

УДК 004.93:620.17:678.06

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-4

Денисюк В. Ю., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9268-5489>

Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КЛІМАТИЧНИМИ ВИПРОБУВАННЯМИ ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО ЗОРУ

У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів (ГТВ), що піддаються впливу агресивних факторів зовнішнього середовища, зокрема температури, вологості, озону та ультрафіолетового випромінювання. Встановлено, що існуючі методи контролю стану зразків у кліматичних камерах характеризуються дискретністю, суб'єктивністю та недостатньою точністю, що ускладнює дослідження динаміки процесів старіння. Проаналізовано сучасні підходи до проведення кліматичних випробувань і методи машинного зору для виявлення дефектів поверхні матеріалів. Обґрунтовано доцільність інтеграції методів комп'ютерного зору в автоматизовані системи управління випробуваннями. Запропоновано структуру автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ, яка включає підсистему динамічного фотоаналізу стану зразків. Розроблено підходи до збору, обробки та аналізу графічної інформації, що дозволяють здійснювати кількісну оцінку ступеня та характеру старіння на основі параметрів тріщиноутворення та зміни поверхні матеріалу. Реалізація запропонованого підходу забезпечує безперервний моніторинг процесу старіння, зменшення впливу людського фактору та підвищення об'єктивності результатів випробувань. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів кліматичних випробувань і вдосконалення рецептур гумових матеріалів.

Ключові слова: гумотехнічні вироби, кліматичні випробування, старіння полімерів, машинний зір, обробка зображень, автоматизована система управління, тріщиноутворення.

Постановка проблеми. Під впливом кліматичних факторів, таких як кисень, озон, світлове випромінювання, температура та вологість, відбувається поступове старіння гумотехнічних виробів (ГТВ), що супроводжується погіршенням їх фізико-механічних властивостей і призводить до руйнування матеріалу. У зв'язку з цим важливим етапом розробки нових рецептур ГТВ та контролю якості існуючих виробів є проведення кліматичних випробувань, спрямованих на оцінку стійкості матеріалів до дії факторів старіння.

Сучасні кліматичні камери дозволяють моделювати експлуатаційні умови та забезпечують автоматизоване керування параметрами середовища. Однак контроль стану зразків у процесі випробувань залишається недостатньо автоматизованим і, як правило, здійснюється оператором візуально або з використанням обмеженого набору інструментальних засобів у дискретні моменти часу. Такий підхід є суб'єктивним, трудомістким і не забезпечує безперервного моніторингу процесів старіння [1].

Водночас сучасні досягнення в галузі машинного зору та обробки зображень відкривають можливості для автоматизованого аналізу змін поверхні матеріалів, зокрема виявлення тріщин, дефектів та інших ознак деградації. Проте їх інтеграція у системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ залишається обмеженою, що стримує підвищення ефективності та точності оцінювання процесів старіння [2, 3].

Проблема дослідження. Незважаючи на наявність значної кількості методів і алгоритмів машинного зору для розпізнавання дефектів поверхні матеріалів, їх практичне застосування у процесах кліматичних випробувань ГТВ є обмеженим. Основною причиною цього є відсутність спеціалізованого алгоритмічного забезпечення, адаптованого до особливостей процесів старіння ГТВ, які характеризуються складною фізичною природою, багатофакторністю впливів та різноманіттям форм прояву руйнування [4].

Додатковими ускладненнями є необхідність обробки великих обсягів графічної інформації, забезпечення коректної прив'язки аналізованих ділянок поверхні, усунення оптичних артефактів, а також встановлення кількісних залежностей між візуальними ознаками руйнування та фактичним ступенем старіння матеріалу.

Таким чином, існує науково-технічна проблема, що полягає у відсутності ефективних

методів і засобів автоматизованої оцінки ступеня та характеру старіння гумотехнічних виробів у процесі кліматичних випробувань на основі аналізу зображень. Розв'язання цієї проблеми потребує розробки комплексної автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями, яка інтегрує методи машинного зору, алгоритми обробки зображень та підсистеми підтримки прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика дослідження процесів старіння полімерних матеріалів, зокрема гумотехнічних виробів, широко представлена у наукових працях вітчизняних і зарубіжних авторів. Значна увага приділяється вивченню механізмів деградації матеріалів під впливом кліматичних факторів, розробці методів прискорених випробувань та оцінці зміни фізико-механічних властивостей ГТВ у процесі експлуатації [5, 6, 7].

