

Автоматизированное устройство экспресс-анализа омасления и набухания полимерных материалов

Н.Г. Филиппенко✉, Е.А. Петрякова

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ifpi@mai.ru

Резюме

В связи с интенсивной эксплуатацией изделий транспортной техники к полимерам предъявляются дополнительные требования по стойкости. В статье представлены результаты исследования изменений физико-механических свойств образцов, выполненных из полимеров, на примере эластомерных материалов, применяемых в качестве разделительных и уплотнительных изделий. Расширяющийся ассортимент агрессивных рабочих жидкостей и сред требует проведения дополнительных испытаний с целью определения динамики впитывания и набухания контактирующих с ними изделий из полимерных материалов. В качестве рабочих сред для проведения экспериментального исследования использовались наиболее агрессивные среды углеводородов на основе минеральных нефтепродуктов с различными коэффициентами вязкости. Проведенный анализ выборки количества экспериментов и методики расчета позволил определить время проведения испытаний для углеводородов различной массы. Полученные временные диапазоны показали производственную необходимость в формировании новой методики проведения испытаний и разработке систем автоматизации процесса устройством по определению параметров впитывания и набухания. Правильность принятого решения об изготовлении автоматизированной экспериментально-исследовательской установки на базе промышленного оборудования термовакуумного наполнения доказана результатами экспериментальных исследований, позволившими уменьшить время пропитки в несколько десятков раз. Внедрение процесса автоматизации в производство сокращает занятость работников промышленных лабораторий, повышает точность и объективность испытаний. Апробация представленного способа измерений дает возможность промышленного использования автоматизированной установки и прогнозирования физико-механических свойств полимерных материалов, работающих в агрессивной среде различной этиологии.

Ключевые слова

полимеры, эластомеры, резины, впитывание, набухание, автоматизация, термовакуум

Для цитирования

Филиппенко Н.Г. Автоматизированное устройство экспресс-анализа омасления и набухания полимерных материалов / Н.Г. Филиппенко, Е.А. Петрякова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 185–194. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).185-194.

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.04.2023 г.; поступила после рецензирования: 16.06.2023 г.; принята к публикации: 19.06.2023 г.

Automated device for express analysis of oiling and swelling of polymeric materials

N.G. Filippenko✉, E.A. Petryakova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ifpi@mai.ru

Abstract

Due to the intensive operation of transport equipment products, additional requirements for durability are imposed on polymers. The article presents the results of the study of changes in the physical and mechanical properties of samples made of polymers on the example of elastomeric materials used as separating and sealing products. The expanding range of aggressive working fluids and media requires additional tests to determine the dynamics of absorption and swelling of polymer materials in contact with them. The most aggressive hydrocarbon media based on mineral oil products with different viscosity coefficients were used as working media for experimental research. The conducted analysis of the sample number of experiments and the calculation methodology allowed to determine the testing time for hydrocarbons of various mass weights. The obtained time ranges showed the production need for the development of a new test methodology and automation systems for the process by the device for determination of the absorption and swelling parameters. The decision taken to manufacture an automated experimental research facility based on industrial thermal vacuum filling equipment proved the correctness of such a choice by the results of experimental studies, which allowed reducing the absorption time by several dozen times. The introduction of the automation process into production reduces the employment of industrial laboratory workers increasing the accuracy and objectivity of tests. The approbation of the presented measurement method enables the industrial use of the automated installation and the prediction of the physical and mechanical properties of polymer materials working in an aggressive environment of various etiologies.

Keywords

polymers, elastomers, rubbers, absorption, swelling, automation, thermal vacuum

For citation

Filippenko N.G., Petryakova E.A. Avtomatizirovannoe ustroystvo ekspress-analiza omasleniya i nabukhaniya polimernykh materialov [Automated device for express analysis of oiling and swelling of polymeric materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 185–194. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).185-194.

Article Info

Received: April 5, 2023; Revised: June 16, 2023; Accepted: June 19, 2023.

Введение

Интенсификация эксплуатации подвижного состава ОАО «РЖД» и других транспортных средств выдвигает повышенные требования к их изделиям. В случае традиционного использования изделий из металлов и сплавов машиностроению известно значительное количество методов и средств, обеспечивающих уверенный и оперативный контроль [1–4]. Время использования полимерных материалов в качестве конструкционных насчитывает всего несколько десятилетий, поэтому повышение надежности работы техники можно решить, в том числе, путем улучшения качества контроля [1–3]. Предварительные исследования показали, что существующие методы контроля качества изделий из полимерных материалов в связи с их незначительной активностью к различным агрессивным жидкостям и средам (несомненно положительная характеристика изделий) предусматривают периодические измерения физико-механических характеристик, причем время испытаний зависит от материалов и варьируется от нескольких десятков до сотен часов. Такое состояние дел зачастую не позволяет качественно организовать контроль целого ряда работ, связанных с регламентными, планово-предупредительными ремонтами.

