

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-47-54>

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМОВАКУУМНОЙ ПРОПИТКИ И НАБУХАНИЯ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ ЭЛАСТОМЕРОВ

© Николай Григорьевич Филиппенко

Иркутский государственный университет путей сообщения «ИрГУПС», Россия, 664075, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; e-mail: ifpi@mail.ru

*Статья поступила 8 февраля 2023 г. Поступила после доработки 17 марта 2023 г.
Принята к публикации 23 мая 2023 г.*

При определении набухания полимерных материалов в агрессивных средах стандартными методами возникают значительные погрешности измерений. Поэтому необходимо совершенствование лабораторных методов и средств диагностики для решения исследовательских задач за счет автоматизации существующих процессов проведения испытаний с минимизацией или полным исключением субъективных составляющих погрешностей измерения. В работе представлена автоматизированная система управления (АСУ) процессом набухания герметизирующих эластомеров, использующихся в конструкциях емкостей, танков и агрегатов для хранения, перевозки, эксплуатации и перекачки жидкостей различного происхождения и свойств. Показаны способы аппаратной и алгоритмической реализации разработанной автоматизированной системы исследований и испытаний пропитки и набухания герметизирующих полимеров на примере наполнения стандартной рабочей жидкостью образцов эластомеров марки МБС. Полученные результаты могут быть использованы для сокращения времени пропитки и набухания герметизирующих эластомеров за счет предложенного метода заполнения и разработанной интегрированной АСУ процессом заполнения.

Ключевые слова: автоматизация; алгоритм управления; пропитка; набухание; полимеры; эластомеры.

A SYSTEM OF AUTOMATED CONTROL OF THERMAL VACUUM IMPREGNATION AND SWELLING OF SEALING ELASTOMERS

© Nikolay G. Filippenko

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), 15, ul. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664075, Russia; e-mail: ifpi@mail.ru

Received February 8, 2023. Revised March 17, 2023. Accepted May 23, 2023.

When determining the swelling of polymeric materials in aggressive environments by standard test methods, significant measurement errors occur which entails the necessity of improving laboratory methods and diagnostic tools to solve research problems by automation of existing testing processes and minimization or complete elimination of the subjective components of measurement errors. We present an automated control system (ACS) for the process of swelling of sealing elastomers used in the construction of containers, tanks and units for storage, transportation, operation and pumping of liquids of various origins and properties. Methods of hardware and algorithmic implementation of the developed automated system for studying and testing impregnation and swelling of sealing polymers are shown on the example of filling MBS elastomer samples with a standard working fluid. The results obtained can be used to reduce the time of impregnation and swelling of sealing elastomers due to the proposed filling method and the developed integrated automatic control system for the filling process.

Keywords: automation; control algorithm; impregnation; swelling; polymers; elastomers.

Введение

Конструкция и использование изделий из полимеров предусматривают их эксплуатацию в контакте с агрессивными средами различной этиологии. Чаще всего подобные изделия приме-

няют для обеспечения герметизации тех или иных соединений.

При контакте полимеров со средами (растворителями) происходит взаимодействие, приводящее к их набуханию [1 – 3]. Набухание полимера

связано с изменением его структуры и увеличением объема. При этом давление в полимере может значительно меняться (от нескольких десятков до сотен мегапаскалей), что приводит к выходу из строя в процессе эксплуатации изделий из этих материалов [4 – 7].

Существующие методы испытаний полимеров на стойкость к воздействию жидких агрессивных сред (ГОСТ 269–96, ГОСТ 9.030–92, ОСТ 7338–90) и проведенные на их основе натурные испытания показали, что затрачиваемое время на пропитку материала составляет (для эластомера марки МБС) 144 ч. Было также отмечено, что точностные показатели измерения массы пропитанных образцов во многом зависят от чистоты проведения испытаний (качества удаления свободной жидкости с поверхности образцов). Отметим, что в условиях производственных подразделений это трудно выполнимо и затратно. В этом случае точность полученных данных обеспечивается большим количеством экспериментов, что неизбежно приводит к увеличению трудоемкости.

Цель работы — разработка автоматизированной системы управления (АСУ) процессом пропитки и набухания герметизирующих эластомеров.