У роботах, присвячених кліматичним випробуванням, розглядаються питання моделювання умов старіння за допомогою кліматичних камер, а також методи контролю параметрів середовища. Водночас більшість існуючих підходів орієнтована на контроль зовнішніх впливів, тоді як оцінка стану зразків часто залишається дискретною та виконується із залученням оператора [1, 8, 9].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням методів комп'ютерного зору та обробки зображень для виявлення дефектів поверхні матеріалів. Запропоновано численні алгоритми сегментації зображень, виділення контурів, текстурного аналізу та класифікації дефектів із використанням методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж. Такі підходи успішно застосовуються у задачах неруйнівного контролю, діагностики матеріалів і технічного зору в промисловості [2, 3, 10, 11, 12].

Разом з тим, аналіз наукових джерел показує, що існуючі методи машинного зору здебільшого не адаптовані до специфіки процесів старіння ГТВ у кліматичних камерах, які характеризуються динамічністю змін, варіативністю форм дефектів та впливом оптичних перешкод. Недостатньо дослідженими залишаються питання інтеграції підсистем збору та обробки графічної інформації в контур управління кліматичними випробуваннями, а також розробки алгоритмів кількісної оцінки ступеня старіння на основі аналізу зображень.

Таким чином, існує потреба у розробці комплексного підходу, що поєднує методи машинного зору, математичного моделювання та автоматизованого управління для підвищення ефективності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів.

Мета роботи – підвищення ефективності та об'єктивності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів шляхом розробки автоматизованої системи управління, що базується на використанні методів машинного зору для безперервного моніторингу, аналізу та кількісної оцінки ступеня і характеру старіння матеріалу в умовах дії кліматичних факторів.

Викладення основного матеріалу. На сучасному етапі цикл випробувань зразків ГТВ на стійкість до процесів старіння включає низку послідовних етапів [1]. На початковій стадії здійснюється визначення вихідних механічних характеристик зразка, що дозволяє сформулювати базовий рівень для подальшого порівняльного аналізу. Після цього зразок розміщується у робочій зоні кліматичної камери (КК), де створюються регламентовані умови впливу.

Основним етапом випробувань є проведення циклу прискореного старіння, що передбачає комплексний вплив руйнівних факторів, зокрема підвищеної температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання, озону та інших агресивних середовищ. Після завершення експозиції зразок вилучається з камери, і проводиться його візуальне обстеження з метою виявлення ознак деградації (утворення тріщин, зміна кольору, втрата еластичності тощо), а також інструментальна оцінка пошкоджень.

Наступним кроком є повторне визначення механічних показників, що дає змогу оцінити зміну властивостей матеріалу внаслідок старіння. На основі отриманих даних обчислюються кількісні показники старіння, після чого особа, яка приймає рішення (ОПР), формує висновки щодо експлуатаційної придатності матеріалу та надає рекомендації стосовно коригування рецептури або умов проведення подальших випробувань (наприклад, при дослідженні циклічного комбінованого впливу факторів). Таким чином, існуючу методику лабораторних випробувань ГТВ доцільно розглядати як складну інформаційно-вимірну систему, яка складається з взаємопов'язаних елементів: замовника, випробувальної лабораторії, нормативної бази (стандарти ДСТУ, ISO) та бази знань щодо механізмів руйнування гумових матеріалів (рис. 1). У ролі замовника можуть виступати як промислові підприємства, що займаються виробництвом ГТВ, так і науково-дослідні установи, орієнтовані на створення нових композицій гум або вдосконалення існуючих матеріалів.

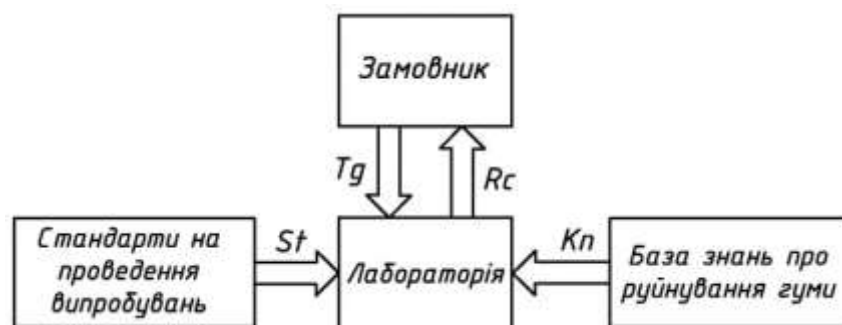


Рисунок 1 – Структурна схема взаємодії елементів, які здійснюють процес випробування ГТВ