Поэтому целью данного исследования была разработка методики проведения и автоматизация процесса экспресс-анализа пропитки полимерных материалов, эксплуатирующихся в различных агрессивных средах.

Ранее проведенные исследования автора показали, что наиболее актуальным материалом образцов полимерного эластомера является резина уплотнительного кольца клапана сливного прибора цистерн МБС-С [1, 2].

Применяемые в технике транспортного машиностроения рабочие среды не имеют постоянного химического состава, поэтому в качестве рабочей среды была выбрана стандарт-

ная рабочая жидкость (СРЖ) в определенном и постоянном соотношении бензина марки АИ-95 и гидравлической жидкости марки МГ-15-Б.

Такой подход к проведению экспериментальных исследований представляется наиболее правильным, так как позволит получить достоверные результаты и спрогнозировать продолжительность работоспособности полимерных материалов при различных внешних условиях.

Образцы исследования перед проведением экспериментов акклиматизировались, осматривались на предмет сплошности и наличия наружных повреждений. Взвешивание образцов производилось на аналитических весах с точностью измерения 0,0001 г.

Выборка состояла из пяти образцов, помещенных в емкость с СРЖ в соотношении 20:1 [2, 3].

Показателем наполнения служила динамика изменения массы образцов, среднее значение которых определялось как среднеарифметическое значение суммарной массы образцов \bar{M} , рассчитанное по формуле (1):

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N M_i, \quad (1)$$

где M_i – отдельное значение массы, изменяется от 1 до N , г; N – количество образцов, шт.

Показатели динамики изменения массы образцов рассчитывались по формуле (2):

$$\Delta M = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где M_1 – масса предварительно взвешенного образца, г; M_2 – масса образца, взвешенного в определенный момент времени выдержки, г.

Графические данные динамического изменения веса полимерного материала при взаимодействии с СРЖ показаны на рис. 1.

Анализ диаграммы показывает, что при контакте образцов со смесью СРЖ наибольшее

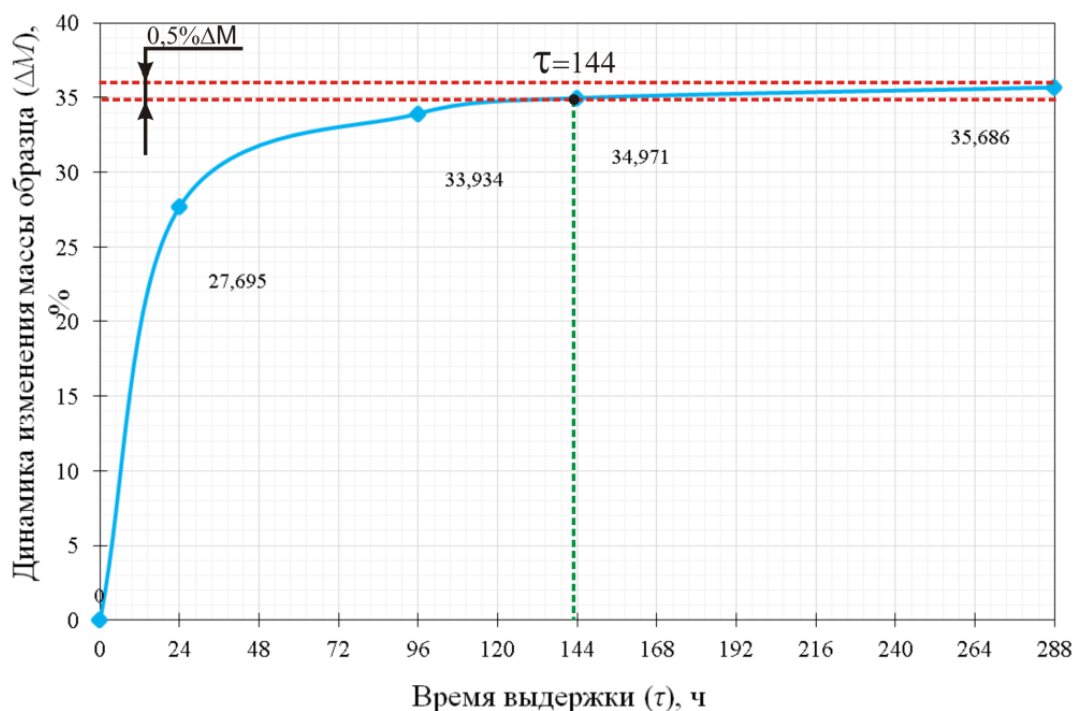


Рис. 1. Динамика изменения веса полимерного материала при взаимодействии со стандартной рабочей жидкостью

Fig. 1. Dynamics of changes in the weight of a polymeric material under interaction with a standard working fluid

поглощение происходит в течении первых 24 ч. взаимодействия. При этом масса образца увеличилась примерно на 27,7 %. Следующие 24 ч. наполнения отмечаются стабильным динамическим снижением скорости заполнения, позволяющим увеличить наполняемость до 32 %. Дальнейший период впитывания жидкости отмечается линейной характеристикой наполняемости вплоть до его полного окончания, которое было определено временем $\tau = 144$ ч. Вес образца на данный период времени увеличился на 35 % от первоначального.