Методика

Исследования кинетики пропитки полимеров показывают, что изменение объема и массы полимерного образца в результате поглощения жидкостей характеризуется степенью набухания, определяемой отношением массы и объема исходного и набухшего материалов [7]. В зависимости от материала полимера и растворителя набухание может быть ограниченным или носить неограниченный характер [8]. В качестве условий проведения испытаний, как правило, принимают нормальные условия.

Физика процесса набухания многостадийна. Упрощенно она может быть представлена завершающим этапом пропитки, на котором молекулы растворителя встраиваются между макромолекулами и увеличивают пространство между отдельными сегментами и цепями полимерного материала [9].

Для определения динамики пропитки и набухания полимерных материалов используют различные методы, направленные на повышение точности и уменьшение трудоемкости.

Один из основных и наиболее точных — гравиметрический метод, заключающийся в периодическом взвешивании полимерных образцов, помещенных в среду растворителя. Степень

набухания полимера в этом случае определяют, используя следующую формулу:

$$Q = \frac{m_{\text{проп}} - m_{\text{исх}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $m_{\text{исх}}$, $m_{\text{проп}}$ — массы образца до и после пропитки и набухания.

Метод удлинения нитей применяют для испытания полимеров, выполненных в виде различных полос и нитей. Предварительно измеренный образец помещают в емкость с растворителем и измеряют его длину после окончательного заполнения и набухания. Степень набухания рассчитывают по формуле

$$Q = \frac{l_{\text{проп}} - l_{\text{исх}}}{l_{\text{исх}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $l_{\text{исх}}$, $l_{\text{проп}}$ — длины образца до и после пропитки и набухания.

Отметим, что данным методом можно измерять степень набухания и других, геометрически более сложных изделий. При этом в случае изотропности материала полимера измерения можно ограничить одним из параметров его геометрии.

Наиболее удобный и приемлемый по соотношению трудозатраты — точность — объемный метод контроля процесса набухания. При его использовании образец полимера помещают в устройство и измеряют объем жидкости до и после ее поглощения. Затем проводят расчет объема поглощенного растворителя:

$$V_p = V_{\text{исх}} - V_{\text{ост}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{исх}}$, $V_{\text{ост}}$ — исходный и остаточный объемы растворителя.

Далее определяют степень набухания полимера:

$$Q = \frac{V_p \rho}{m_{\text{исх}}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность растворителя.

Обсуждение результатов

Изучение и анализ основных способов контроля набухания полимерных материалов показали, что контролируемые параметры процесса заполнения — изменения массы Δm , линейного размера Δl образцов до и после пропитки и объема ΔV заполненной жидкости (растворителя). Причем в качестве параметров контроля, соответствующих критериям высокой точности в совокупности с низкими трудозатратами проведения контрольных испытаний, целесообразнее ис-

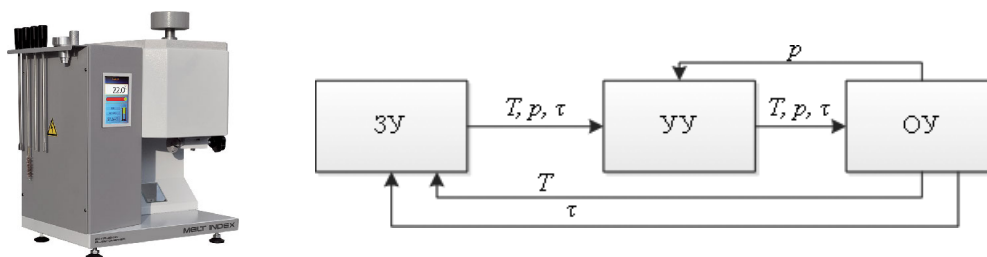


Рис. 1. Пластомер MELT-Index и его структурная схема управления

Fig. 1. A Plastomer MELT-Index and a block diagram of the control



Рис. 2. Оборудование ускоренного старения и деградации полимерных материалов NoseLab ATS: а, б — модели оборудования с графическим принтером и интегрированным электронным устройством LAB; в — интерфейсное устройство LAB; з — структурная схема управления

Fig. 2. Equipment for accelerated aging and degradation of polymeric materials NoseLab ATS: а, б — equipment models with a recorder and an integrated electronic device LAB; в — LAB interface; d — control block diagram

пользовать изменяемый размер Δl образца при пропитке и объем ΔV впитываемой жидкости [10 – 12].