Для ініціювання випробувань замовник передає до лабораторії заявку, дослідний зразок та сукупність супровідної інформації, яку формалізовано у вигляді множини Tg :

$$Tg = \{R, T, D, Obj\}, \quad (1)$$

де R – рецептура зразка ГТВ;

T – заявка на проведення випробування, що містить основну мету експериментальних досліджень;

D – інші відомі дані про випробовувальний зразок ГТВ; Obj – об'єкт дослідження.

Нормативні документи формують множину правил St , що регламентують умови, методи та критерії проведення випробувань. Водночас база знань Kn акумулює емпіричні та теоретичні відомості про процеси старіння гумових матеріалів залежно від їх складу, типу каучуку та використаних наповнювачів. Ключовим елементом системи є лабораторія, в межах якої функціонують такі підсистеми, як кліматична камера та підсистема прийняття рішень (ОПР). Саме тут реалізується повний цикл експериментальних досліджень.

На рисунку 2 представлено структурно-функціональну схему процесу виконання випробування ГТВ на стійкість до факторів старіння, де кожному суб'єкту та об'єкту відповідає набір виконуваних дій. Послідовність дій відповідає напрямку стрілок.

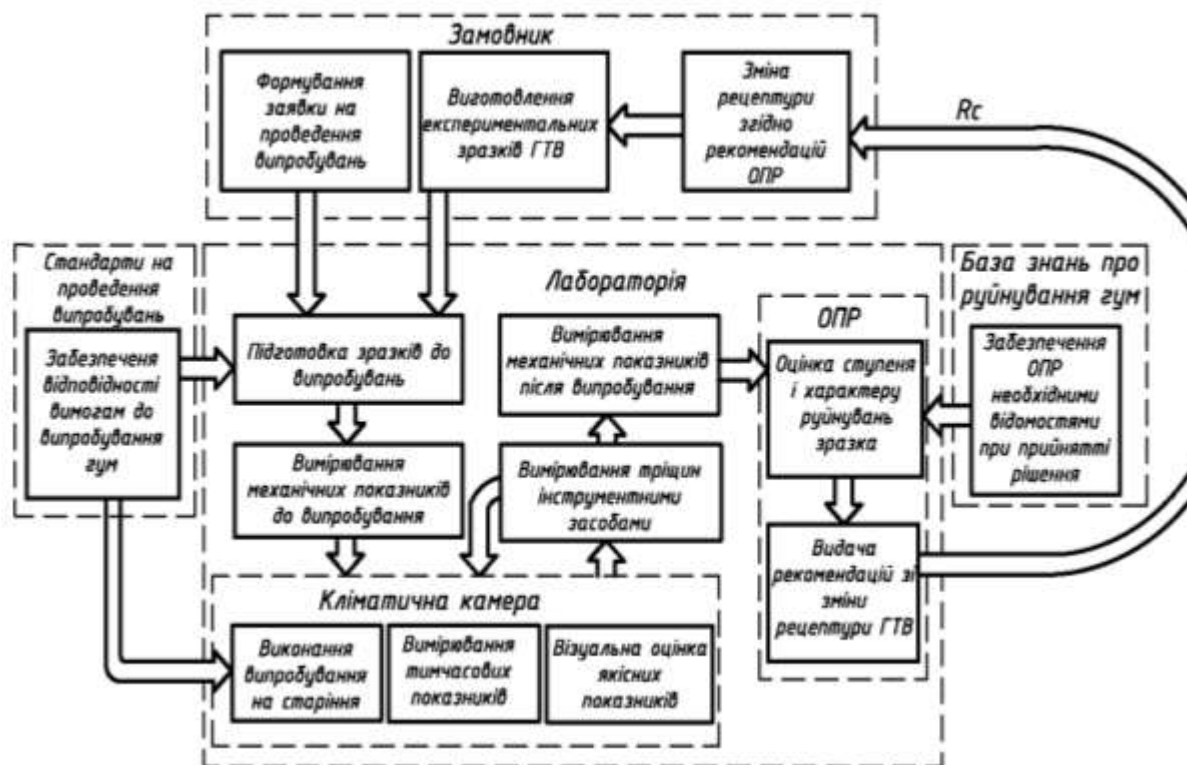


Рисунок 2 – Структурно-функціональна схема процесу випробувань ГТВ на стійкість до факторів старіння

На етапі підготовки зразків здійснюється їх калібрування та первинне вимірювання механічних характеристик відповідно до обраної методики. Далі зразки піддаються штучному старінню в кліматичній камері протягом заданого інтервалу часу. У процесі випробувань фіксуються часові параметри деградації, зокрема час до появи перших тріщин t_{nm} та час до повного руйнування t_{pz} , а також проводиться якісна візуальна оцінка.

