

УДК 674.017.7:536.2:519.6

Оценка точности компьютерного моделирования коэффициента теплопроводности древесно-полимерных композитов на основе экспериментальных данных

Ганиева Эльвира Назиповна^(*)

ganieva@bmstu.ru
SPIN-код: 1822-6599

Ермоченков Михаил Геннадьевич

ermochenkov@bmstu.ru
SPIN-код: 8811-2491

МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Московская обл., Россия

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование теплопроводности четырех видов древесно-полимерных композитов на основе ряда полиолефинов и поливинилхлорида. Измерения выполнены методом стационарного теплового потока через плоский слой на анализаторе TA Instruments. Экспериментальные данные сопоставлены с расчетными по методике Дульнева — Заричняка с использованием программного обеспечения в среде MathCad, учитывающего объемные доли компонентов, воздушные поры, равновесную влажность и структурные коэффициенты. Установлено удовлетворительное соответствие расчета и эксперимента. Модель адекватно описывает теплофизические свойства многокомпонентных композитов и применима для оптимизации состава, технологии производства и повышения точности теплотехнических расчетов при формовании изделий.

Ключевые слова: древесно-полимерный композит (ДПК), коэффициент теплопроводности, термогравиметрический анализ (ТГА), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полипропилен (ПП), поливинилхлорид (ПВХ)

Assessment of the Accuracy of Computer Modeling of the Thermal Conductivity Coefficient of Wood - Polymer Composites Based on Experimental Data

Ganieva Elvira Nazipovna^(*)

ganieva@bmstu.ru
SPIN-code: 1822-6599

Ermochenkov Mikhail Gennadievich

ermochenkov@bmstu.ru
SPIN-code: 8811-2491

Mytishchi Branch of BMSTU, Mytishchi, Moscow Region, Russia

Abstract. An experimental study of the thermal conductivity of four types of wood-polymer composites based on a number of polyolefins and polyvinyl chloride was conducted. Measurements were performed using the steady-state heat flow method through a flat layer on a TA Instruments analyzer. The experimental data were compared with the calculated data using the Dulnev — Zarychnyak method with MathCad software, which takes into account the volume fractions of components, air pores, equilibrium moisture content, and structural

coefficients. A satisfactory agreement between the calculation and the experiment was established. The model adequately describes the thermophysical properties of multicomponent composites and is applicable for optimizing the composition, production technology, and improving the accuracy of thermal calculations during product molding.

Keywords: wood-polymer composite (WPC), thermal conductivity coefficient, thermogravimetric analysis (TGA), low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC)

Введение. Разработка изделий из композиционных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками требует достоверных данных об их теплофизических свойствах и важно при проектировании технологических процессов формования изделий из этих композитов. Для экспериментального определения теплопроводности полимеров стационарный метод является наиболее надежным и точным. Современные модификации стационарных методов, в частности относительный метод продольного теплового потока, реализованный в модернизированном приборе, актуальны для исследования опытных партий и малогабаритных образцов. Этот метод позволяет определять теплопроводность в широком диапазоне значений с погрешностью в несколько процентов даже на образцах минимальных размеров [1]. Наряду с изучением кинетики термической деструкции образцы были подвергнуты термогравиметрическому анализу на синхронном термоанализаторе TA Instruments SDT 650 [2]. По данным потери массы на первой стадии была определена равновесная влажность, которая составила 0,9–2,2 %. Полученное значение было учтено при последующем определении теплопроводности для корректировки влияния влаги.

Целью исследования является экспериментальное определение коэффициента теплопроводности ДПК на основе полиэтилена низкой плотности с добавлением карбоната кальция, полиэтилена высокой плотности, полипропилена и поливинилхлорида; сопоставление полученных данных с результатами расчетов для оценки адекватности используемой модели.