На рис. 1 представлены современный пластомер MELT-Index и его структурная схема управления. Методика работы пластомера предполагает, что материал исследуемого полимера через определенные промежутки времени взвешивается на аналитических весах. После взвешивания вручную осуществляются вычисления.

Заметим, что роль штатно установленной АСУ заключается в поддержании постоянной температуры T и заданной влажности p в определенном диапазоне.

Из схемы управления видно, что установка поддерживает заданные условия (ЗУ) испытаний в определенных влажностно-температурных пределах, обеспечивающихся управляющим устройством (УУ). За объект управления (ОУ) принят только динамический процесс проведения испытаний.

Анализ алгоритма работы и управления оборудования ускоренного старения и деградации полимерных материалов NoseLab ATS (рис. 2) показывает, что оборудование обеспечивает поддержание температуры T в диапазоне от -70 до

180 °С и влажности p от 20 до 98 %. Настройку показателей осуществляют при помощи электронных регуляторов (ЭУ) с передачей данных на персональный компьютер (ПК) с использованием интерфейса LAB. Установленный графический принтер (ГП) фиксирует концентрацию агрессивной среды в рабочей камере.

Отметим, что в оборудовании NoseLab ATS применяются электронно-механические системы контроля и управления. Система управления решает задачу автоматизации процесса поддержания параметров проведения испытаний.

Принципиальное отличие АСУ NoseLab ATS от системы управления установки MELT-Index заключается в том, что в ней предусмотрена частичная автоматизация контроля содержания агрессивной среды в рабочей камере. Таким образом, частично автоматизирован процесс снятия экспериментальных данных с помощью установки ГП, появилась также возможность вывода на ПК с помощью интерфейсного комплекса LAB информации о поддерживаемых показателях.

Преимущество оборудования пропитки полимерных материалов модели AZ preink N2 (рис. 3) — функция термовакуумной пропитки, позволяющая многократно ускорить процесс за-

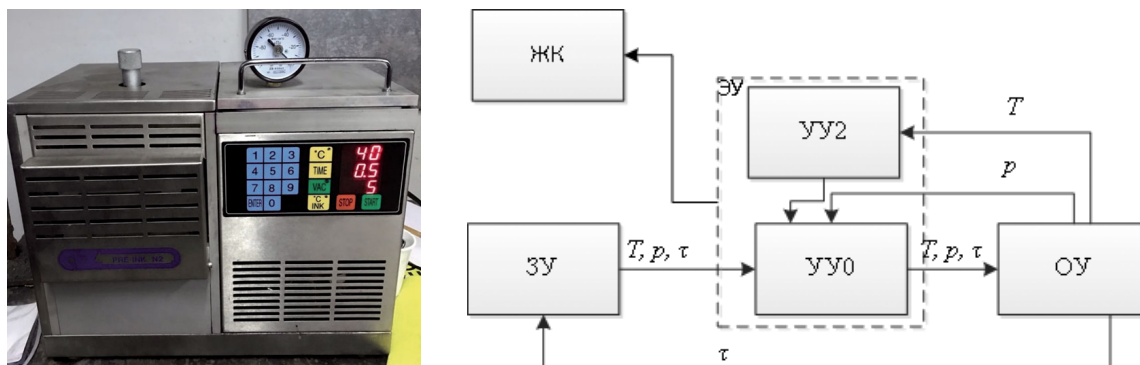


Рис. 3. Оборудование термовакuumное AZ preink N2 и его структурная схема

Fig. 3. Thermal vacuum equipment AZ preink N2 and its block diagram

полнения и набухания полимеров [13 – 15]. При этом принцип управления оборудования частично схож с NoseLab ATS, но имеет более упрощенную структуру.

Оборудование AZ preink N2 обеспечивает надежное поддержание заданных температурных и барометрических показателей в рабочей камере. Однако было выявлено, что оснащение не дает возможности контролировать степень заполнения образцов ни по массе, ни по объему впитываемой жидкости (растворителя), а измерения, проводимые по стандартным методикам с привлечением дополнительного оборудования, малопродуктивны. Кроме того, необходимо учитывать субъективные погрешности процесса измерения, всегда присутствующие при данных методах контроля.

Дополнительный блок контроля и управления на базе МК Atmega 328, интегрированный в оборудование AZ preink N2, дает возможность в режиме реального времени рассчитывать величину набухания за счет добавления в систему управления датчиков определения контролируемых параметров (объема заполняемой жидкости (растворителя) (V_p , $V_{исх}$) и меняющихся геометрических размеров ($h_{исх}$, $h_{проп}$) исследуемого материала) [16 – 18].