Після завершення циклу старіння виконуються вимірювання геометричних параметрів дефектів (довжини, ширини, глибини тріщин) за допомогою простих вимірювальних засобів. За необхідності зразок може бути повторно підданий впливу або переданий на додаткові механічні випробування.

Кількісна оцінка ступеня старіння здійснюється шляхом розрахунку коефіцієнта кліматичного старіння:

$$K_{cm} = \frac{A_0}{A_1}, \quad (2)$$

де A_0 – значення показника до випробування на старіння;

A_1 – значення показника після випробування на старіння.

На основі цього коефіцієнта, а також аналізу морфології пошкоджень, ОПР формує рекомендації R_c щодо модифікації рецептури гумової суміші з метою підвищення її експлуатаційних характеристик. Разом з тим, слід зазначити, що існуюча методика має ряд обмежень, пов'язаних із труднощами дослідження динаміки процесів старіння в реальному часі, суб'єктивністю візуальної оцінки та недостатньою точністю вимірювання параметрів дефектів. Це обумовлює необхідність модернізації підходів до проведення кліматичних випробувань шляхом впровадження сучасних інформаційно-вимірювальних систем, зокрема засобів комп'ютерного зору та цифрової обробки зображень.

З метою формування вихідних даних для розроблення автоматизованої системи контролю візуальних показників старіння ГТВ було проведено серію експериментальних досліджень. У ході експериментів здійснювалося штучне та природне старіння зразків, виготовлених із гум різних рецептур (рис. 3), під впливом комплексу метеорологічних факторів: температури, сонячного випромінювання, вологості та атмосферних забруднень (озону, оксидів азоту).

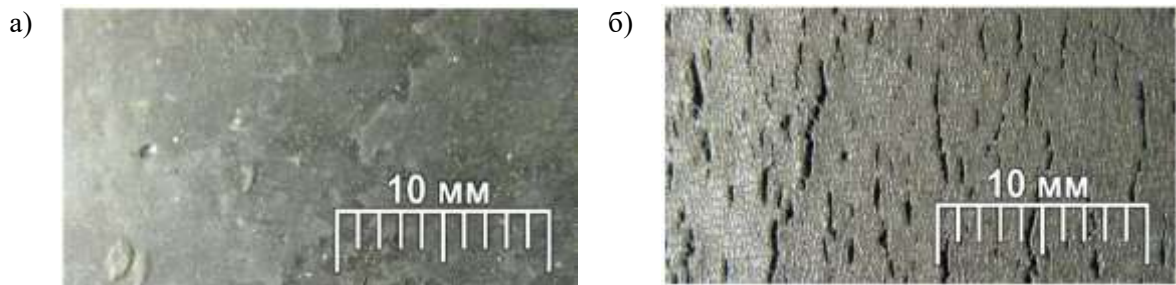


Рисунок 3 – Фотографія робочої ділянки зразка: а) до проведення випробувань; б) після проведення випробувань

У результаті експериментів було отримано серії цифрових зображень зразків вулканізаторів із різним вмістом наповнювачів. Фотозйомка виконувалася за допомогою камери Canon PowerShot A720 IS. Для забезпечення можливості переходу від піксельних координат до метричних величин додатково проводилася зйомка калібрувальної шкали (лінійки), розміщеної поруч із зразками. Отримані експериментальні дані стали основою для розроблення та апробації алгоритмів обробки зображень, спрямованих на автоматизоване визначення параметрів дефектів та кількісну оцінку ступеня старіння гумотехнічних виробів.

Аналіз існуючих підходів до проведення кліматичних випробувань ГТВ, а також узагальнення експериментальних результатів свідчать, що оцінювання ступеня та характеру розтріскування поверхні зразків у динаміці здебільшого має суб'єктивний характер і супроводжується значною похибкою. Це обумовлено залежністю результатів від кваліфікації дослідника, умов спостереження та відсутністю уніфікованих кількісних критеріїв.

