

УДК 681.5

ББК 30.83

DOI 10.51955/23121327_2022_2_19

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ АГРЕГАТНЫХ И ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

*Николай Григорьевич Филиппенко,
orcid.org/0000-0002-7557-7774,
кандидат технических наук, доцент
Иркутский государственный университет путей сообщения,
ул. Чернышевского, 15
Иркутск, 664074, Россия
ifpi@mail.ru*

*Денис Викторович Баканин,
orcid.org/0000-0002-1160-5756,
аспирант
Иркутский государственный университет путей сообщения,
ул. Чернышевского, 15
Иркутск, 664074, Россия
denis.bakan@mail.ru*

*Владимир Сергеевич Бычковский,
orcid.org/0000-0002-0653-8472,
аспирант
Иркутский государственный университет путей сообщения,
ул. Чернышевского, 15
Иркутск, 664074, Россия
bikovskii_vs@mail.ru*

Аннотация. Данная работа посвящена разработке системы управления процессом исследования теплофизических свойств и фазовых превращений в полимерных и композитных материалах. Использование полимерных материалов взамен цветных и нержавеющей металлов является необходимым и перспективным процессом при производстве и ремонте узлов и механизмов летательных аппаратов. Особое развитие эта тенденция получила в последние десятилетия не только в авиации, но и целиком в транспортном машиностроении. Замена металлов пластиками и композитами на их основе снижает главный показатель в изделиях данной отрасли, а именно его вес. Зачастую при проектировании и использовании летательных аппаратов становится просто невозможным изготовить конкурентоспособные изделия без применения полимеров и композитов в их конструкции. Прочностные данные полимеров в ряде конструкций ЛА компенсируются ресурсами их использования, которые не всегда измеряются значительными временными показателями. Тем не менее, несмотря на уникальные возможности новых конструкционных полимеров, остается открытым вопрос об их изменяющихся электро-физико-химических свойствах в процессе воздействия на них температурных нагрузок и других факторов внешнего воздействия в период эксплуатации. Представленный авторами алгоритм автоматизированного управления процессом высокочастотной электротермии позволил получать более точные результаты исследований. Реализованный алгоритм автоматизированной системы управления в виде программного комплекса позволил получить новые и уточнить уже имеющиеся результаты ранее проведенных экспериментов в

отношении конструкционных материалов, используемых при изготовлении и ремонте летательных аппаратов и других транспортных средств.

Ключевые слова: транспорт, полимерные материалы, композиты, теплофизические свойства автоматизированная система управления научных исследований, фазовые превращения.

AUTOMATED DEVICE FOR DETERMINING THE CHANGES IN PHASE AND STATE OF POLYMER MATERIALS

*Nikolai G. Filippenko,
orcid.org/0000-0002-7557-7774,
associate professor
Irkutsk State University of Railway Transport,
st. Chernyshevsky, 15
Irkutsk, 664074, Russia
ifpi@mail.ru*

*Denis V. Bakanin,
orcid.org/0000-0002-1160-5756,
graduate student
Irkutsk State University of Railway Transport,
st. Chernyshevsky, 15
Irkutsk, 664074, Russia
denis.bakan@mail.ru*

*Vladimir S. Bychkovsky,
orcid.org/0000-0002-0653-8472,
graduate student
Irkutsk State University of Railway Transport,
st. Chernyshevsky, 15
Irkutsk, 664074, Russia
bikovskii_vs@mail.ru*

Abstract. This paper is devoted to the development of a control system for the study of thermophysical properties and phase transformations in polymer and composite materials. The use of polymeric materials instead of non-ferrous and stainless metals is a necessary and promising process in the production and repair of units and mechanisms of aircraft. This trend has received particular development in recent decades, not only in aviation, but also in the entire transport engineering. Replacing metals with plastics and composites based on them reduces the main indicator in the products of this industry, namely its weight. Often, when designing and operating aircraft, it becomes simply impossible to manufacture competitive products without the use of polymers and composites in their design. The strength properties of polymers in a number of aircraft designs are compensated by the resources of their use, which are not always measured by significant time resources. Nevertheless, despite the unique capabilities of new structural polymers, the issue of changing their electro-physic-chemical properties in the process of exposure to temperature loads and other external factors during operation remains open. The algorithm of automated control and monitoring of the experimental study of the process of high-frequency electrothermy presented by the authors makes it possible to obtain more objective data on the results of the studies. The implemented algorithm of the automated control system, in the form of a software package, made it possible to obtain new and clarify the existing results of previously conducted experiments in relation to structural materials used in the manufacture and repair of aircraft and other vehicles.

Key words: transport, polymeric materials, composites, thermophysical properties, automated control system for scientific research, phase transformations.

Введение

Современные тенденции перехода машиностроения от традиционных конструкционных материалов к полимерам и композитам становятся все более стремительными и востребованными. Транспортное машиностроение в этом стремлении занимает ключевые позиции, т.к. замена металлов пластиками снижает основной показатель в изделиях данной отрасли, а именно его вес. Зачастую при проектировании и использовании летательных аппаратов становится просто невозможным изготовить их без применения полимеров и их композитов [Крыжановский и др., 2003].

Прочностные показатели полимеров в ряде конструкций ЛА компенсируются ресурсами их использования, которые не всегда измеряются значительными величинами.

Тем не менее, несмотря на уникальные возможности новых конструкционных полимеров, остается открытым вопрос об их изменяющихся электро-физико-химических свойствах в процессе воздействия на них температурных нагрузок и других факторов внешнего воздействия в период эксплуатации [Пивень и др., 1996; Bader, 1996].