Аппаратное решение контроля параметров было найдено за счет установки трехосевого датчика положения (гироскопа) модели GY-521MPU-6050. Повысить точность измерения уровня жидкости и высоты набухания образца позволил разработанный и апробированный датчик, основанный на эффекте магнитомера Холла [19]. Отметим, что совмещенные возможности датчика положения и магнитомера присутствуют в датчиках модели MPU9250, но их показатели по помехоустойчивости и стоимости значительно уступают бюджетной модели GY-521MPU-6050.

На рис. 4 приведена схема автоматизированной экспериментальной установки. Контроль и передача данных от ЭУ2 на ПК были организованы

ны по COM-порту протоколом передачи ASCII (скорость — 9600 бит/с). Обработка, хранение и визуализация данных осуществлялись в режиме реального времени с помощью ПО PowerGraph.

Разработанный алгоритм системы управления процессом пропитки и набухания полимерных материалов в агрессивной среде построен по блочной схеме и состоит из двух управляющих электронно-вычислительных устройств [20]: первый блок — штатно установленные приспособления, условно разделенные на устройства поддержания температуры, установленного давления и контроля времени работы оборудования; во второй блок были интегрированы устройства контроля размеров (высоты) образца и уровня жидкости.

Вычислительные мощности установленного программируемого контроллера (ЭУ2) позволяют проводить необходимые расчеты и выводить на ПК данные по динамике заполнения полимерного образца. Учитывая, что изготавливаемые образцы в определенных пределах имеют некоторые отличия как по высоте, так и по объему [21 – 23], в АСУ была предусмотрена возможность начальной настройки (калибровки) системы контроля по высоте установленного образца и уровню залитой жидкости.

Таким образом, разработанная АСУ и алгоритм ее функционирования значительно расширили возможности оборудования AZ preink N2. Впервые появилась возможность в режиме реального времени осуществлять прямой контроль заполнения и набухания образцов жидкостью (растворителем), а адаптивная система калибровки упростила наладку и подстройку системы контроля под образцы различных размеров. Все это упрощает процесс технологической подготовки, снижает трудозатраты и время на производство образцов и проведение контрольных испытаний. Прямые измерения заполняемости и набухания полимерных материалов, их автоматизация в части процессов сбора, обработки, передачи, ви-

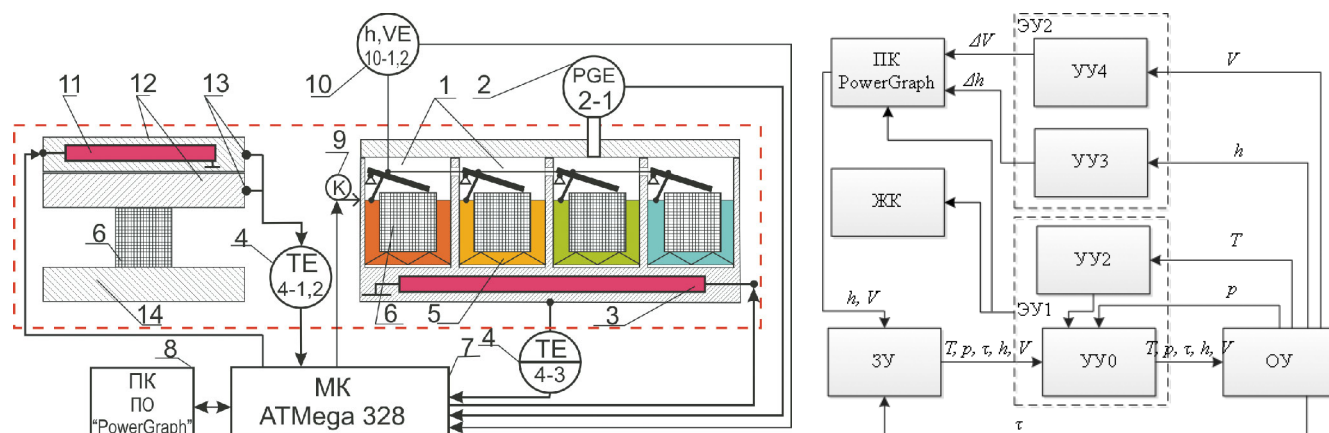


Рис. 4. Схема автоматизированной экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера; 2 — манометр; 3 — нагревательный элемент; 4 — датчик температуры; 5 — рабочие жидкости; 6 — образец; 7 — микроконтроллер; 8 — ПК; 9 — вакуумный компрессор; 10 — датчики уровня жидкости и высоты образца (гироскопы); 11 — нагревательный элемент камеры сушки; 12 — установочные плиты; 13 — датчики температуры; 14 — прессовая плита