З метою підвищення об'єктивності та відтворюваності результатів доцільним є впровадження оптичних та оптико-електронних засобів реєстрації, зокрема цифрових фотокамер або відеосистем, які забезпечують фіксацію стану поверхні зразків із заданою часовою дискретністю. Це дозволяє формувати послідовність зображень, що відображає еволюцію

процесів старіння ГТВ у реальному або квазі-реальному часі. Структурна схема модифікованої автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ з використанням підсистеми динамічного фотоаналізу показників старіння ГТВ представлена на рисунку 4.

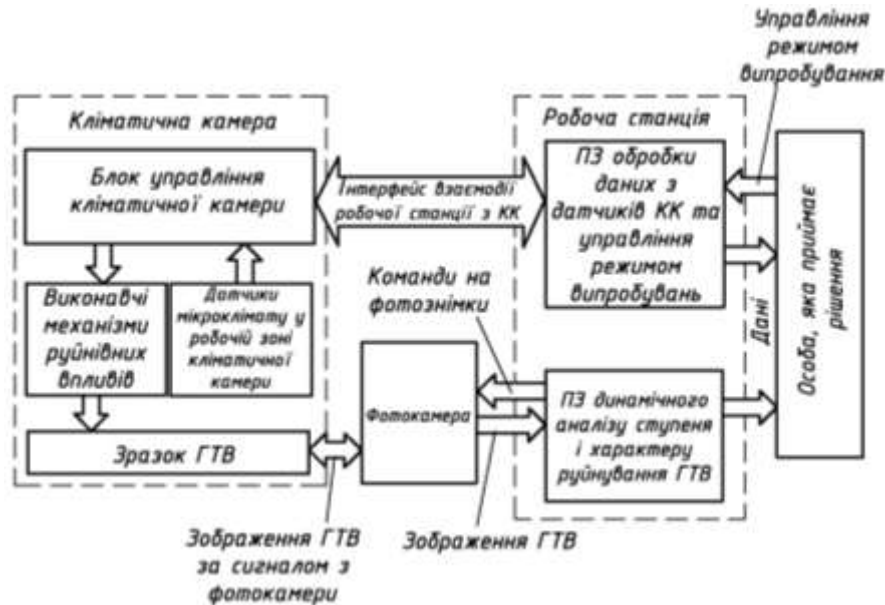


Рисунок 4 – Структурна схема модифікованої автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ

Отримані зображення передаються на робочу станцію, де за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення здійснюється їх автоматизована обробка, аналіз та візуалізація (рис. 5). У результаті формується інформаційна база для підтримки прийняття рішень особою, яка керує процесом випробувань (ОПР), зокрема щодо коригування режимів роботи кліматичної камери (КК) або оптимізації рецептури матеріалу.