Идентификация полного заполнения образца СРЖ определялась показателем увеличения динамики наполнения на 0,5 % веса образца в течение 144 ч. эксперимента.

Аппроксимирование полученной зависимости, представлено в аналитическом выражении:

$$y = 3,5838 \cdot \ln(x) + 16,589 \quad (3)$$

где $R_1^2 = 0,9969$ позволяет спрогнозировать процесс наполнения СРЖ маслобензостойкого (МБС) эластомерного материала, производимый в нормальных условиях, соответствующих требованиям [1–3].

Полученные результаты показали, что использование данного метода контроля

наполнения агрессивными жидкостями изделий, выполненных из полимерных эластичных материалов, с целью определения их эксплуатационных возможностей малоприспособны в условиях промышленных лабораторий ввиду их продолжительности и трудозатратности. Поэтому следующей подзадачей настоящего исследования была работка метода экспресс-анализа пропитки и его автоматизации.

Разработка и апробация автоматизированного метода испытаний резины в термовакууме

В рамках школы ВЧ-электротермии, созданной на кафедре автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения, одним из направлений исследований были работы, связанные с наполнением полимеров моторными маслами. Авторами была изготовлена экспериментально-исследовательская установка на базе промышленного оборудования AZ pre-ink N2 для термовакуумного наполнения [4–6].

Преимуществом предлагаемого авторами настоящей работы оборудования пропитки полимерных материалов модели AZ preink N2 (рис. 2) является реализованная в нем функция

термовакuumного наполнения, что позволяет многократно ускорить процесс заполнения и набухания полимеров [4]. Принцип его управления имеет достаточно простую структуру.

Анализ оборудования AZ preink N2 как объекта управления показал, что оно обеспечивает надежное поддержание заданных температурных и барометрических показателей в рабочей камере.

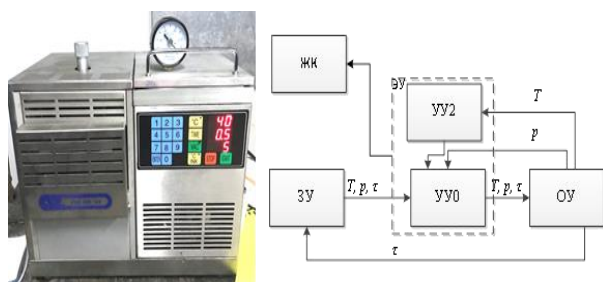


Рис. 2. Оборудование термовакuumное AZ preink N2 и его структурная схема
Fig. 2. Thermal vacuum equipment AZ preink N2 and its block diagram

Тем не менее было определено, что его оснащение не дает возможности контролировать степень заполнения образцов ни по массе,

ни по объему впитываемой жидкости (растворителя). Данные измерения проводятся оператором по стандартным методикам с привлечением дополнительного оборудования, что крайне трудозатратно и малопродуктивно, таким методам контроля всегда сопутствуют субъективные погрешности процесса измерения. Поэтому установка была модернизирована, ее усовершенствованная модель показана на рис. 3, а структурная схема представлена на рис. 4. Модернизации предшествовали работы по изучению существующего устройства управления AZ preink N2. Изучение конструктивных особенностей оборудования и имеющихся резервов его вычислительных устройств (ЭУ1) позволило сделать вывод о возможности использования без внесения изменений в существующие электро-механические схемы оборудования, дополнительного блока контроля и управления (ЭУ2) на базе МК Atmega 328 [7–9]. Данный блок способен в реальном режиме времени производить вычисления по определению величины набухания за счет добавления в систему управления датчиков определения контролируемых параметров, а именно: объема заполняемой жидкости (растворителя) (V_p , $V_{исх}$)