Fig. 4. Scheme of the experimental setup: 1 — vacuum chamber; 2 — pressure gauge; 3 — heating element; 4 — temperature sensor; 5 — working fluids; 6 — sample; 7 — microcontroller; 8 — personal computer; 9 — vacuum compressor; 10 — tilt angle sensors (gyros); 11 — heating element of the drying chamber; 12 — mounting plates; 13 — temperature sensors; 14 — press plate

зуализации и хранения также уменьшают трудоемкость и исключают погрешности, связанные с человеческим фактором при выполнении операций.

Экспериментальную апробацию АСУ проводили на образцах из эластомера марки МБС. Изделия из него наиболее часто применяют в машиностроении в качестве герметизирующих уплотнений при перевозке, перекачке и хранении агрессивных материалов.

Применяемые в технике транспортного машиностроения рабочие среды не имеют постоянного химического состава, поэтому в качестве рабочей среды выбрали стандартную рабочую жидкость (СРЖ) [4, 11, 24].

Заполнение осуществляли при температурах 20 – 50 °С, соответствующих часто встречающимся условиям эксплуатации. Установили, что сколько-нибудь значительного влияния на пропитку полимеров температурные воздействия (в данном диапазоне) не оказывают. Поэтому в дальнейших экспериментах за температуру наполнения принимали нормальную температуру $t = 20$ °С.

Изменение атмосферного давления в реальных условиях эксплуатации также не влияет на пропитку эластомерных материалов, поэтому условием проведения экспериментов было нормальное давление.

Образцы перед испытаниями осматривали на предмет сплошности и наличия наружных повреждений. Точность измерения размеров образцов составляла 0,01 мм.

Акклиматизацию образцов проводили за счет предварительного их размещения в камере суш-

ки при одностороннем начальном нагреве прессовой плитой 14 (см. рис. 4). Дальнейший нагрев осуществлялся сведенными, контактирующими с образцом 6 установочными плитами 12. Нагрев плит проводился нагревателем 11, контроль осуществлялся термодатчиками (термопарами) 4, присоединенными к установочным плитам. Нагреватель 4 использовался также для поддержания рабочей температуры камеры 1.

После окончания акклиматизации образцы помещали в ячейки с рабочей жидкостью 5. Далее включался вакуумный компрессор 9, давление контролировалось датчиком давления 2. Данные передавались в микроконтроллер 7, который формировал управляющие команды для автоматизированного управления процессом и отправлял данные на ПК 8. Установленное ПО PowerGraph позволяло обрабатывать, визуализировать, конвертировать и хранить информацию о параметрах работы оборудования и процессе пропитки и набухания полимерных материалов.

Показателем наполнения служила динамика изменения массы образцов. Среднеарифметическое суммарной массы образцов $\bar{M}$ рассчитывали следующим образом.

Расчет начальной массы образца M_0 , начального объема жидкости V_0 в рабочей камере и ее массы $M_{ж}$ проводили по формулам:

$$M_0 = abhp, \quad (5)$$

$$V_0 = a_1 b_1 h_1, \quad (6)$$

$$M_{ж} = V_0 \rho_1, \quad (7)$$

где a, b, h, ρ — длина, ширина, высота, плотность материала образца; a_1, b_1, h_1 — длина, ширина,

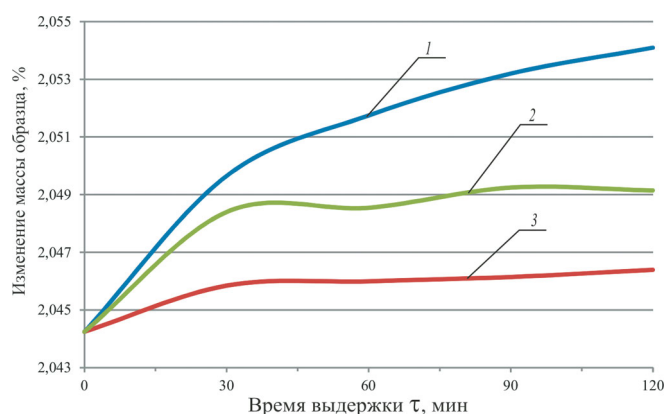


Рис. 5. Зависимости изменения массы образцов капролона ПА-6 (1), фторопласта ФТ-4 (2) и армамида ПА-66 (3) от времени выдержки в СРЖ в термовакуумной камере