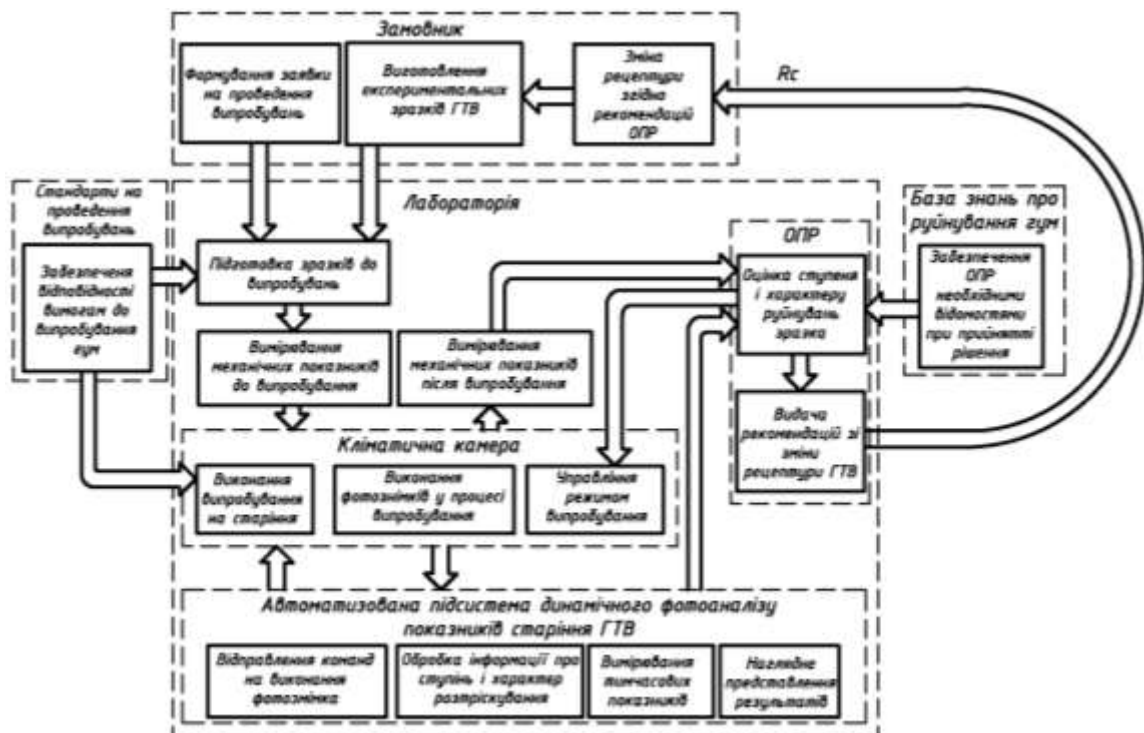


Рисунок 5 – Структурно-функціональна схема процесу випробувань ГТВ на стійкість до факторів старіння з впровадженням автоматизованого динамічного фотоаналізу показників старіння ГТВ

Запропонована модифікація системи випробувань передбачає інтеграцію підсистеми динамічного фотоаналізу (ПДФА) у загальну структуру автоматизованої системи управління (АСУ) кліматичними випробуваннями. Це дозволяє автоматизувати процес моніторингу стану зразків, зменшити вплив людського фактору та забезпечити безперервний контроль показників старіння.

У модифікованій структурі фотокамера інтегрується безпосередньо у підсистему кліматичної камери, що забезпечує автоматизоване отримання зображень без втручання оператора. Отримані дані піддаються попередній обробці (фільтрації шумів, корекції освітлення, підвищенню контрасту), після чого виконуються процедури виділення інформативних ознак старіння, таких як площа та щільність тріщин, їх геометричні параметри, а також показники деформації зразка.

Використання візуальних показників для розрахунку коефіцієнта кліматичного старіння $K_{ст}$ (зокрема за зміною площі розтріскування або лінійних деформацій) у ряді випадків дозволяє частково або повністю відмовитися від проведення механічних випробувань, що значно спрощує експериментальний процес та зменшує його тривалість.

Ключовою перевагою розробленої методики є можливість оперативного коригування параметрів випробувань завдяки безперервному отриманню інформації про стан зразка, що забезпечує підвищення точності та ефективності досліджень.

Для реалізації підсистеми динамічного фотоаналізу у кліматичній камері можуть застосовуватися різні варіанти розміщення оптичних засобів реєстрації, вибір яких визначається конструктивними особливостями КК, умовами експлуатації та вимогами до якості зображень. Для забезпечення стабільної якості зображень у всіх варіантах доцільно застосовувати додаткові джерела освітлення із контрольованими спектральними характеристиками та рівномірним розподілом світлового потоку.

На основі розглянутих технічних рішень розроблено структурно-функціональну схему автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ, що включає підсистему динамічного фотоаналізу (рис. 6). У такій системі реалізовано інтеграцію вимірювальних, керуючих та аналітичних компонентів у єдине інформаційне середовище.