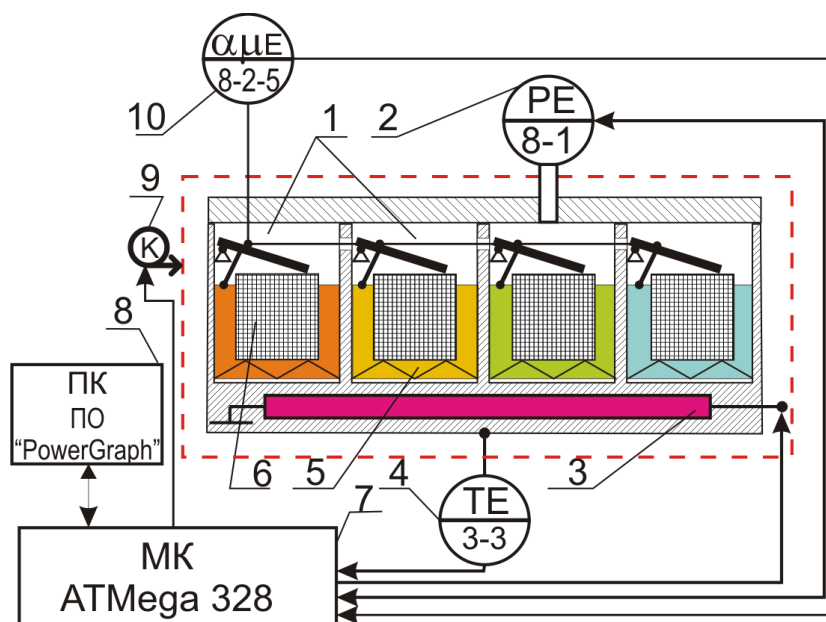


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1 – вакуумная камера; 2 – манометр; 3 – нагревательный элемент; 4 – датчик температуры; 5 – рабочие жидкости; 6 – образец; 7 – микроконтроллер; 8 – персональный компьютер; 9 – вакуумный компрессор; 10 – датчики угла наклона (гироскопы)

Fig. 3. Scheme of the experimental installation:

1 – vacuum chamber; 2 – manometer; 3 – heating element; 4 – temperature sensor; 5 – working fluids; 6 – sample; 7 – microcontroller; 8 – personal computer; 9 – vacuum compressor; 10 – tilt angle sensors (gyroscopes)

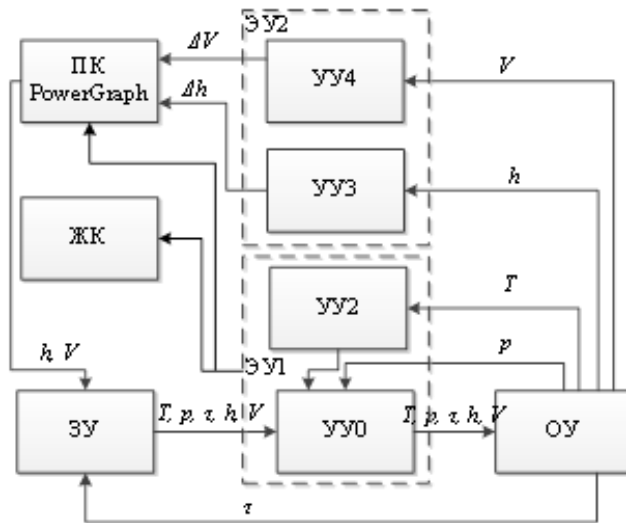


Рис. 4. Структурная схема автоматизированной экспериментальной установки:

ПК – компьютер; ЖК – монитор; ЗУ – задающее устройство; ЭУ – устройства управления;
 ОУ – объект управления; ЭУ – электронные управляющие устройства

Fig. 4. Block diagram of the automated experimental installation:

ПК – computer; ЖК – LCD monitor; ЗУ – master device; ЭУ – control devices; ОУ – control object;
 ЭУ – electronic control devices

и изменяющихся геометрических размеров (высоты $h_{\text{исх}}$, $h_{\text{проп}}$) исследуемого материала [9, 10]. Аппаратное решение контроля этого комплекса параметров было найдено за счет установки трехосевого датчика положения (гироскопа) модели GY-521MPU-6050. Повысить точность измерения уровня жидкости и изменения высоты набухания образца позволил разработанный и апробированный датчик, основанный на эффекте магнитомера Холла [11]. Необходимо отметить, 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.

Наряду с выбранными ранее параметрами контроля (температура ТЕ – поз. 4 и давление РЕ – поз. 2) была определена необходимость в использовании дополнительных контролируемых параметров в качестве которых были взяты: уровень жидкости (α) и изменение высоты образца (μ) в процессе набухания. Необходимо отметить, что организацию контроля новых параметров позволяют осуществить электронные датчики (гироскопы) по углу наклона контактных пластин.

Технология автоматизированного метода экспресс-наполнения состоит из погружения образцов в ванны термовакuumной камеры 1,

которые заполнены агрессивными жидкостями 5 [12–15].

Давление в камере установки контролируется с помощью датчика давления (РЕ), установленного в крышке. Установка температуры и ее контроль (ТЕ) осуществляется через микроконтроллер с выводом информации в виде графического интерфейса на экран ПК. Для управления электронными устройствами и передачи данных на ПК использовался микроконтроллер ATmega, в который предварительно была загружена доработанная программа, основанная на предыдущих работах автора [4–7, 9, 11].

Контроль и передача данных от ЭУ2 на ПК организованы по COM-порту протоколом передачи ASCII со стандартной скоростью 9 600 бит/с.

Обработка, хранение и визуализация данных осуществлялась в реальном режиме времени с помощью отечественного программного продукта PowerGraph.

Разработанный алгоритм автоматизированной системы управления процессом пропитки и набухания полимерных материалов в агрессивной среде оборудования модели AZ preink N2 показан на рис. 5. Архитектура данного алгоритма построена по блочной схеме [16] и состоит из двух управляющих электронно-вычислительных устройств. Первый блок – это штатно установленные приспособления,

условно разделенные на устройства поддержания температуры (поз. 1), поддержания установленного давления (поз. 2) и контроля времени работы оборудования (поз. 3). Во второй спроектированный и установленный блок были интегрированы устройства контроля размеров (высоты) образца (поз. 4) и устройство контроля уровня жидкости (поз. 5).