В связи с этим крайне актуален вопрос об организации экспресс-экспериментальных исследований процессов фазовых и агрегатных превращений, происходящих в конструкционных полимерных и композитных материалах в процессе температурных воздействий.

Материалы и методы

Автоматизированная система проведения экспериментов осуществлялась на базе экспериментального устройства для исследования теплофизических свойств полимеров и композитных материалов, разработанного в иркутском университете путей сообщения, кафедре автоматизации производственных процессов [Лившиц и др., 2013; Буторин и др., 2015; Буторин и др., 2017; Filippenko, 2020]. Модель и эскиз устройства представлены на рис. 1, 2.

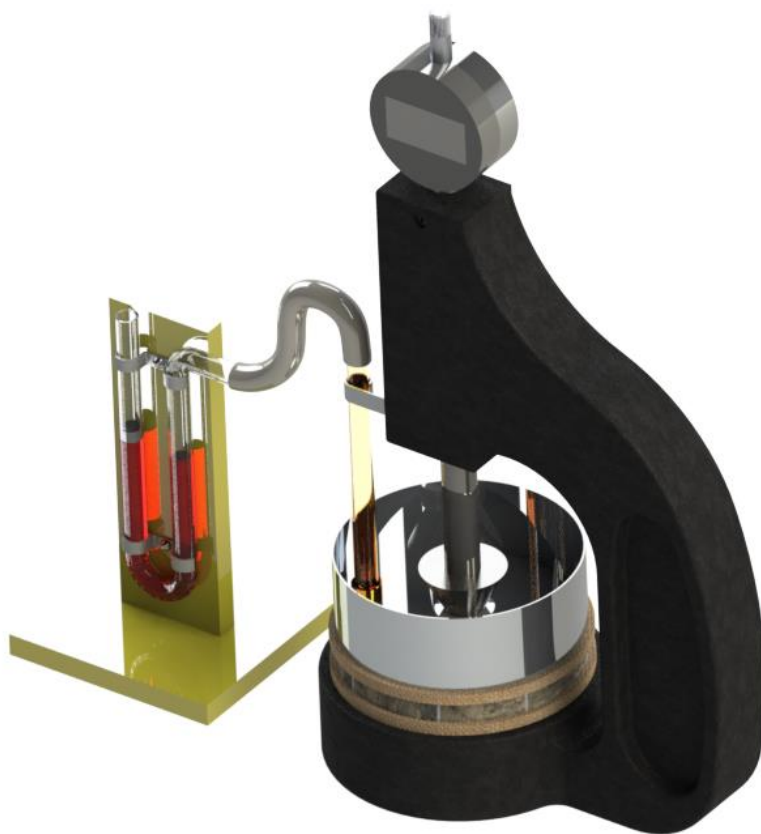


Рисунок 1 – Экспериментальное устройство для исследования теплофизических свойств полимерных и композитных материалов

Принцип работы устройства заключается в следующем. После размещения полимерного или композитного образца 16 на нагревательный элемент, установленный на основании 1, на поверхность образца 16 опускается штوك 2. Индикаторный микрометр 15 электронного типа, соединённый индентором со штоком 2, устанавливается в нулевое положение. Одновременно аналогичный второй опытный образец 17 укладывается в колбу 11.

Колба 11 в свою очередь устанавливается на термopодставку 9, в нее укладывается термопаста для надежного теплового контакта основания колбы с термopодставкой, для лучшей передачи тепла на образец 17, расположенный в колбе 11. Соединение колбы 11 с жидкостным манометром 12 осуществляется термостойкой силиконовой трубкой 13.

В жидкостной манометр налит индикатор (метилоранж или иной), а шкала, распложенная на стенке манометра, позволяет фиксировать перепады уровня жидкости. Также необходимо отметить, что второй конец манометра 12 сообщается с атмосферой.

После проведённых работ включается нагревательный элемент 3, который обеспечивает нагрев образца 16, установленного под штоком 2, и образца 17, установленного в колбе 11.

Температурные расширения опытного образца через шток 2 будут оказывать воздействие на индентор микрометра 15 и выдавать данные по линейному тепловому расширению.