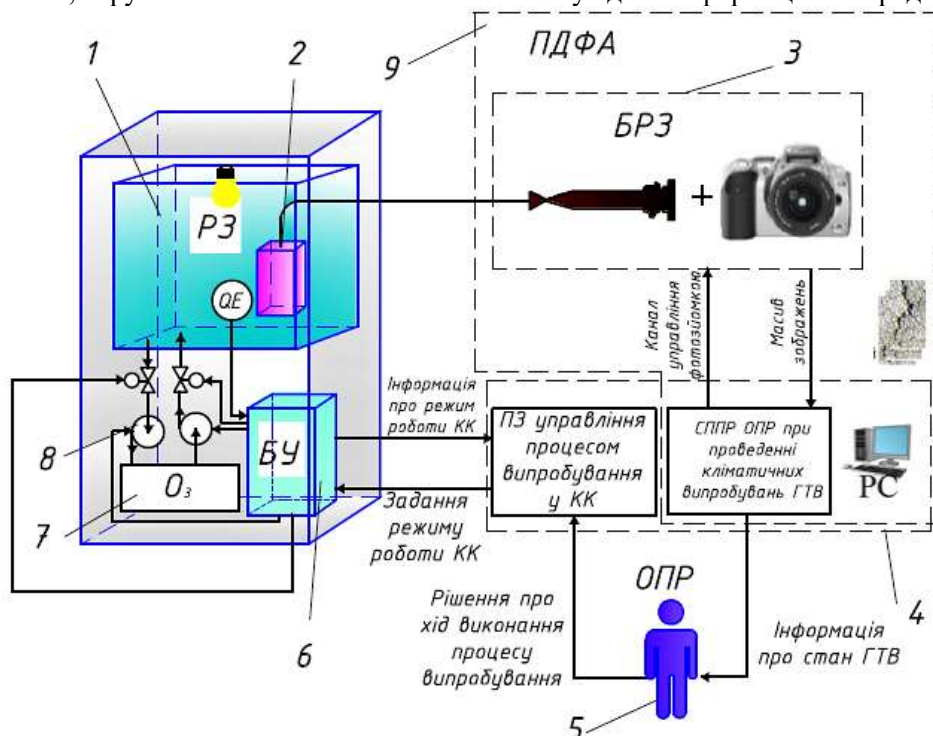


Рисунок 6 – Структурно-функціональна схема автоматизованої системи управління кліматичними випробуваннями ГТВ на прикладі озONOвої випробувальної камери: 1 – робоча зона (РЗ) КК із джерелом освітлення; 2 – зразок ГТВ; 3 – блок реєстрації зображень (БРЗ), що представляє собою цифрову фотокамеру, зв'язану з промисловим фіброскопом; 4 – робоча станція; 5 – особа, яка приймає рішення про хід проведення випробування (ОПР); 6 – блок управління (БУ) КК; 7 – озONOва установка; 8 – контур регулювання концентрації озону у робочій зоні КК; 9 – підсистема динамічного фотоаналізу (ПДФА) ступеня старіння ГТВ

Робоча станція взаємодіє з блоком управління кліматичною камерою через промислові інтерфейси (зокрема RS-485), що забезпечує як керування режимами випробувань (температура, вологість, концентрація озону), так і збір даних із датчиків. Отримана інформація використовується для аналізу впливу параметрів середовища на процеси старіння.

Автоматизація процесу фотозйомки реалізується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке підбирається відповідно до типу використовуваної камери. Для промислових камер відповідне ПЗ зазвичай входить до комплексу постачання, тоді як для комерційних фотокамер можуть застосовуватися сторонні рішення.

Інтеграція підсистеми фотоаналізу у контур управління дозволяє реалізувати принцип зворотного зв'язку, за якого результати обробки зображень безпосередньо впливають на параметри випробувань. Це відкриває можливості для адаптивного керування процесом старіння, зокрема для його інтенсифікації або моделювання реальних умов експлуатації.

Висновки. У роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності та об'єктивності кліматичних випробувань гумотехнічних виробів шляхом інтеграції методів машинного зору в автоматизовану систему управління випробуваннями.

Проведений аналіз існуючих підходів до кліматичних випробувань ГТВ показав, що основним їх недоліком є дискретність і суб'єктивність контролю стану зразків, що обмежує точність оцінювання процесів старіння та ускладнює дослідження їх динаміки. Встановлено, що сучасні методи обробки зображень мають значний потенціал для вирішення задач неруйнівного контролю, однак їх застосування у випробуваннях ГТВ потребує адаптації до специфіки процесів деградації гумових матеріалів.

У роботі удосконалено підхід до організації кліматичних випробувань шляхом представлення їх у вигляді комплексної інформаційно-вимірювальної системи, що включає взаємодію лабораторії, нормативної бази, бази знань та підсистеми прийняття рішень. Запропоновано структурно-функціональні схеми процесу випробувань і модифікованої автоматизованої системи управління з інтегрованою підсистемою динамічного фотоаналізу.

Розроблено концепцію підсистеми динамічного фотоаналізу, яка забезпечує безперервний моніторинг стану поверхні зразків у процесі старіння, автоматизоване виділення інформативних ознак (тріщини, їх геометричні параметри, площа пошкоджень) та формування кількісних показників деградації. Показано, що використання візуальних критеріїв дозволяє підвищити точність визначення коефіцієнта кліматичного старіння та, у ряді випадків, скоротити обсяг механічних випробувань.