Вычислительные мощности установленного программируемого контроллера (ЭУ2) позволяют производить необходимые расчеты и выводить на монитор ПК данные по динамике заполнения полимерного образца.

Учитывая, что изготавливаемые образцы в определенных пределах имеют некоторые отличия как по высоте, так и по объему [17], в автоматизированной системе управления была

предусмотрена возможность производить начальную настройку (калибровку) системы контроля по высоте установленного образца и уровню залитой жидкости.

Таким образом, разработанная автоматизированная система управления и алгоритм ее функционирования значительно расширили возможности установки AZ preink N2, что впервые позволило в реальном режиме времени производить прямой контроль заполнения и набухания образцов материала жидкостью (растворителем), а разработанная адаптивная система калибровки упростила наладку и подстройку системы контроля под образцы различных размеров, что делает менее сложным процесс изготовления образцов и удешевляет его. Все это позволяет утверждать, что внедрение разрабо-

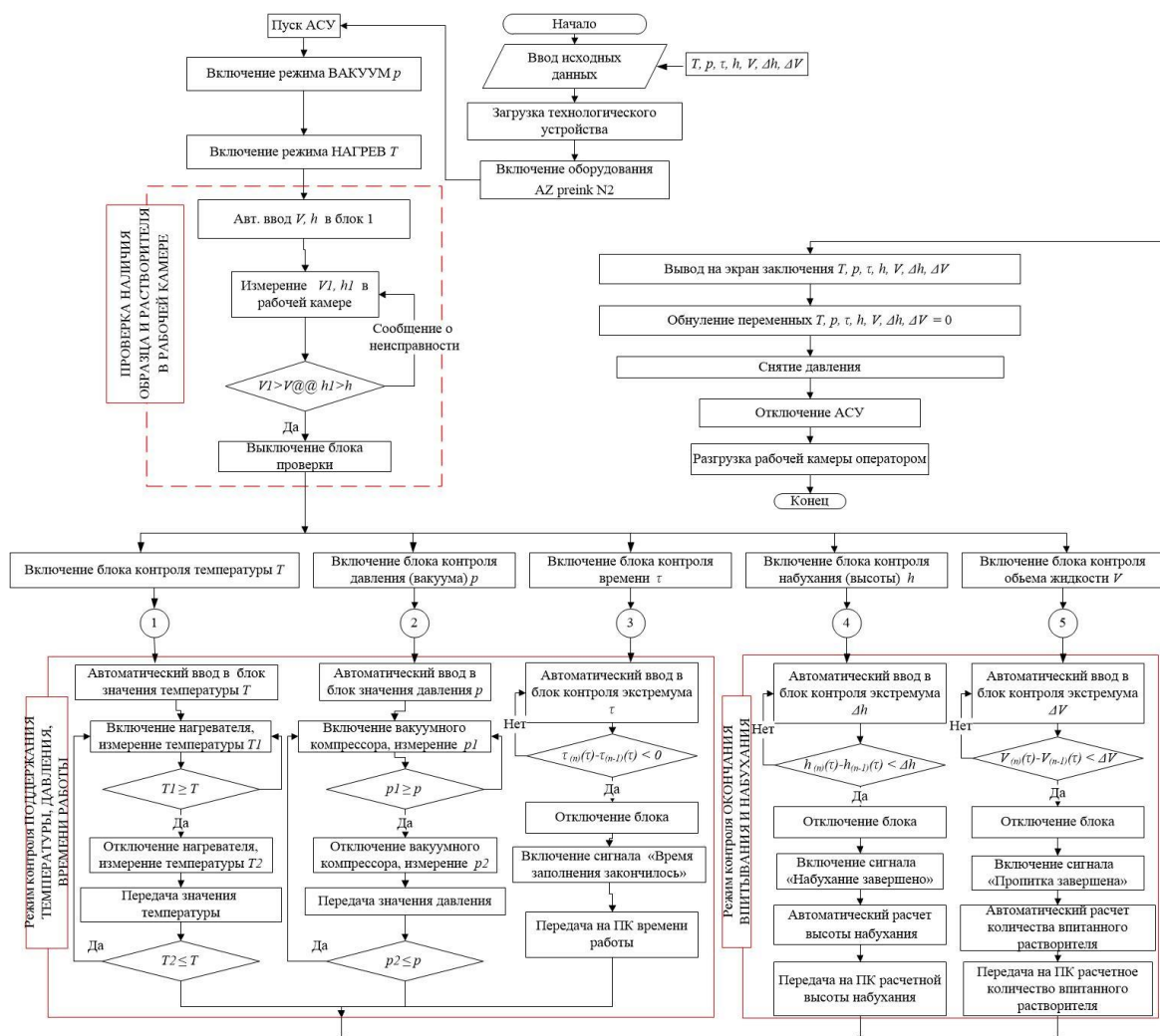


Рис. 5. Алгоритм автоматизированной системы управления процессом пропитки и набухания полимерных материалов в агрессивной среде оборудования модели AZ preink N2