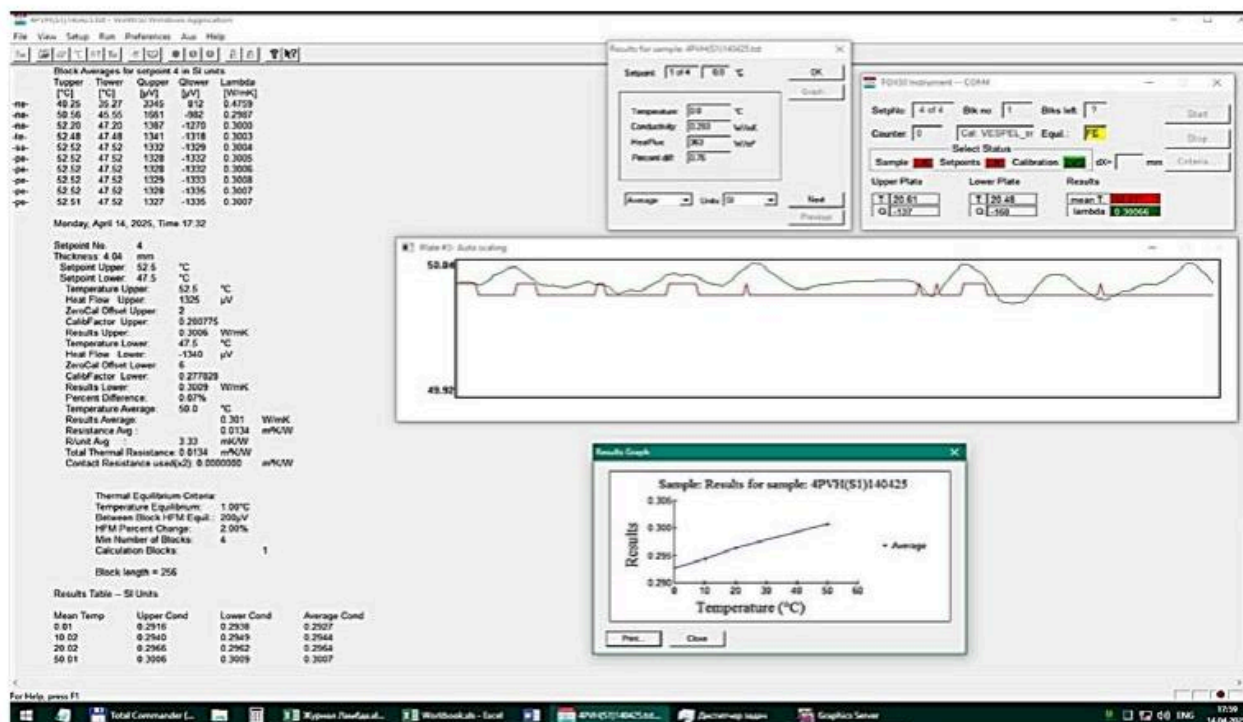
Основные задачи являются: проведение измерения теплопроводности опытных образцов стационарным методом; выполнение расчета коэффициента теплопроводности на основе справочных свойств компонентов с использованием специально разработанной программы ЭВМ; проведение относительного сравнение экспериментальных и расчетных данных. Актуальность метода обусловлена расширением применения древесно-полимерных композитов в ответственных конструкциях; предложенный комплексный подход к оценке теплофизических параметров отличается научной новизной и представляет практическую ценность для оптимизации составов композитов с использованием специализированного программного обеспечения.

Методы и материалы. Измерение теплопроводности образцов древесно-полимерных композитов с различными полимерными матрицами проводилось на анализаторе TA Instruments FOX 50 [3, 4]. Использовался метод плоского слоя в стационарном режиме теплообмена. Управление прибором и об-

работка данных осуществлялись через персональный компьютер с программным обеспечением WinTherm 5.0, подключенный по интерфейсу RS-232. Для каждого материала было исследовано по три образца. Прибор соответствует стандартам ГОСТ 7076 и ASTM C518, его общий вид представлен на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Анализатор теплопроводности FOX 50 (а), интерфейс программы WinTherm 5.0 (б)

Измерительная ячейка состоит из двух параллельных круглых пластин, окруженных охранной теплоизоляцией. Верхняя пластина неподвижна, а нижняя перемещается пневматическим механизмом. Положение нижней пластины отслеживается датчиком перемещения с точностью до 0,025 мм. Образцы в виде дисков диаметром 63 миллиметра и толщиной около 4 мм, указанные на рис. 2, размещались между этими пластинами.



а



б

Рис. 2. Измерительная ячейка анализатора теплопроводности FOX 50 (а), образцы из композитов (б)

Высококчувствительные датчики теплового потока в центральных зонах пластин образованы множеством термопар типа Е, суммирующих сигнал. Этот сигнал пропорционален плотности теплового потока и достигает нескольких тысяч микровольт. Регулирование температуры пластин осуществляется независимо с помощью элементов Пельтье, что обеспечивает точное поддержание заданного теплового градиента. Эксперименты проводились при постоянной разности температур между пластинами в 10 °С. Измерения выполнялись в диапазоне средних температур образца от 0 до 100 °С с шагом

10°. Время установления стационарного режима составляло от 30 до 40 минут для каждой температурной точки. Критерием стационарности служила неизменность показаний термодатчиков во времени. Коэффициент теплопроводности образцов рассчитывалась по формуле (1)

$$\lambda = \frac{q\delta}{(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

где q — удельный тепловой поток, проходящий через образец, Вт/м²; δ — толщина образца, м; T_1 и T_2 — температура на верхней и нижней поверхностях образца, °С.