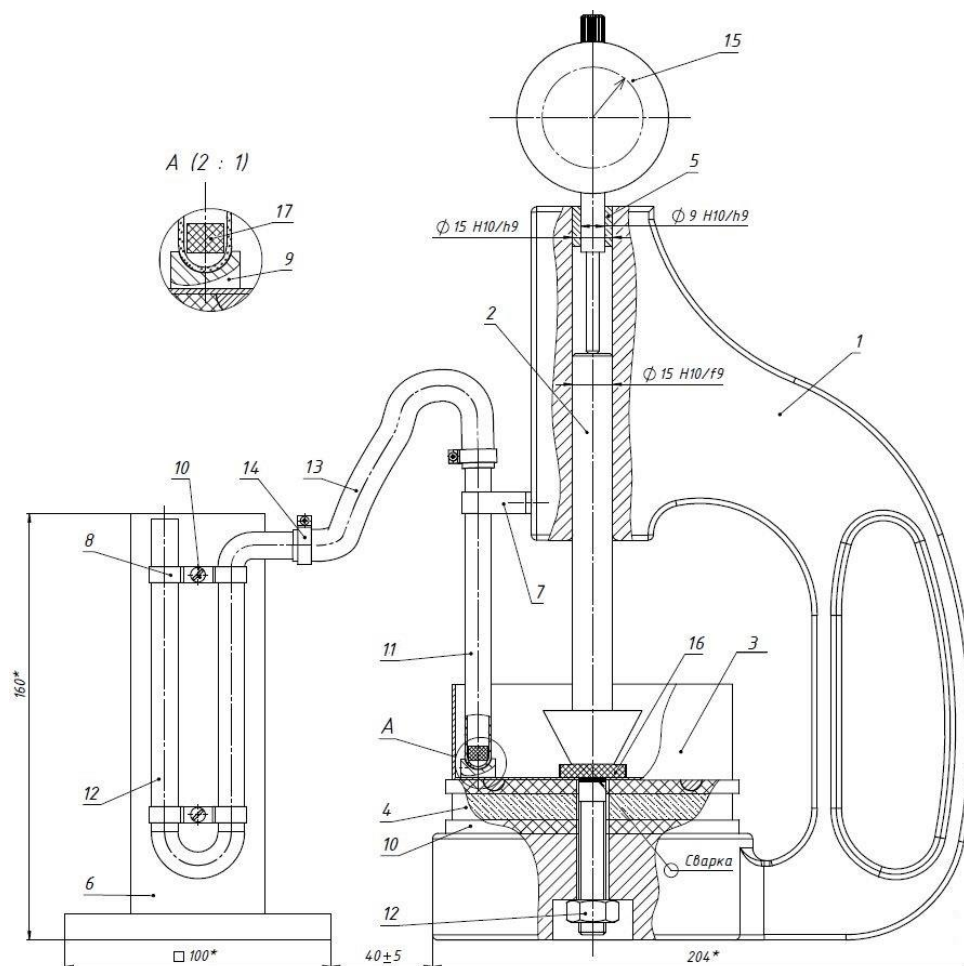


Рисунок 2 – Эскиз экспериментальной установки,

где: 1 – основание; 2 – шток; 3 – нагревательный элемент; 4 – плита теплоизоляционная; 5 – втулка; 6 – стойка; 7 – крепеж; 8 – планка крепежная; 9 – термоподставка; 10 – базальт. вата; 11 – колба; 12 – манометр; 13 – трубка силиконовая; 14 – хомут; 15 – микрометр индикаторный; 16 – опытный образец 1; 17 – опытный образец 2

Нагрев в колбе 11 регистрирует манометр 12 по изменению уровня жидкости, т.е. изменению давления в колбе. Динамика изменения уровня жидкости сигнализирует нагрев, а ее резкая динамика изменения указывает на деструкцию материала. В этом случае (при деструкции) из образца, как правило, выделяется большое количество соответствующего газа. Причем размещенный в емкости индикатор (лакмусовая бумага) позволит определить щелочной или кислотный состав газа (щелочной или кислотный), выделенного из полимерного или композитного материала.

Таким образом, разработанная экспериментальная установка позволяет произвести экспресс-исследования одновременно двух образцов: один на теплофизические свойства (распад сегментальных связей, момент стеклования, температуру плавления, тепловое расширение и т.д.), другой испытывается методом термодеструкции (термостойкость, интенсивность теплового фазового изменения и др.).

Дискуссия

Критический анализ работы экспериментальной установки показал, что в процессе проведения экспериментов не всегда достоверно определялись ряд показателей [Гордов, 1972]. Так, например, у материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ) деструкция при нормальных условиях начинается ниже температуры плавления, а ряд материалов на основе полиуретана и полиамида имеют незначительный интервал температур ($\Delta = 2 - 5$ °C) между расплавом и деструкцией.

В связи с этим были определены следующие подзадачи:

- а) автоматизировать процесс линейного равномерного нагрева опытного образца;
- б) обеспечить объективность и точность измерения линейного теплового расширения нагреваемого образца;
- в) контролировать в реальном времени динамику выделения газа при терморазложении полимера, путем измерения уровня жидкости в манометре;
- г) определение оптической плотности выделившегося газа и индикатора при деструкции опытного образца.

Проведённый анализ разработанной установки, как объекта управления, позволил сделать вывод, что на данном оборудовании возможна реализация автоматизированной системы контроля вышеуказанных параметров.

Первая из подзадач при разработке АСУ процессом исследования заключалась в организации линейного (с постоянной скоростью) равномерного разогрева опытных образцов.

Наибольшее распространение, на сегодняшний день, получили следующие основные законы регулирования систем: позиционный, пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-дифференциальный (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).

Позиционный закон регулирования температуры был выбран в качестве наиболее простого. Основываясь на этом заключении, была организована подача мощности на нагреватель до достижения им заданного заранее значения температуры, после чего нагрев прекращался. Экспериментальное исследование показало, что такое регулирование приводит к тому, что даже после отключения за счет инерционности системы разогрев не прекращался. Зачастую такая система управления приводила к перегреву и деструкции материала. Аналогичная картина наблюдалась и в процессе остывания, т.к. система после достижения нижнего порога температуры и включения нагрева вначале тратила энергию на разогрев самой себя, окружающей среды и других внешних факторов технологической системы.

Таким образом, при таком (позиционном) законе регулирования имелись значительные колебания рядом с заданными значениями температуры [Термодат, 2021; Frohlich, 1980].

Снижение таких колебаний или устранения такого недостатка в регулировании позволяют организовать пропорционально, интегрально дифференциальный (ПИД) способ регулирования.

Принцип его управления заключается в том, что он предварительно уменьшает мощность нагреваемого изделия до момента достижения им заданной температуры. Такой способ регулирования зарекомендовал себя как способ поддержания температурного режима с более высокой точностью, чем исследуемый ранее позиционный закон регулирования. Мощность нагревателя определяется в процентном отношении от максимальной мощности и может быть рассчитана по следующей формуле (1):

$$N = \frac{1000}{K_p} \times \left(\Delta T + \frac{1}{K_i} \times \int_0^{\Delta T} \Delta T \times dt - K_d \times \frac{dT}{dt} \right). \quad (1)$$

Где: K_p , K_i , K_d – это пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулирования соответственно, а ΔT величина определяемой регулятором ошибки в значении заданной и фактической температуры.