Fig. 5. Algorithm of the automated control system for the process of impregnation and swelling of polymeric materials in an aggressive environment of equipment model AZ preink N2

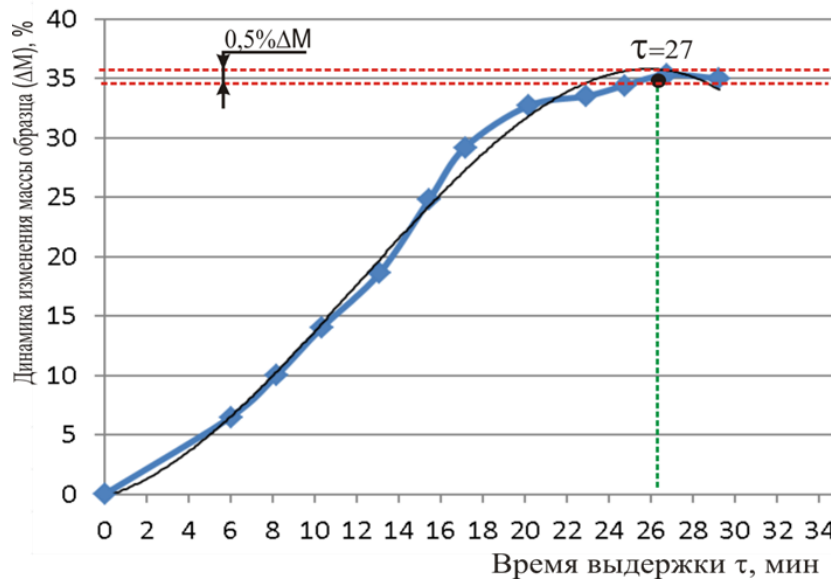


Рис. 6. Динамика изменения веса полимерного материала при взаимодействии со стандартной рабочей жидкостью в термовакуумной камере

Fig. 6. Dynamics of changes in the weight of a polymeric material when interacting with a standard working fluid in a thermal vacuum chamber

танной АСУ снижает трудозатраты и время на производство образцов и проведение контрольных испытаний, а также исключает погрешности, связанные с человеческим фактором при выполнении этих операций [18–20].

Результаты испытаний по автоматизированному процессу термовакуумного наполнения образцов представлены на рис. 6.

Анализ полученных данных показывает, что при контакте образцов в термовакуумной камере со смесью СРЖ наибольшее поглощение происходит в течении первых 17 мин. взаимодействия. При этом масса образца увеличилась примерно на 28 %. Период 17–24 мин. характеризуется плавным снижением динамики наполнения. Завершение впитывания можно определить временным интервалом в 27 мин. работы установки и наполняемостью до 35 %. Дальнейшее изменение массы образца находится в интервале 0,5 %, что было принято ранее как завершение процесса заполнения.

Таким образом, период полного окончания впитывания СРЖ в термовакуумной камере был определен временем $\tau = 27$ мин. Вес образца за данный период времени увеличился на 35 % от первоначального, что также подтверждается работами других авторов [10, 17].

Аппроксимирование полученной зависимости, представленной в аналитическом выражении:

$$y = -0,0034 x^3 + 0,1214 x^2 + 0,5156 x - 0,1964 \quad (4)$$

при $R_2^2 = 0,9943$ позволяет спрогнозировать процесс наполнения СРЖ МБС эластомерного материала, производимый в термовакуумной камере, разработанной в рамках настоящего исследования.

Сравнительный результат динамик наполнения в реальном режиме времени и сопоставление их с произведенным экспресс-анализом позволил вывести их функциональную зависимость. Используя полученные аналитические зависимости (3) и (4), представив их в виде

$$f_1(x) = -0,0034 \cdot x^3 + 0,1214 \cdot x^2 + 0,5156 \cdot x - 0,1964$$

$$f_2(x) = 3,5838 \cdot \ln(x) + 16,589,$$

несложно определить, что функция перевода значений, полученных при использовании экспресс-метода, в значения, соответствующие проведению наполнения, в нормальных условиях будет определяться как:

$$f_3(x) = \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \frac{-0,0034x^3 + 0,1214x^2 + 0,5156x - 0,1964}{3,5838 \cdot \ln(x) + 16,589}.$$

После вычислений переводная функция, полученная графически, принимает следующий вид:

$$f_3(x) \approx 1,9218 \cdot e^{0,1594x},$$

при этом достоверность аппроксимирования составила:

$$(R_1^2 + R_2^2) / 2 = (0,9969 + 0,9943) / 2 = 0,9956.$$

Анализ произведенной работы позволяет говорить о дополнительных возможностях разработанной методики и автоматизированной термовакуумной установки, заключающихся в изучении работоспособности полимерных эластомерных материалов в режиме циклического воздействия температур и давления с целью прогнозирования сроков эксплуатации изделий из них [16–18]. Подход представляется актуальным и соответствует современным тенденциям при проведении дальнейших исследований данной тематики.