Fig. 5. Dependences of changes in the mass of caprolon PA-6 (1), fluoroplast FT-4 (2) and armamide PA-66 (3) samples on the exposure time in SRF in the thermal vacuum chamber

высота заполнения жидкостью рабочей камеры; ρ_1 — плотность СРЖ, определяемая зависимостью процентных соотношений плотностей составляющих ее компонентов.

Принимая во внимание изотропию эластомера (его анизотропия проявляется только при молекулярной подвижности эластомеров в процессе кристаллизации, которая происходит при растяжении более чем на 200 %), можно утверждать, что $\Delta h = \Delta a = \Delta b$. Поэтому дальнейшие измерения контролирующих параметров можно проводить по высоте образца и уровню (объему) СРЖ.

Принимали, что измеренные на этапе калибровки высоты образца (h) и объема жидкости (V) $\Delta h = \Delta a = \Delta b = 0$. Использовали следующие переменные: $h_0 = h$, $V_0 = V$.

Полученные данные изменения высоты образца и уровня жидкости, а соответственно, и ее объема в процессе заполнения позволяют рассчитать массу заполненного образца. Учитывая, что $\Delta V = V_0 - V_1$, а $V_1 = (a + \Delta h)(b + \Delta h)(h + \Delta h)$, масса заполненного образца может быть вычислена как

$$\Delta M = \Delta V \rho_1 \text{ или } \overline{M} = \sum_{i=1}^N \Delta M_i, \quad (8)$$

где ΔM_i — значение массы; N — количество измерений.

Экспериментальные данные свидетельствуют об удовлетворительной динамике изменения массы полимерного материала марки МБС при выдержке его в СРЖ термовакуумной установки. Применение разработанной АСУ процессом заполнения для определения набухания эластомера

ра позволило сократить время контрольных испытаний со 144 ч до 26 мин.

На рис. 5 представлены данные заполнения различных полимерных материалов, используемых в машиностроении в качестве конструкционных.

Видно, что по сравнению с пропиткой эластомера марки МБС (26 мин) наблюдается увеличение времени заполнения образцов (капролон — более 120 мин, армамид — около 100, фторопласт — около 120 мин). Поскольку длительность заполнения полимеров стандартными методами может исчисляться сотнями часов, перспективность использования разработанной АСУ процесса термовакуумного заполнения для контроля набухания материалов очевидна.

Отметим, что капролон (см. рис. 5) после 30 мин интенсивного заполнения СРЖ не прекратил впитывание и после 120 мин. Исследование процесса неограниченного наполнения полимеров открывает возможность создания наполненных, самосмазывающихся конструкций из полимеров или определения деструктивных изменений в них.

Заключение

Таким образом, на основе проведенных испытаний, помимо определения контролируемых параметров, разработан алгоритм работы АСУ процессом термовакуумной пропитки и набухания полимерных материалов. Впервые в системе управления реализована автоматизированная функция начальной калибровки оборудования, дающая возможность исследований различающихся по размерам образцов полимерных материалов. Кроме того, апробация АСУ и методики ее интегрирования в существующее оборудование (AZ preink N2) экспериментально подтвердила сокращение времени пропитки со 144 ч до 27 мин при лабораторных исследованиях заполнения наиболее используемого материала уплотнений марки МБС. Используя разработанную АСУ, можно осуществлять контроль ресурса эксплуатации изделий из полимерных материалов в зависимости от степени их наполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 г. / Авиационные материалы и технологии. 2020. № 5. С. 7 – 17.
2. Дик Дж. С. Технология резины: рецептуростроение и испытания / Пер. с англ. — СПб.: Научные основы и технологии, 2020. — 620 с.
3. Мартин Дж. М., Смит У. К. Производство и применение резинотехнических изделий / Пер с англ. — СПб.: Профессия, 2019. — 480 с.