Пропорциональная величина ПИД регулятора предназначена для нивелирования ошибки заданной температуры (2), определенной в наблюдаемый момент времени [Липа, 2021].

$$\Delta T = T_{yc} - T, \quad (2)$$

где: T_{yc} – заданная температура (уставка); T – измеренная температура.

Регулятор будет уменьшать мощность, когда пропорциональная величина ΔT сравняется со значением пропорционального коэффициента K_p :

$$\Delta T = K_p \quad (3)$$

Использование одного вида регулирования не позволяет достичь заданного значения температуры, т.к. всегда присутствует статическая ошибка. Она заключается в том, что, приближаясь к заданной (максимальной) температуре, мощность будет уменьшаться и при нулевом значении регулятор ПИД приблизит систему к T_{yc} .

Учитывая, что технологическая система разработанного нами устройства для определения фазовых и агрегатных превращений в полимерных и композитных материалах будет использоваться в условиях приближенных к производственным, было определено, что внешние возмущения на систему будут весьма велики. Поэтому с целью устранения погрешности статической ошибки была введена интегральная составляющая ПИД регулятора, что и позволило организовать систему управления нагрева, обладающую большой чувствительностью [Слепнева, 2014].

Исключение из организованного ПИД регулятора дифференциальной составляющей было определено на основании полученных экспериментальных данных. Они показали, что введение ее в систему управления дестабилизировало нагрев и вызвало большие отклонения от заданных значений. Это объясняется еще и тем, что к работе системы дополнительно предъявлялись требования по разогреву образцов полимера с линейной скоростью нагрева не более 2 градусов в минуту.

Для реализации линейного равномерного нагрева полимерных образцов был экспериментально подобран ПИ-закон регулирования, полностью удовлетворяющий условию решаемой задачи. Схема ПИ-регулирования представлена на рис. 3.

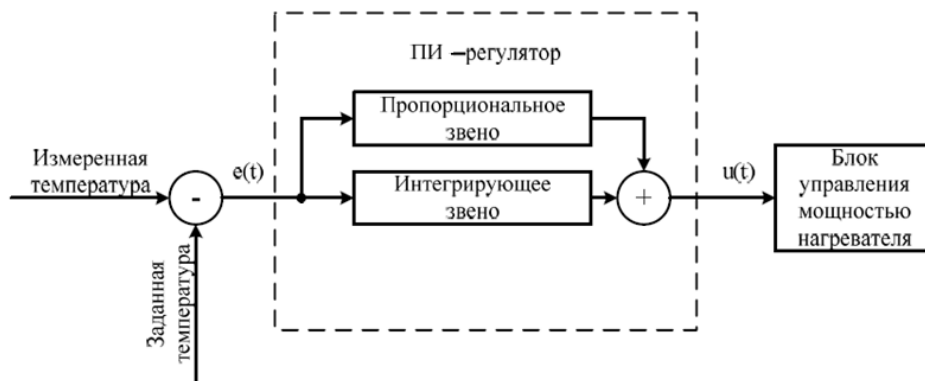


Рисунок 3 – Схема ПИ-регулирования, где: $e(t)$ – сигнал рассогласования, ошибка управления; $u(t)$ – регулирующее воздействие

Процесс настройки ПИ-регулятора осуществлялся путем задания установочной температуры (уставки) и значений ПИ-коэффициентов.

Предварительный подбор коэффициентов осуществлялся в имитационной среде Matlab/Simulink, в которой была построена математическая модель системы управления с ПИ-регулятором.

Основной задачей автоматизации является обеспечение равномерного нагрева с постоянной скоростью [Термодат, 2021]. Этого удалось достичь после определения функции управления нагревом, которая устанавливала зависимость заданной температуры (уставки) T_{yc} от времени нагрева t по формуле (3) [Платунов, 1973]:

$$T_{yc} = \frac{t}{12} \quad (3)$$

Указанная зависимость (3) обеспечивает постоянную скорость нагрева 5 °С/мин. Данная скорость обеспечивает равномерный нагрев опытного образца, а также интенсивное выделение газа при его деструкции.

Регулирующее воздействие ПИ-регулятора управляет шириной A (длительности) импульса ШИМ. Силовое управление от ШИМ осуществлялось твердотельным реле, коммутирующим нагрузку нагревательного элемента. Принцип работы ШИМ предоставлен на рис. 4.

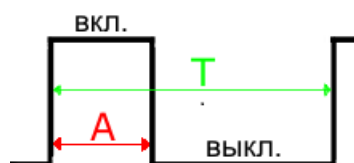


Рисунок 4 – Общий вид ШИМ-сигнала, где: A – ширина импульса; T – период ШИМ; T/A – скважность ШИМ; A/T – величина ШИМ (коэффициент заполнения)

ШИМ разработанной системы равномерного нагрева изображен на рис. 5, период ШИМ, равный 500 мс, был определен экспериментально.