Заключение

На основании проведенных исследований методик испытаний, эластомерных материалов на примере маслобензостойкой резины марки МБС, был сделан вывод о невозможности использования в условиях промышленных лабо-

раторий стандартных методик испытаний в связи с их длительностью и трудоемкостью.

Разработанная новая методика и автоматизированная установка для ее осуществления позволила уменьшить трудоемкость и время процесса пропитки со 144 ч. до 27 мин.

Представленная методика и рассчитанный коэффициент перевода позволили определить взаимосвязь значений времени экспресс-анализа и временных интервалов стандартного наполнения с удовлетворительной достоверностью $R^2 = 0,9956$.

Были определены перспективные направления дальнейших исследований, связанные с прогнозированием ресурсов эксплуатации изделий из эластомерных полимеров при различных внешних условиях их работы.

Список литературы

1. ГОСТ 7338–90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия. Введ. 1991–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1991. 26 с.
2. ГОСТ 269–66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. Введ. 1966–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1966. 15 с.
3. ГОСТ 9.030–74. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред. Введ. 1975–07–01. М. : Стандартиформ, 2008. 18 с.
4. Ларченко А.Г. Автоматизированное устройство диагностирования полимерных изделий сложной конфигурации методом высокочастотного излучения // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 61–65.
5. Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // Механика композиционных материалов. 1987. № 5. С. 915–920.
6. Пат. 132209 Рос. Федерация. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов / А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко и др. № 2013115531/28 : заявл. 05.04.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. 2 с.
7. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / А.В. Лившиц, А.Г. Ларченко, Филатова С.Н. и др. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55–65.
8. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
9. Лившиц А.В. Автоматизированная система научных исследований высокочастотной электротермии // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 4. С. 54–60.
10. Железнодорожные цистерны / И.Г. Морчиладзе, А.П. Никодимов, М.М. Соколов и др. М. : ИБС-Холдинг, 2006. 512 с.
11. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / D. Bakanin, V. Bychkovsky, N. Filippenko et. al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731–740. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_69.
12. Исследование топливостойких резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков, изготовленных с применением эмульгаторов различных типов / А.М. Чайкун, М.А. Венедиктова, О.А. Елисеев и др. // Труды ВИАМ. 2014. № 8. URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21817320_70710122.pdf (Дата обращения 15.11.2022).
13. Влияние способа введения пластификатора на свойства парафинатных каучуков БНКС и стандартные резины на их основе / О.Е. Маскулуйнате, Ю.Л. Морозов Н.С. Сухинин и др. // Каучук и резина. 2006. № 3. С. 14–17.
14. Гидрирование бутадиен-нитрильных каучуков / Б.Ю. Анисимов, А.С. Дыбман, Л.С. Имянитов и др. // Каучук и резина. 2007. № 2. С. 32–38.
15. Особенности построения рецептур для морозостойких резин / А.М. Чайкун, О.А. Елисеев, И.С. Наумов и др. // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3 (28). С. 53–55.
16. Филиппенко Н.Г. Исследование механических характеристик полиамидных материалов сепараторов буксовых узлов подвижного состава // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 12. С. 43–47.
17. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях / В.А. Ефимов, А.К. Шведкова, Т.Г. Коренькова и др. // Труды ВИАМ. 2013. № 1. URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_22002377_46052682.pdf (Дата обращения 15.11.2022).

18. Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 23. № 3 (146). С. 463–471.
19. Вапиров Ю.М., Кириллов В.Н., Кривонос В.В. Закономерности изменения свойств полимерных композитов конструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях // Гидроавиасалон-2006 : сб. докл. VI науч. конф. по гидроавиации. Геленджик, 2006. Ч. 2. С. 103–108.
20. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 412–423.