Експериментальні дослідження підтвердили можливість отримання репрезентативних даних про процеси старіння ГТВ на основі аналізу цифрових зображень, а також доцільність використання калібрувальних процедур для переходу до метричних оцінок параметрів дефектів. Ключовим результатом роботи є обґрунтування ефективності інтеграції підсистеми машинного зору в контур управління кліматичною камерою, що забезпечує реалізацію зворотного зв'язку та створює передумови для адаптивного керування режимами випробувань. Це дозволяє підвищити інформативність експериментів, зменшити вплив людського фактору та забезпечити відтворюваність результатів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці спеціалізованих алгоритмів сегментації та класифікації дефектів із використанням методів глибокого навчання, створенні баз даних зображень процесів старіння ГТВ, а також у впровадженні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для автоматизованої оптимізації режимів кліматичних випробувань.

Інформаційні джерела

1. Кліматичні камери. URL: <https://alsi.ua/product-category/obladnannia/modeliuvannia-umov/klimatychni-kamery/> (дата звернення: 20.03.2026).
2. Вовк С. М., Гнатушенко В. В., Бондаренко М. В. Методи обробки зображень та комп'ютерний зір: навч. посіб. Д.: «ЛІРА», 2016. 148 с.
3. Жученко А. І., Черепанська І. Ю., Сазонов А. Ю., Ковалюк Д. О. Технології штучного інтелекту та основи машинного зору в автоматизації: теорія і практика. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2019. 386 с.
4. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Теоретичні аспекти процесів старіння полімерних матеріалів. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. Львів: ЛТЕУ, 2022. Вип. 30. С. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-01>

5. Спорягін Е. О., Варлан Е. О. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів: навч. посібник. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2012. 190 с.
6. Stadler R., Maurer A. Methods for durability testing and lifetime estimation of thermal interface materials in batteries. *Batteries*. 2019. 5 (34). P. 1-11.
7. Денисюк В. Ю. Автоматизація виробничих процесів в приладобудуванні: електронний посіб. URL: <https://surl.li/dydera> (дата звернення: 20.03.2026).
8. Доманцевич Н. І., Яцишин Б. П. Старіння полімерних матеріалів: фактори впливу, методи дослідження, моделювання та прогнозування процесів: монографія. Львів: ЛТЕУ, 2023. 184 с.
9. ДСТУ ISO 188:2019. Гума вулканізована або термопластична. Випробування на прискорене старіння та теплостійкість. [Чинний від 2019-01-09]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.
10. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. Збірник статей «Перспективні технології та прилади». 2020. Вип. 17. С. 33-41. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-17-5>
11. ДСТУ ISO 2230:2018. Вироби із гуми. Настанови щодо зберігання (ISO 2230:2002, IDT). [Чинний від 2018-01-06]. Київ, 2018. 14 с. (Інформація документація).
12. Холяк В. В., Владимирський І. А., Жабинська О. О. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 156 с.

UDC 004.93:620.17:678.06

Denysiuk V.

Lutsk National Technical University

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR CLIMATE TESTING OF RUBBER PRODUCTS USING MACHINE VISION METHODS

The paper considers the problem of increasing the efficiency of climatic tests of rubber products exposed to aggressive environmental factors, in particular temperature, humidity, ozone and ultraviolet radiation. It is established that the existing methods of monitoring the condition of samples in climatic chambers are characterized by discreteness, subjectivity and insufficient accuracy, which complicates the study of the dynamics of aging processes. Modern approaches to conducting climatic tests and machine vision methods for detecting surface defects of materials are analyzed. The feasibility of integrating computer vision methods into automated test management systems is substantiated. The structure of an automated control system for climatic tests of rubber products is proposed, which includes a subsystem for dynamic photoanalysis of the condition of samples. Approaches to collecting, processing and analyzing graphic information are developed, which allow for a quantitative assessment of the degree and nature of aging based on the parameters of crack formation and changes in the surface of the material. The implementation of the proposed approach provides continuous monitoring of the aging process, reducing the influence of the human factor and increasing the objectivity of test results. The results obtained can be used to optimize climatic testing regimes and improve rubber material formulations.

Keywords: rubber products, climatic testing, polymer aging, machine vision, image processing, automated control system, crack formation.

Дата першого надходження
статті до видання
08.04.2026 р.

Дата прийняття статті
до друку
29.04.2026 р.

Дата
оприлюднення
30.05.2026 р.