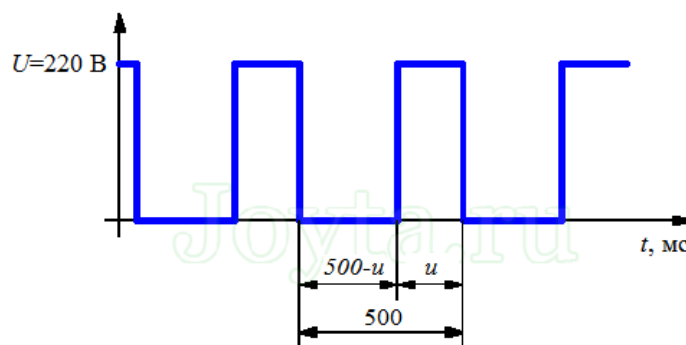


Рисунок 5 – ШИМ управление нагревательного элемента, где: u – регулирующее воздействие ПИ-регулятора

Для контроля динамики выделения газа при терморазложении полимера, необходимо измерять в реальном времени уровень жидкости в манометре. Для этого было разработана конструкция «поплавок», представленная на рис. 6.

Принцип работы конструкции: внутрь манометра 4 опущен цилиндрический поплавок 2 из материала малой плотности, в который встроен магнит 3; снаружи к трубке манометра относительно этого поплавка приклеен датчик Холла 1. В результате чего при увеличении уровня жидкости 5 в манометре поплавок начнет подниматься вверх, изменяя магнитное поля, тем самым воздействуя на датчик Холла [Волович, 2004].

Для определения оптической плотности выделившегося газа и индикатора при деструкции опытного образца были подобраны датчики измерения RGB и светодиодные источники. Выходное напряжение данных датчиков пропорционально интенсивности излучения [Безрукова, 1991].

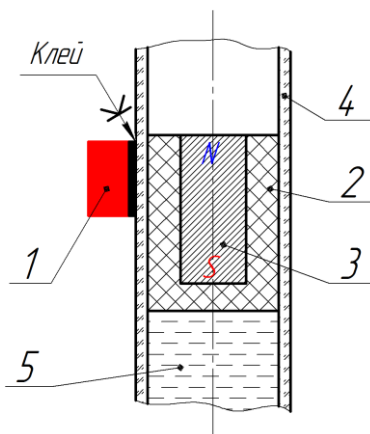


Рисунок 6 – Конструкция «поплавок», где: 1 – датчик Холла; 2 – поплавок; 3 – магнит; 4 – манометр жидкостный; 5 – жидкость

Преимуществом светодиодных источников света является то, что они не нагревают исследуемую среду. Воздействие электромагнитного излучения на молекулы жидкости и газа приводит к фотоэффекту, возбуждая электроны и изменяя энергию колебательной и вращательной системы вещества. Известно,

что УФ-воздействие меняет электронную энергию, а ИК-излучение меняет колебательные и вращательные системы в молекулах.

Все это успешно используется при спектроскопии, определяющей химический состав жидкости и газа по получаемым спектрам поглощения, что доказывает правильность выбора метода диагностирования [Безрукова, 1991], [Платунов, 1973].

Датчики цвета RGB, как было сказано ранее, имеют два основных компонента – трехцветный (RGB) светодиод, который излучает красный, синий и зеленый свет, а также светочувствительный датчик (фоторезистор), который определяет интенсивность падающего на него света.

При выборе датчиков оптической плотности выделившегося газа в стеклянной колбе, нами было принято во внимание то, что стекло колбы пропускает определенные длины волн электромагнитного излучения: ближний свет ультрафиолета – 315...400 нм; ближнее инфракрасное излучение – 0,76...2 мкм. Таким образом, установка УФ и ИК ламп, датчиков расширила возможности экспериментальной установки, что позволило проводить исследования полимерных материалов различного физико-химического состава и структуры.

Результаты

Разработанная структурная схема устройства и системы автоматизированного управления процессом проведения экспериментов по определению фазовых и агрегатных превращений в полимерных и композитных материалах представлена на рис. 7.

На первом этапе происходит загрузка полимерных образцов в устройство. Микроконтроллер считывает температуру с термопары t_1 и посылает её на ПИ-регулятор. ПИ-регулятор определяет и выдает регулирующее воздействие через широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), на симисторную силовую схему, которая коммутирует высоковольтную нагрузку нагревательного элемента. Нагреватель греет равномерно с постоянной скоростью. Так же в это время микроконтроллер снимает показания с термопары t_2 через усилитель и показания с Датчика Холла H – интенсивность выделения газа при деструкции полимера. Далее данные выводятся на компьютер. Также на компьютер считываются: значение линейного теплового расширения образца с электронного микрометра L ; показатели оптической плотности выделяемого газа с инфракрасного (ИК) датчика IR и ультрафиолетового (УФ) датчика UV ; показатели оптической плотности жидкости при индикации метилоранжа с цветового датчика RGB .