4. Буторин Д. В., Чуклай И. В. Технологии маслonaполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов / VII Международ. науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона»: сб. мат. — Иркутск: ИрГУПС, 2016. С. 490 – 495. DOI: 10.1016/0375-6742(74)90001-6
5. Филиппенко Н. Г., Буторин Д. В., Лившиц А. В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах / Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 171 – 175.
6. Лившиц А. В., Ларченко А. Г., Филатова С. Н. Высоко-частотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / Наука и образование. 2014. № 6. С. 55 – 65.
7. Тугов И. И., Костыркина Г. И. Химия и физика полимеров. — М.: Химия, 1989. — 430 с.
8. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. — М.: Научный мир, 2007. — 573 с.
9. Дубинский В. Г., Кудрявцев Д. А. Совершенствование технологий и оборудования для осушки МГ после испытаний / Нефть и газ. 2009. № 2/н. С. 20 – 23.
10. Филиппенко Н. Г., Буторин Д. В., Лившиц А. В. и др. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1(53). С. 96 – 103.
11. Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В. Автоматизированные исследования процесса пропитки эластомеров / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 1(46). С. 72 – 78. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78
12. Bakanin D., Bychkovsky V., Butorin D. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731 – 740. DOI: 10.51955/23121327_2022_2_19
13. Сафин Р. Р., Хасаншин Р. Р., Сафин Р. Г. Исследование конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении / IV Международ. симпозиум «Строение, свойства и качество древесины»: сб. тр. — СПб., 2004. С. 523 – 526.
14. Сафин Р. Р. Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла / Вестник ТГТУ. 2006. Т. 12. № 4А. С. 978 – 993.
15. Ковалева Л. А., Ливанова Н. М., Овсянников Н. Я. Исследование набухания резин из бутадиеннитрильных каучуков в неполярном растворителе *n*-гептане / XVIII Международ. науч.-практ. конф. «Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии»: сб. тр. — М.: НИЦ шинной промышленности, 2012. С. 63 – 66.
16. Маскулюинате О. Е., Морозов Ю. Л. Влияние способа введения пластификатора на свойства парафинатных каучуков БНКС и стандартные резины на их основе / Каучук и резина. 2016. № 3. С. 14 – 17.
17. Анисимов Б. Ю., Дыбман А. С., Имянитов Л. С., Поляков С. А. Гидрирование бутадиен-нитрильных каучуков / Каучук и резина. 2017. № 2. С. 32 – 38.
18. Чайкун А. М., Елисеев И. С., Наумов М. А., Венедиктова О. А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин / Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3. С. 53 – 55.
19. Филиппенко Н. Г. Исследование механических характеристик полиамидных материалов сепараторов буксовых узлов подвижного состава / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 12. С. 43 – 47.
20. Думчев И. С., Ларченко А. Г., Попов С. И. и др. Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО РЖД / Молодой ученый. 2017. № 12. С. 48 – 51. DOI: 10.15826/analitika.2012.19.2.009
21. Ефимов В. А., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г. и др. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях / Труды ВИАМ. 2021. № 1. Ст. 05. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26
22. Tomba J., Xiaodong Y., Fugang L. Polymer Blend Latex Films: Miscibility and Polymer Diffusion Studied by Energy / Transfer. Polymer. 2018. N 49(8). P. 2055 – 2064.
23. Coat J. Polymer heterogeneity in waterborne coatings / Technol. Res. 2020. N 7(1). P. 1 – 21. DOI: 10.1007/s11998-009-9201-5
24. Каблов Е. Н. Химия в авиационном материаловедении / Российский химический журнал. 2018. Т. 1. С. 31 – 41.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing until 2030 / Aviat. Mater. Tekhnol. 2020. N 5. P. 7 – 17 [in Russian].
2. Dick J. S. Rubber Technology: Formulation and Testing. — St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2020. — 620 p. [Russian translation].
3. Martin J. M., Smith W. K. Production and application of rubber products. — St. Petersburg: Professiya, 2019. — 480 p. [in Russian].
4. Butorin D. V., Chuklay I. V. Technology of oil filling of polymeric and composite antifriction materials / VII International Scientific and Practical Conference “Transport infrastructure of the Siberian region”: coll. of works. — Irkutsk: IrGUPS, 2010. P. 490 – 495 [in Russian]. DOI: 10.1016/0375-6742(74)90001-6
5. Filippenko N. G., Butorin D. V., Livshits A. V. Determination of phase and relaxation transitions in polymeric materials / Avtom. Sovr. Tekhnol. 2017. Vol. 71. N 4. P. 171 – 175 [in Russian].
6. Livshits A. V., Larchenko A. G., Filatova S. N. High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials / Nauka Obraz. 2014. N 6. P. 55 – 65 [in Russian].
7. Tugov I. I., Kosturkina G. I. Chemistry and physics of polymers. — Moscow: Khimiya, 1989. — 430 p. [in Russian].
8. Tager A. A. Physicochemistry of polymers. — Moscow: Nauchnyi mir, 2007. — 573 p. [in Russian].
9. Dubinsky V. G., Kudryavtsev D. A. Improvement of technologies and equipment for gas pipeline drying after testing / Neft' Gas. 2009. N 2/n. P. 20 – 23 [in Russian].
10. Filippenko N. G., Butorin D. V., Livshits A. V. Automation of measuring the temperature of polymeric material during high-frequency electrothermal heating / Sovr. Tekhnol. Sist. Anal. Model. 2017. N 1(53). P. 96 – 103 [in Russian].
11. Filippenko N. G., Livshits A. V. Automated studies of the process of impregnation of elastomers / Élektrotekhnol. Élektrooborud. APK. 2022. Vol. 69. N 1(46). P. 72 – 78 [in Russian]. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78
12. Bakanin D., Bychkovsky V., Butorin D. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731 – 740. DOI: 10.51955/23121327_2022_2_19
13. Safin R. R., Khasanshin R. R., Safin R. G. Study of convective drying of lumber under stationary reduced pressure / Proceedings of the IV International Symposium “Structure, properties and quality of wood”. — St. Petersburg, 2004. P. 523 – 526 [in Russian].
14. Safin R. R. Study of the processes of vacuum drying of lumber with convective methods of heat supply / Vestn. TGTU. 2006. Vol. 12. N 4A. P. 978 – 993 [in Russian].
15. Kovaleva L. A., Livanova N. M., Ovsyannikov N. Ya. Investigation of the swelling of rubbers from butadiene nitrile rubbers in the non-polar solvent *n*-heptane / Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical. conf. “Rubber industry. Raw material. Materials. Technology”. — Moscow: NITS shinnoi promyshlennosti, 2012. P. 63 – 66 [in Russian].
16. Maskulyuinat O. E., Morozov Yu. L. Influence of the method of introducing a plasticizer on the properties of BNKS paraffin rubbers and standard rubbers based on them / Kauchuk Rezina. 2016. N 3. P. 14 – 17 [in Russian].

