring system which provides the calculation of thermophysical characteristics during heating and curing of polymer composites are proposed. It is based on a set of algorithms that solve the inverse heat conduction problem in different ways. A special feature is the development of a decision support module when choosing a calculation algorithm that guarantees the applicability of the chosen algorithm and the minimum error values calculated by it under the given experimental conditions.

---

© А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев, 2014

Статья поступила в редакцию 17.11.2014 г.