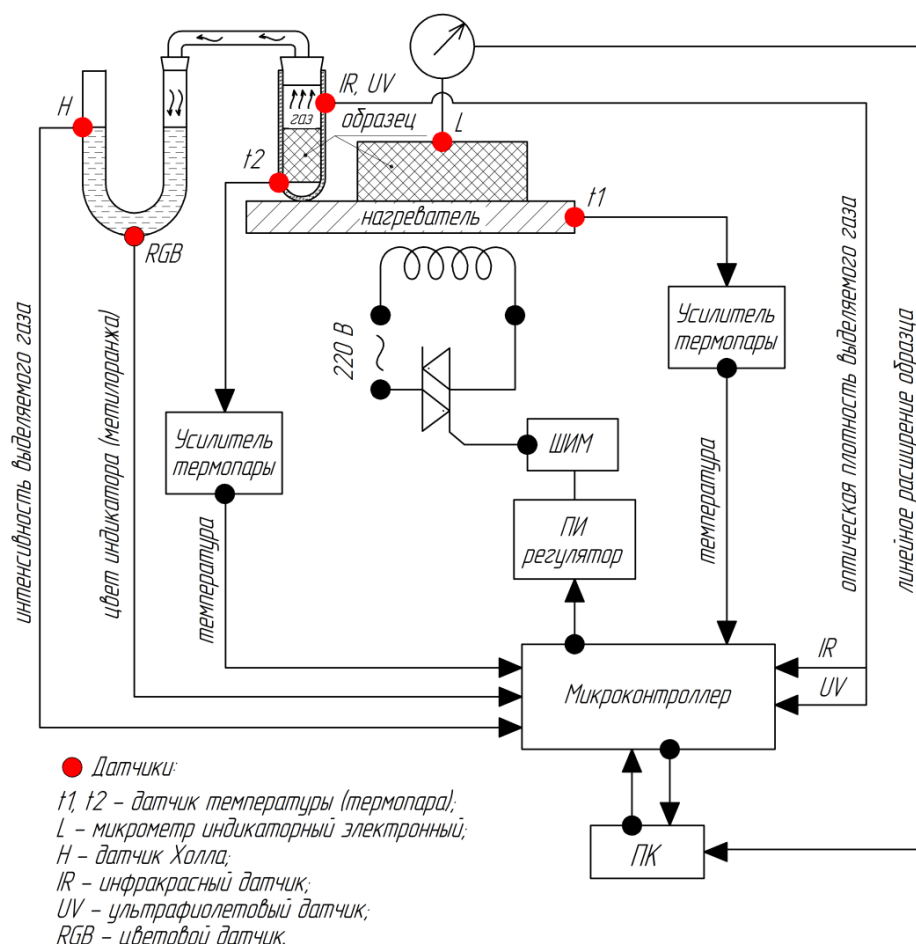


Рисунок 7 – Структурная схема системы автоматизации

В соответствии с данной структурной схемой автоматизации был разработан алгоритм автоматизированной системы экспериментальных исследований.

Алгоритм АСУ

Разработанная методика и, соответственно, алгоритм автоматизированной системы управления процессом нагрева полимерных материалов (рис. 8) имеют следующие преимущества. Несмотря на значительную тепловую инерционность технологической системы, ПИ-закон регулирования обеспечил линейный (монотонный) нагрев образца. Оператор имеет возможность изменять параметры работы системы в зависимости от исследуемого материала, а именно, скорость нагрева ($V_{\text{нагрев.}}$) и максимальную температуру нагрева (T_{max}). В соответствии с представленным алгоритмом был разработан программный модуль.