При определении теоретического значения коэффициента теплопроводности использовалась методика Г.Н. Дульнева и Ю.П. Заричняка, предназначенная для расчета эффективной теплопроводности структур с взаимопроникающими компонентами. Правило методики заключается в том, что любая многокомпонентная система может быть последовательно сведена к двухкомпонентной при расчете эффективной обобщенной проводимости. Суть данного расчета состоит в последовательном рассмотрении бинарных систем и анализе изменения теплопроводности при поэтапном введении каждого последующего компонента в исходный материал или ранее сформированную смесь. При этом объемная концентрация добавляемого компонента определяется относительно объема смеси, рассматриваемой на текущем этапе, а не по отношению к общему объему всех компонентов. Для расчета теплопроводности каждой бинарной системы применяется соответствующая формула, учитывающая топологию фаз в зависимости от их доли и свойств. Обе фазы рассматриваются как топологически эквивалентные. Обобщенная проводимость выражается формулой (2). Расчеты производились с использованием специально разработанного программного обеспечения в MathCad [5]:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_1(B_r^2 + v(1 - B_r)^2 + 2vB_r(1 - B_r)(vB_r + 1 - B_r)^{-1}), \quad (2)$$

$$v = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, r_2 = \frac{g_2 \cdot \rho_1}{g_2 \cdot \rho_1 + g_1 \cdot \rho_2}, B_r = 0,5 + A \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right);$$

$$0 \leq r_2 \leq 0,5 \quad A = -1, \quad \varphi = 2 \cdot \pi - \arccos(1 - 2 \cdot r_2);$$

$$0,5 \leq r_2 \leq 1 \quad A = 1, \quad \varphi = 2 \cdot \pi - \arccos(2 \cdot r_2 - 1),$$

где r_1, r_2 — объемная концентрация компонентов бинарной смеси; g_1, g_2 — массовая доля компонентов бинарной смеси; ρ_1, ρ_2 — плотность компонентов бинарной смеси; λ_1, λ_2 — теплопроводности компонентов бинарной смеси; B_r — относительный размер бруса ячейки при адиабатическом делении; A — параметр, характеризующий влияние включений на теплопроводность; φ — параметр, отражающий влияние структуры на теплопроводность.

Процентное содержание составляющих в многокомпонентной смеси древесно-полимерного композита с различными матрицами представлено в табл. 1.

Таблица 1

Массовая доля компонентов в композитах

Композит	Древесная мука	Термопласт, в т ч аддитивы				Карбонат кальция	Пигмент	Вода	Воздух
		ПЭНП	ПЭВП	ПП	ПВХ				
ДПК_ПЭНП	45	35	–	–	–	15	5	0,90	5
ДПК_ПЭВП	52	–	43	–	–	–	5	2,20	5
ДПК_ПП	55	–	–	40	–	–	5	1,77	5
ДПК_ПВХ	50	–	–	–	45	–	5	1,74	5

Примечание. «–» — не содержится в указанном композите.

Результаты определения коэффициента теплопроводности расчетно-эмпирическим методом приведены на рис. 3.

