

КЛИМАТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация: В статье представлено комплексное исследование климатических камер как основного оборудования для проведения испытаний материалов, компонентов и готовых изделий на стойкость к воздействию окружающей среды. Рассмотрены базовые принципы работы, основанные на моделировании широкого спектра климатических и погодных условий в контролируемом объеме. Приведена развернутая классификация камер по типам воздействующих факторов: температура, влажность, солнечная радиация, коррозионная среда, атмосферные осадки. Подробно описаны ключевые конструктивные элементы и их взаимодействие в составе единого комплекса. Особое внимание уделено вопросам метрологического обеспечения и калибровки, как критически важным для достоверности результатов испытаний. Проанализированы современные тенденции в развитии данного вида оборудования, включая автоматизацию процессов, интеграцию с системами сбора данных и повышение энергоэффективности. Определены перспективные направления развития климатических испытаний.

Ключевые слова: климатическая камера, испытательное оборудование, моделирование климата, температура, влажность, термоциклирование, стандарты испытаний, калибровка, надежность.

Yugai A.E.

Student

Scientific supervisor: Dyatlova E.P., Cand. Of. Sci. (Engineering)

Higher School of Technology and Energy

Russia, Saint-Petersburg

CLIMATIC CHAMBERS: OPERATING PRINCIPLES, CLASSIFICATION AND MODERN AREAS OF APPLICATION

Abstract: The article presents a comprehensive study of climatic chambers as the primary equipment for testing materials, components and finished products for resistance to environmental influences. The basic principles of operation, based on modeling a wide range of climatic and weather conditions in a controlled volume, are considered. A detailed classification of chambers by types of influencing factors is given: temperature, humidity, solar radiation, corrosive environment, precipitation. The key structural elements and their interaction as part of a single complex are described in detail. Special attention is paid to metrological support and calibration as critical for the reliability of test results. Modern trends in the development of this type of equipment, including process automation, integration with data acquisition systems and improved energy efficiency, are analyzed. Promising directions for the development of climatic testing are identified.

Keywords: climatic chamber, test equipment, climate simulation, temperature, humidity, thermal cycling, test standards, calibration, reliability.

Введение

В условиях глобализации рынков и ужесточения конкуренции обеспечение высокой надежности и долговечности промышленной продукции является стратегической задачей. Изделия, узлы и материалы в процессе эксплуатации подвергаются комплексному воздействию разнообразных климатических факторов: экстремальных температур, колебаний влажности, солнечного излучения, атмосферных осадков, соленых

туманов, химически агрессивных сред и т.д. [1]. Для прогнозирования поведения продукции в реальных условиях, выявления потенциальных дефектов на этапе разработки и подтверждения соответствия требованиям стандартов применяются климатические испытания.

Основным инструментом для проведения таких испытаний является климатическая камера – специализированное оборудование, позволяющее создавать, поддерживать и программно изменять заданные параметры окружающей среды в изолированном объеме. Актуальность темы обусловлена непрерывным ростом требований международных (ISO, IEC) и национальных (ГОСТ) стандартов к качеству и надежности продукции в самых разных отраслях промышленности – от электроники и автомобилестроения до авиакосмической, фармацевтической индустрии и энергетики.

Целью данной работы является систематизация знаний о климатических камерах, их классификации, принципах функционирования, метрологическом обеспечении и основных областях применения, а также анализ современных тенденций в их развитии.

1. Принцип действия и конструкция

Несмотря на значительное разнообразие моделей, все климатические камеры построены на общем принципе: создание внутри изолированной рабочей камеры искусственного климата с заданными параметрами и их стабилизация в течение требуемого времени. Фундаментальную основу процесса описывают законы тепло- и массообмена [2].

К основным конструктивным элементам типичной климатической камеры относятся:

1.1 Рабочая камера. Изготавливается из коррозионностойких материалов (как правило, нержавеющая сталь марки AISI 304). Внутреннее пространство термически изолировано от внешней среды с помощью эффективной теплоизоляции (минеральная вата, сэндвич-панели с пенополиуретаном).

1.2 Система нагрева. Обычно реализована на основе ТЭНов (трубчатых электронагревателей), расположенных в потоке воздуха.

1.3 Система охлаждения. Бывает двух основных типов:

- Компрессионная: одно- или двухкаскадная холодильная машина на основе фреонового компрессора. Позволяет достигать температур до -70°C .

- Криогенная: с использованием жидкого азота (LN_2) или углекислого газа (CO_2), что позволяет достигать сверхнизких температур (до -180°C) и высоких скоростей охлаждения.

1.4 Система увлажнения. Для создания высокой относительной влажности используются методы пароувлажнения (нагревательный элемент испаряет дистиллированную воду), ультразвуковые увлажнители или адиабатическое охлаждение.

1.5 Система осушения. Реализуется преимущественно за счет работы испарителя холодильного контура, на поверхности которого конденсируется избыточная влага из воздуха.

1.6 Система вентиляции. Включает центробежный вентилятор и воздуховоды, обеспечивающие рециркуляцию воздуха внутри камеры для достижения высокой равномерности температуры и влажности по всему объему.

1.7 Система управления. Современные камеры оснащены программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) и сенсорными панелями, позволяющими задавать сложные многоступенчатые профили испытаний.

2. Классификация климатических камер

Климатические камеры классифицируются по нескольким ключевым признакам: по основному воздействию фактору, по диапазонам параметров, по объему рабочей камеры и по функциональному назначению [3]. Наиболее наглядной является классификация по типу моделируемых воздействий (Таблица 1).