17. **Anisimov B. Yu., Dybman A. S., Imyanitov L. S., Polyakov S. A.** Hydrogenation of butadiene-nitrile rubbers / *Kauchuk Rezina*. 2017. N 2. P. 32 – 38 [in Russian].
18. **Chaikun A. M., Eliseev I. S., Naumov M. A., Venediktova O. A.** Features of building recipes for frost-resistant rubber / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 3. P. 53 – 55 [in Russian].
19. **Filippenko N. G.** Investigation of the mechanical characteristics of polyamide materials of separators for axle boxes of rolling stock / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2017. Vol. 83. N 12. P. 43 – 47 [in Russian].
20. **Dumchev I. S., Larchenko A. G., Popov S. I., et al.** Restoration of polyamide separators of bearings of the axle box unit of the rolling stock of Russian Railways / *Molodoy ucheny*. 2012. N 12. P. 48 – 51 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.019.2.009
21. **Efimov V. A., Shvedkova A. K., Korenkova T. G., et al.** Study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and loads in laboratory and natural conditions / *Tr. VIAM*. 2021. N 1. Art. 05 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26
22. **Tomba J., Xiaodong Y., Fugang L.** Polymer Blend Latex Films: Miscibility and Polymer Diffusion Studied by Energy / *Transfer. Polymer*. 2018. N 49(8). P. 2055 – 2064.
23. **Coat J.** Polymer heterogeneity in waterborne coatings / *Technol. Res.* 2020. N 7(1). P. 1 – 21. DOI: 10.1007/s11998-009-9201-5
24. **Kablov E. N.** Chemistry in aviation materials science / *Russian Chemical Journal*. 2018. Vol. 1. P. 31 – 41 [in Russian].