References

1. GOST 7338–90. Plastiny rezinovyie i rezinotkanevyye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 7338–90. Plates rubber and rubber-fabric. Specifications]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1991. 26 p.
2. GOST 269–66. Rezina. Obshchie trebovaniya k provedeniyu fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy [State Standard 269–66. Rubber. General requirements for physical and mechanical testing]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1966. 15 p.
3. GOST 9.030–74. Reziny. Metody ispytaniy na stoikost' v nenapryazhennom sostoyanii k vozdeystviyu zhidkikh agresivnykh sred [State Standard 9.030–74. Rubber. Test methods for resistance in an unstressed state to the action of liquid aggressive media]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 18 p.
4. Larchenko A.G. Avtomatizirovannoe ustroystvo diagnostirovaniya polimernykh izdelii slozhnoi konfiguratsii metodom vysokochastotnogo izlucheniya [Automated device for diagnosing polymer products of complex configuration by the method of high-frequency radiation]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016, no. 2, pp. 61–65.
5. Bulmanis V.N., Yartsev V.A., Krivonos V.V. Rabotosposobnost' konstruktivnykh kompozitov pri vozdeystvii staticheskikh nagruzok i klimaticheskikh faktorov [Performance of structures made of polymer composites under the influence of static loads and climatic factors]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials], 1987, no. 5, pp. 915–920.
6. Larchenko A.G., Livshits A.V., Filippenko N.G., Popov S.I. Patent RU 132209 U1, 10.09.2013.
7. Livshits A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya obrabotka nemetallichesкого вторичного сырья [High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and education: scientific publication of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman], 2014, no. 6, pp. 55–65.
8. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki do 2030 goda [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing until 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2012, no. 5, pp. 7–17.
9. Livshits A.V. Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy vysokochastotnoi elektrotermii [Automated system of scientific research of high-frequency electrothermy]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2015, no. 4, pp. 54–60.
10. Morchiladze I.G., Nikodimov A.P., Sokolov M.M., Tret'yakov A.V. Zheleznodorozhnye tsisterny [Railway cisterns]. Moscow: IBS-Holding Publ., 2006. 512 p.
11. Bakanin D., Bychkovsky V., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 731–740.
12. Chaikun A.M., Venediktova M.A., Eliseev O.A., Naumov I.S. Issledovanie toplivostoikikh rezin na osnove butadiyen-nitril'nykh kauchukov, izgotovlennykh s primeneniem emul'gatorov razlichnykh tipov [Investigation of fuel-resistant rubbers based on nitrile-butadiene rubbers manufactured using various types of emulsifiers]. *Trudy VIAM* [Proceedings of the All-Russian Institute of aviation materials], 2014, no. 8. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21817320_701710122.pdf (Accessed November 15, 2022).
13. Maskulinat O.E., Morozov Yu.L., Sukhinin N.S., Bubenev V.A., Bukhtiyarova N.M., Blinov V.S. Vliyaniye sposoba vvedeniya plastifikatora na svoystva parafinatnykh kauchukov BNKS i standartnyye reziny na ikh osnove [Influence of the method of introducing a plasticizer on the properties of BNKS paraffin rubbers and standard rubbers based on them]. *Kauchuk i rezina* [Caoutchouc and rubber], 2006, no. 3, pp. 14–17.
14. Anisimov B.Yu., Dybman A.S., Imyaninov L.S., Polyakov S.A. Gidrirovaniye butadien-nitril'nykh kauchukov [Hydrogenation of butadiene-nitrile rubbers]. *Kauchuk i rezina* [Caoutchouc and rubber], 2007, no. 2, pp. 32–38.
15. Chaikun A.M., Eliseev O.A., Naumov I.S., Venediktova M.A. Osobennosti postroeniya retseptur dlya morozostoikikh rezin [Features of building recipes for frost-resistant rubbers]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2013, no. 3 (28), pp. 53–55.
16. Filippenko N.G. Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik poliamidnykh materialov separatorov buksovykh uzlov podvizhnogo sostava [Investigation of the mechanical characteristics of polyamide materials for separators of axle boxes of rolling stock]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Material diagnostics], 2017, vol. 83, no. 12, pp. 43–47.
17. Efimov V.A., Shvedkova A.K., Koren'kova T.G., Kirillov V.N. Issledovanie polimernykh konstruktivnykh materialov pri vozdeystvii klimaticheskikh faktorov i nagruzok v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and loads in laboratory and field conditions]. *Trudy VIAM* [Proceedings of the All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials], 2021, no. 1. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_22002377_46052682.pdf (Accessed November 15, 2022).
18. Larchenko A.G. Otsenka kachestva izdelii iz polimernykh materialov mashinostroitel'nogo naznacheniya [Assessment of the quality of products from polymeric materials for machine-building purposes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 3 (146), pp. 463–471.
19. Vapirov Yu.M., Kirillov V.N., Krivonos V.V. Zakonomernosti izmeneniya svoystv polimernykh kompozitov konstruktivnogo naznacheniya pri dlitel'nom klimaticheskom starenii v svobodnom i nagruzhennom sostoyaniyakh [Patterns of

changes in the properties of structural polymer composites during long-term climatic aging in free and loaded states]. *Sbornik dokladov VI nauchnoi konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2006»* [Proceedings of the VI Scientific Conference on hydroaviation «Gidroaviasalon-2006»]. Gelendzhik, 2006, part II, pp. 103–108.

20. Kirillov V.N., Startsev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaya stoikost' i povrezhdaemost' polimernykh kompozitsionnykh materialov, problemy i puti resheniya [Climatic resistance and damage of polymer composite materials, problems and solutions]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2012, no. 5, pp. 412–423.

Информация об авторах

Филиппенко Николай Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ifpi@mai.ru.

Петрякова Елена Алексеевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: petryakova_ea@irgups.ru.

Information about the authors

Nikolai G. Filippenko, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ifpi@mai.ru.

Elena A. Petryakova, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: petryakova_ea@irgups.ru.