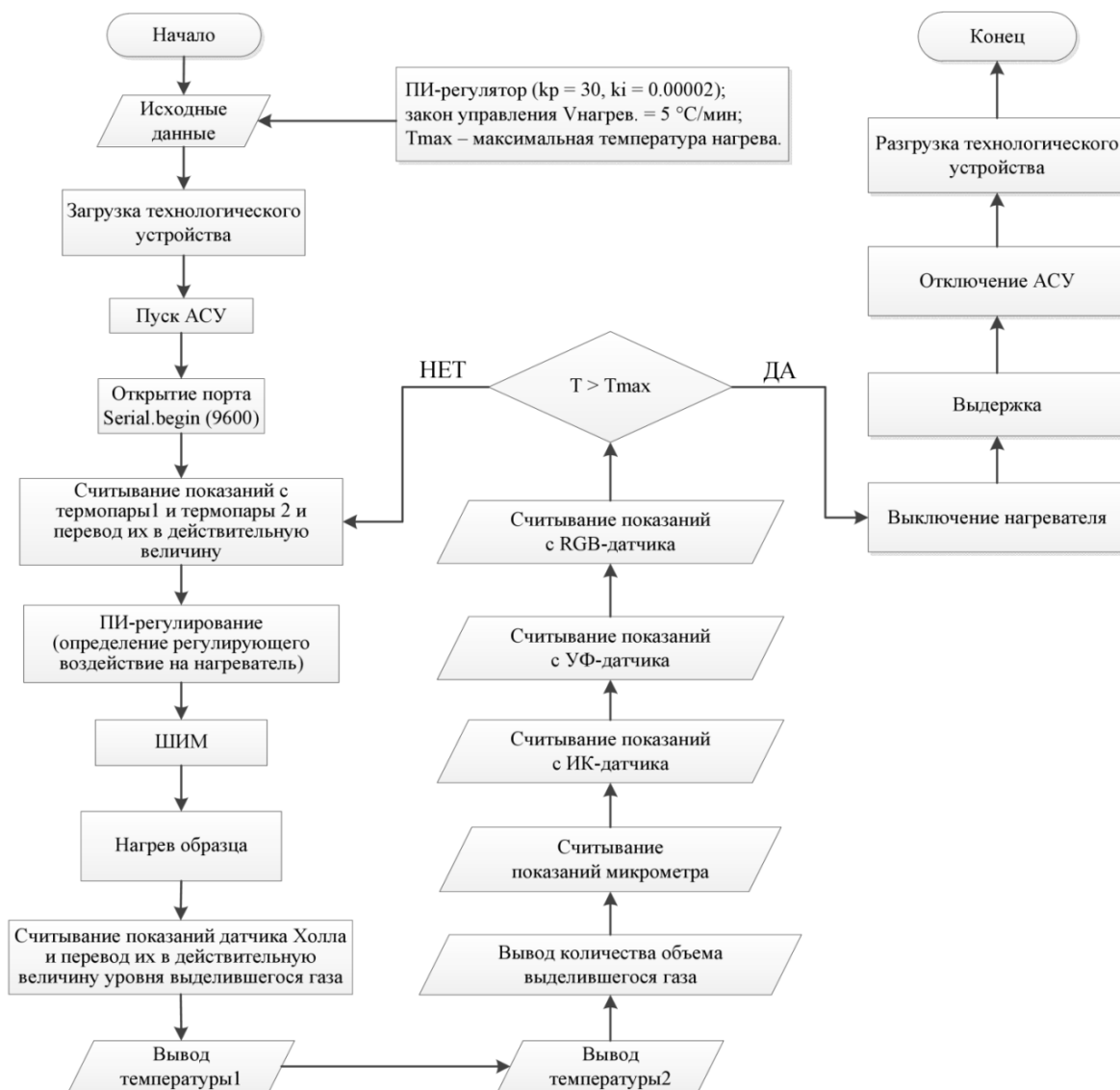


Рисунок 8 – Алгоритм работы автоматизированного устройства

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение позволило перейти к проведению автоматизированного эксперимента.

Исследование на автоматизированном устройстве

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы из стеклонаполненного полиамида марки ПА-6, «Армид» диаметром 50 мм и высотой 4 мм. Режимы механической обработки образцов были подобраны таким образом, чтобы температура в зоне резания не воздействовала на обрабатываемую поверхность.

Результаты исследования полимерного композитного материала «Армид» представлены на рис. 9.

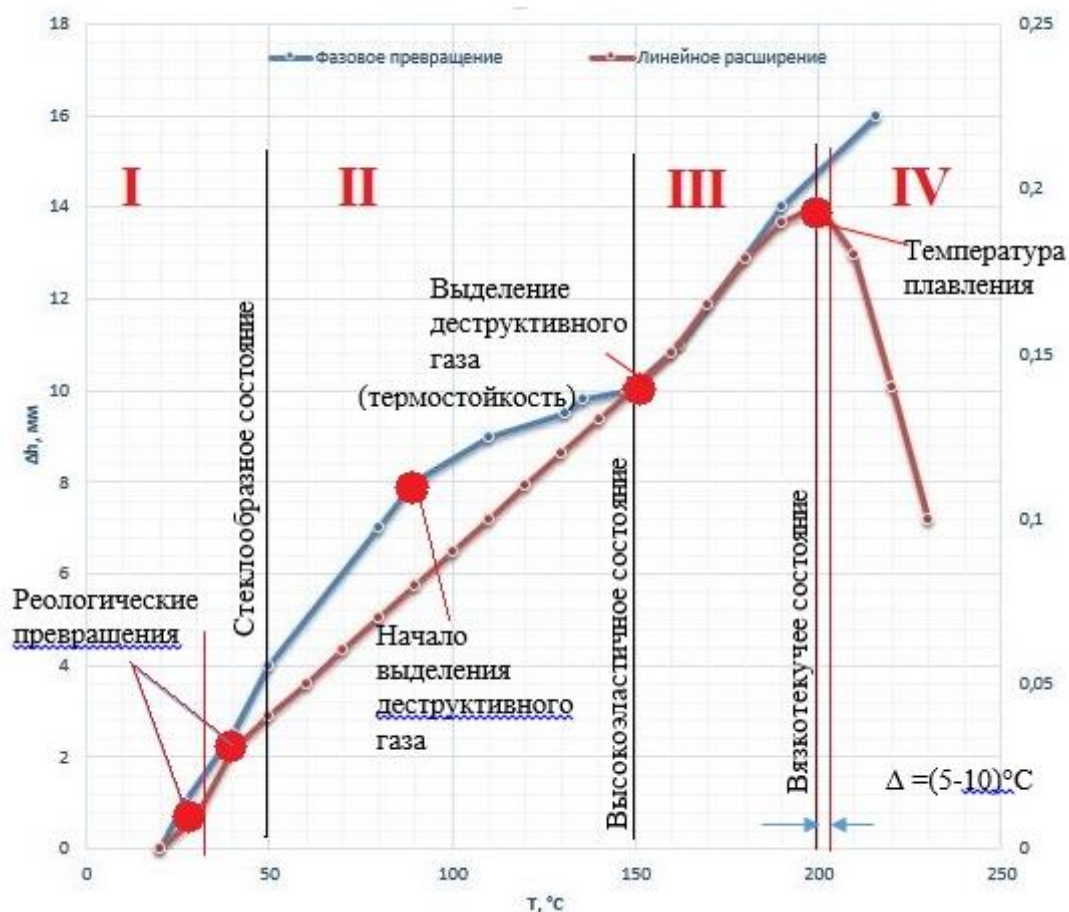


Рисунок 9 – График линейного расширения и фазового превращения полимера Армамид

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что в каждом агрегатно-фазовом состоянии (стеклообразное, высокоэластичное, вязкотекучее) определенно идентифицируются различные превращения и изменения материала (реологические, деструктивные, плавление). Полученные результаты частично подтверждают декларируемые производителем данные (температура текучести 160 °C), а также указывают на неуказанные ранее превращения в полимере, происходящие при температуре до 50 °C. Все полученные результаты имеют большое практическое значение, и их необходимо учитывать при производстве и эксплуатации изделий из ПА-6.

Заключение

В ходе настоящей работы были получены следующие научные и практические результаты:

- разработано и исследовано экспериментальное оборудование на предмет его автоматизации;
- найден закон регулирования и определена управляющая функция нагрева полимерных образцов с постоянной линейной скоростью;

- обоснованы и выбраны способ и методика измерения контролируемых параметров;
- разработано алгоритмическое обеспечение автоматизированного процесса контроля, измерения и обработки экспериментальных данных, позволяющее повысить скорость и точность измерений;
- разработан и реализован алгоритм автоматизированной системы управления.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать и реализовать автоматизированную систему контроля агрегатных и фазовых изменений в полимерных и композитных материалах, используемых в процессе изготовления и ремонта изделий машиностроения и транспортных средств.