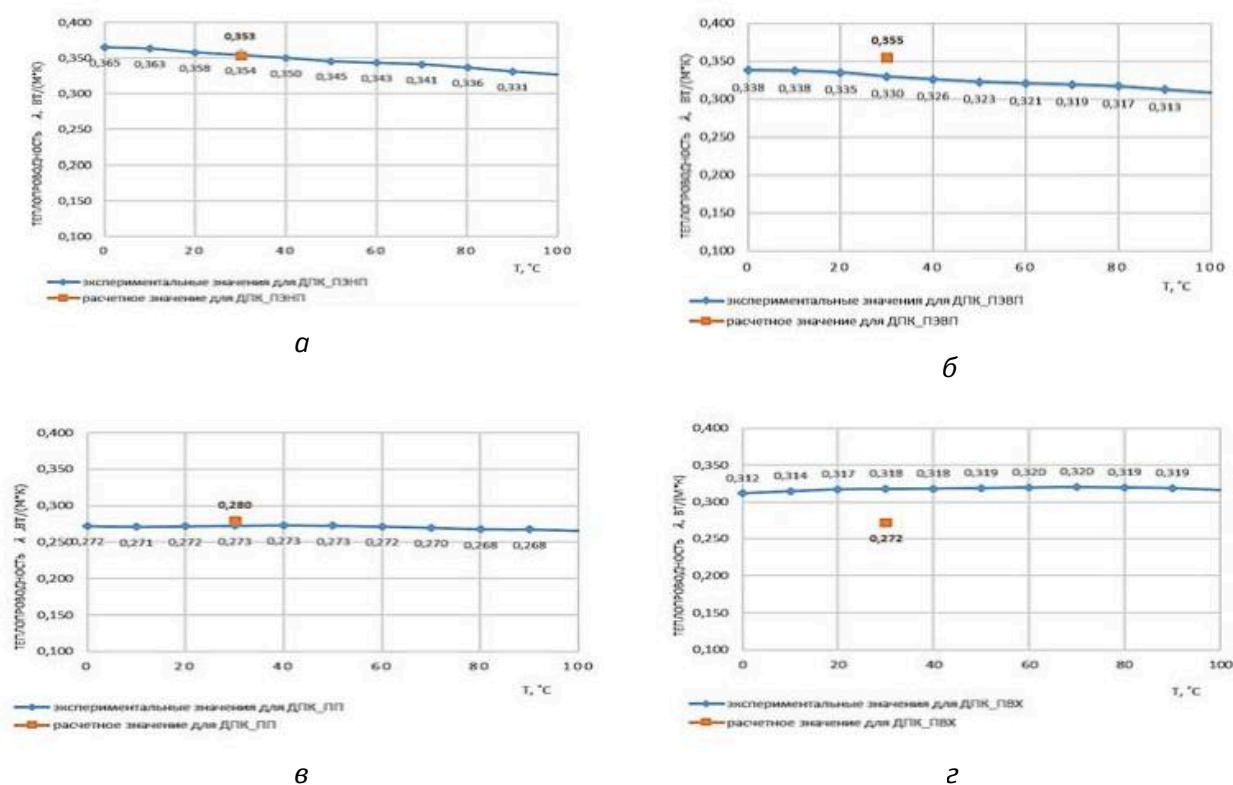


Рис. 3. Коэффициент теплопроводности древесно-полимерного композита с содержанием:
 а — полиэтилена низкой плотности; б — полиэтилена высокой плотности; в — полипропилена;
 г — поливинилхлорида

Обсуждение. Погрешности расчетных и экспериментальных значений теплопроводности древесно-полимерных композитов в абсолютном и относительном выражениях представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений теплопроводности ДПК

Композит	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
ДПК_ПЭНП	0,353	0,346	0,007	2,0
ДПК_ПЭВП	0,355	0,324	0,031	9,6
ДПК_ПП	0,280	0,270	0,01	3,7
ДПК_ПВХ	0,272	0,317	0,045	14,2

Закключение. Экспериментально определены достоверные значения коэффициента теплопроводности для четырех видов древесно-полимерных композитов на основе различных полимерных матриц. Подтверждена адекватность теоретической модели по методике Дульнева — Заричняка для прогнозирования теплопроводности данных композитов, что выражено в удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных данных. Полученные данные имеют практическую ценность и рекомендованы для использования в точных теплотехнических расчетах режимов формования.

Список источников

- [1] Чистов А.Н., Кладов М.Ю., Пронин И.Б., Смирнов А.С. Экспериментальное определение теплопроводности композиционных материалов в широком диапазоне значений при комнатной температуре. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, № 9 (93). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1920>
- [2] Ганиева Э.Н., Ермоченков М.Г., Кладов М.Ю. Кинетика термического разложения древесно-полимерных композитов. *Системы. Методы. Технологии*, 2025, № 2 (66), с. 143–149.
- [3] Tleubaev A., Brzezinski A. Fast Measurements of Absolute Thermal Conductivity Excluding Thermal Contact Resistance Errors. *Proceedings of the 28th International Thermal Conductivity Conference and the 16th International Thermal Expansion Symposium*, Birmingham, Alabama, USA, 2006, pp. 339–347.
- [4] Tleubaev A., Brzezinski A. Errors of the Heat Flow Meter Method Caused by Thermal Contact Resistance. *Proceedings of the 29th International Thermal Conductivity Conference and the 17th International Thermal Expansion Symposium*, Birmingham, Alabama, USA, 2008, 624 p.
- [5] Ермоченков М.Г., Ганиева Э.Н. *Моделирование коэффициента теплопроводности пористых наполненных композитов методом взаимопроникающих компонентов*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025667064 РФ, заявл. 23.06.2025; опубл. 02.07.2025.