Таблица 1. Классификация климатических камер по основным воздействующим факторам:

Тип камеры	Основной воздействующий фактор	Диапазон параметров	Область применения
Термокамера	Температура	Температура: от -100°C до +300°C	Испытание электронных компонентов, автомобильных деталей, термическая стабильная полимеров
Камера тепла-холода-влаги	Температура и влажность	Температура: от -70°C до 180°C Относительная влажность: 10% до 98%	Комплексные климатические испытания, ускоренное старение, испытания на коррозию
Термоударная камера	Резкое изменение температуры	Перемещение образца между зонами с высокой (+150°C... +300°C) и низкой (-65°C... -100°C) температурой	Испытание паяных соединений, многослойных печатных плат, выявление механических напряжений в материалах
Камера солевого тумана	Коррозионная среда	Распыление 5%-го раствора NaCl при t= +35°C	Ускоренные коррозионные испытания лакокрасочных покрытий, металлоконструкций, гальванических покрытий

Климатическая камера солнечной радиации	Световой излучение	Имитация солнечного спектра (УФ, видимое, ИК излучение), облученность до 1200 Вт/м ²	Испытания на светостойкость полимеров, красок, текстиля, оценка выцветания и термического старения
---	--------------------	---	--

Окончание таблицы 1

Камера дождя и водяного тумана	Водяные аэрозоли, струи воды	Распыление воды под давлением 80-100 кПа	Проверка герметичности корпусов автомобилей, электронных блоков, наружного освещения
--------------------------------	------------------------------	--	--

3. Метрологическое обеспечение и калибровка

Достоверность и воспроизводимость результатов климатических испытаний напрямую зависят от точности поддержания заданных параметров в камере. Поэтому метрологическое обеспечение является критически важным аспектом их эксплуатации [4]. Периодическая калибровка позволяет подтвердить соответствие реальных параметров в рабочем объеме заявленным техническим характеристикам и требованиям стандартов.

Процедура калибровки, как правило, включает в себя:

- **Аттестацию поля температур:** проводится с помощью поверенного многоканального регистратора данных и эталонных платиновых термометров сопротивления (например, Pt100), размещаемых в соответствии с методикой (например, в 8-9 точках рабочего объема) при установившихся режимах.

- **Аттестацию поля влажности:** осуществляется с помощью эталонных гигрометров (емкостных или психрометрических). Проверяется точность, стабильность и равномерность поддержания заданной относительной влажности.

Результаты калибровки оформляются в виде протокола (свидетельства), в котором указываются измеренные значения, погрешности и неопределенности измерений. Периодичность калибровки устанавливается в соответствии с внутренними регламентами предприятия, требованиями системы менеджмента качества (например, по ИСО 9001) или стандартами на методы испытаний, но обычно составляет 1-2 года.

4. Современные тенденции и перспективы развития

Современные климатические камеры эволюционируют в сторону создания интеллектуальных, интегрированных и экологичных испытательных комплексов. Среди ключевых тенденций можно выделить [5]:

- 4.1 Автоматизация и роботизация: интеграция промышленных роботов-манипуляторов для автоматической загрузки/выгрузки образцов, что исключает человеческий фактор и особенно востребовано в условиях термоудара и для испытаний в агрессивных средах.
- 4.2 Цифровизация и удаленный мониторинг: возможность контроля всех параметров испытаний, получения уведомлений и дистанционного управления камерой через облачные платформы и технологии «Индустрии 4.0» с использованием протоколов OPC UA.
- 4.3 Повышение энергоэффективности: широкое внедрение инверторных компрессоров, систем рекуперации тепла и холода, что позволяет значительно снизить эксплуатационные затраты.
- 4.4 Расширение функциональности: создание комбинированных камер, позволяющих одновременно или последовательно воздействовать на объект несколькими факторами (климат + вибрация + механические нагрузки).

4.5 Экологическая безопасность: переход на хладагенты с низким потенциалом глобального потепления (GWP), такие как R-1234ze и R-744 (CO₂).

Заключение

Климатические камеры представляют собой сложное технологическое оборудование, играющее ключевую роль в обеспечении качества, надежности и конкурентоспособности современной промышленной продукции. Понимание принципов их работы, знание классификации и особенностей применения позволяет грамотно планировать и проводить климатические испытания, адекватно моделирующие условия будущей эксплуатации.

Совершенствование конструкций, внедрение средств автоматизации, цифровизация и строгое соблюдение метрологических требований являются залогом получения достоверных и воспроизводимых результатов. Дальнейшее развитие будет связано с созданием более гибких, интегрированных в сквозные цифровые цепочки (Digital Twin) и экологически безопасных испытательных систем, что в конечном итоге способствует созданию высокотехнологичной и надежной продукции, отвечающей вызовам современности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р ИСО 9022-1-2012 Испытания на стойкость к внешним воздействующим факторам. Основные положения. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 25 с.
2. Мишенков, С.Л. Испытательная техника и стенды: учебное пособие для вузов / С.Л. Мишенков, Г.В. Майстренко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 367 с.
3. Климатические испытания аппаратуры, приборов и элементов радиоэлектронной аппаратуры: справочник / под ред. А.И. Коробова. – М.: Техносфера, 2015. – 480 с.
4. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 52 с.
5. Sheffield J. W. Advanced Environmental Test Chambers: Automation and Data Integration // Journal of Testing and Evaluation, vol. 48, no. 5, 2020. – pp. 3451-3462.