Библиографический список

- Безрукова Е. Н.* Влияние потерь тепла по термопаре при измерении температуры в твердых телах / Е. Н. Безрукова, О. А. Сергеев, Д. А. Татарашвили // Тр. ин-тов Комитета стандартов. – Л.: Стандарты, 1991. Вып. 129 (189). С. 187-192.
- Буторин Д. В.* Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц // Информационные системы и технологии. – Орел: ОГУ имени И. С. Тургенева, 2017. № 1 (99). С. 44-53.
- Буторин Д. В.* Разработка методики определения структурных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. Вып. 4(48) С. 80-86.
- Волович Г. С.* Интегральные датчики Холла // Современная электроника. 2004. Вып. 12. С. 26-31.
- Гордов А. Н.* О методике определения погрешностей результата измерений / В. С. Пеллинец, А. Е. Синельников // Тр. метрол. ин-тов СССР. ВНИИ-ме-фол. 1972, вып. 130 (190) С. 102-109.
- Крыжановский В. К.* Технические свойства полимерных материалов: Учебно-справочное пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. – СПб: Профессия, 2003. – 240 с.
- Лившиц А. В.* Исследование влияния диэлектрических элементов рабочего конденсатора высокочастотной электротермической установки на процесс обработки полимерных материалов / А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 270-275.
- Лука О. А.* Использование регуляторов непрямого действия для управления процессами поддержания параметров микроклимата в условиях статической неопределённости // [Электронный ресурс]. – 2021 URL: edu.rgazu.ru/file.php/1/vestnik_rgazu/data/20140519155047/013.pdf (дата обращения: 10.10.2021).
- Пивень А. Н.* Теплофизические свойства полимерных материалов: справочник / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. – Киев: издательское объединение «Вища школа», 1996. 180 с.
- Платунов Е. С.* Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л.: Энергия, 1973. 143 с.
- Слепнева, Л. М.* Физикохимия полимеров: Электронный учебно-методический комплекс. Минск: 2014. 129 с.

Термодат А. С. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов // [Электронный ресурс]. – 2021 URL: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf>, (дата обращения: 10.10.2021).

Bader H. High frequency drying of porous materials // *Drying Technology*. 1996. V. 14, № 7-8. P. 1499-1523.

Filippenko N. G. Research of high-frequency influence on polymeric materials of rolling stock products // *WoSIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020 C. 012021.

Frohlich H. The biological effects of microwaves and related questions // *Adv. Electron, and Electrom Plius*, 1980. V. 53. P. 85-152.

References

Bader N. (1996). High frequency drying of porous materials. *Drying technology*. V. 14: 7-8: 1499-1523.

Bezrukova E. N., Sergeev O. A., Tatarashvili D. A. (1997). Influence of heat losses by thermocouple when measuring temperature in solids. *Standards*. 129 (189): 187-192. (In Russian)

Butorin D. V., Filippenko N. G., Filatova A. V., Livshits A. V., Kargapol'tsev S. K. (2015). Development of methods for determining structural transformations in polymer materials. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. Irkutsk: Ir-GUPS. 4(48): 80-86. (In Russian)

Butorin D. V., Filippenko N. G., Livshits A. V. (2017). Automation of the process of control of phase and relaxation transformations in polymeric materials. *Information systems and technologies*. Orel: OGU named after I. S. Turgenev. 1 (99): 44-53. (In Russian)

Filippenko N. G. (2020). Investigation of high-frequency impact on polymer materials of rolling stock products // *WoSIOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020 p. 012021.

Frohlich H. (1980). Biological effects of microwaves and related issues. *Adv. Electron and Elektrom Plius*. V. 53: 85-152.

Gordov A. N., Pellinets V. S., Sinelnikov A. E. (1972). On the methodology for determining measurement result errors. *Tr. metrol. Institute of the USSR. VNII-me-fol*. 130(190): 102-109. (In Russian)

Kryzhanovsky V. K., Burlov V. V., Panimatchenko A. D. (2003). Technical properties of polymer materials: Textbook. St. Petersburg: Profession, 240 p. (In Russian)

Lipa. A. (2021). The use of indirect action regulators to control the processes of maintaining microclimate parameters in conditions of static uncertainty – Access mode: [Electronic resource] – URL: http://edu.rgazu.ru/file.php/1/vestnik_rgazu/data/20140519155047_/013.PDF format. (accessed 10.10.2021). (In Russian)

Livshits A. V., Filippenko N. G. (2013). Investigation of the influence of dielectric elements of the working capacitor of a high-frequency electrothermal installation on the processing of polymer materials. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 3 (39): 270-275. (In Russian)

Piven A. N., Grechanaya N. A., Chernobytsky I. I. (1996). Thermophysical properties of polymer materials: handbook. Kiev: Publishing association "Vishcha shkola", 180 p. (In Russian)

Platunov E. S. (1973). Thermophysical measurements in monotonic mode. *Energy*, 143 p. (In Russian)

Slepneva L. M. (2014). Physic chemistry of polymers – Minsk, 129 p. (In Russian)

Thermodat A. S. (2021). PID-the law of regulation. Methods for finding the coefficients of PID – Repress access: [Electronic resource] – URL: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf>, (accessed 10.10.2021). (In Russian)

Volovich G. C. (2004). Integral Hall sensors. *Modern Electronics*. V. 12: 26-31. (In Russian)