

Югай А.Э.

Студент

Научный руководитель: Дятлова Е.П., к.т.н

Высшая школа технологии и энергетики

Россия, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВЗРЫВООПАСНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация: Актуальность исследования обусловлена ужесточением требований к безопасности и достоверности испытаний взрывоопасных изделий (ВОИ) в экстремальных климатических условиях. Целью работы являлась разработка конструкции специализированной климатической камеры, обеспечивающей локализацию возможного взрыва и сохранение целостности испытательного оборудования. В исследовании применялись методы компьютерного инженерного анализа (CAE) для моделирования термических и прочностных нагрузок, а также анализ нормативной документации в области взрывобезопасности. В результате разработана трехслойная конструкция камеры с энергопоглощающим слоем и системой аварийного сброса давления, параметры которой были верифицированы методом конечных элементов. Основным выводом является подтверждение эффективности предложенной схемы локализации, позволяющей проводить циклические климатические испытания ВОИ в диапазоне от -60°C до $+70^{\circ}\text{C}$ при сохранении функциональности стенда после возможного внутреннего взрыва мощностью до 100 г в тротиловом эквиваленте.

Ключевые слова: климатическая камера, взрывоопасные изделия, испытательное оборудование, взрывобезопасность, локализация взрыва, конечные элементы, термические нагрузки.

Yugai A.E.

Student

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

Higher School of Technology and Energy

Russia, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A SAFE CLIMATIC CHAMBER FOR TESTING EXPLOSIVE DEVICES

Abstract: The relevance of the study is driven by the increasing requirements for the safety and reliability of tests of explosive devices (ED) under extreme climatic conditions. The aim of the work was to develop a design of a specialized climatic chamber that ensures the localization of a possible explosion and the preservation of the integrity of the test equipment. The study used methods of computer engineering analysis (CAE) for modeling thermal and structural loads, as well as an analysis of regulatory documentation in the field of explosion safety. As a result, a three-layer chamber design with an energy-absorbing layer and an emergency pressure relief system was developed, the parameters of which were verified by the finite element method. The main conclusion is the confirmation of the effectiveness of the proposed localization scheme, which allows for cyclic climatic tests of ED in the range from -60°C to $+70^{\circ}\text{C}$ while maintaining the functionality of the stand after a possible internal explosion with a power of up to 100 g in TNT equivalent.

Keywords: climatic chamber, explosive devices, test equipment, explosion safety, explosion containment, finite elements, thermal loads.

Введение

Современные взрывоопасные изделия (ВОИ), к которым относятся средства инициирования, пиротехнические устройства и некоторые виды боеприпасов, предназначены для эксплуатации в широком диапазоне климатических условий – от арктического холода до тропической жары и влажности. Для подтверждения их надежности и безопасности необходимы

испытания в контролируемых климатических условиях, имитирующих реальные среды эксплуатации [1]. Стандартные климатические камеры не предназначены для работы с опасными объектами, так как внутренний взрыв приводит к катастрофическому разрушению оборудования, возникновению вторичных поражающих факторов и риску для персонала.

Таким образом, возникает научно-техническая проблема, заключающаяся в необходимости совмещения двух противоречивых функций: создания внутри камеры точной контролируемой климатической среды и обеспечения абсолютной безопасности при возможной детонации испытуемого образца [2]. Существующие решения часто основаны на массивных глухих защитных сосудах, что резко увеличивает стоимость испытаний, усложняет процесс загрузки и наблюдения, а также делает невозможным проведение циклических испытаний «тепло-холод» без длительных простоев.

Целью данного исследования является разработка концепции и анализ конструкции безопасной климатической камеры для испытаний ВОИ, которая обеспечивала бы локализацию взрыва с энергосодержанием до 100 г тротила, сохраняя при этом свою функциональность для проведения последующих испытаний. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) проанализировать нормативные требования к взрывобезопасному оборудованию;
- 2) разработать многослойную конструкцию камеры с системами защиты;
- 3) провести имитационное моделирование термопрочностных характеристик камеры и последствий ударной нагрузки от внутреннего взрыва методом конечных элементов (МКЭ) [3].

Методы и исследования

В качестве методологической основы исследования использовался системный инженерный подход. На первом этапе был проведен анализ нормативной базы (ГОСТ Р 52330-2005, ГОСТ Р 53737-2009, серия

стандартов МЭК 60068), регламентирующей как климатические испытания, так и требования к взрывозащищенному оборудованию.

Основным инструментом проектирования и анализа стала компьютерная инженерная (CAE) система Ansys Mechanical. Для разработки конструкции была предложена трехслойная модель рабочего объема камеры.

Внутренний слой (контактный): Выполнен из коррозионностойкой стали AISI 321, предназначен для создания герметичной среды и восприятия термических напряжений в диапазоне от -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$.

Демпфирующий слой: состоит из ячеистого алюминиевого наполнителя (Aluminum Foam) с высокой удельной энергоемкостью. Его функция – диссипация энергии ударной волны и осколков.

Внешний силовой слой (кожух): Изготовлен из высокопрочной конструкционной стали 30ХГСА. Предназначен для восприятия остаточной нагрузки после демпфирующего слоя и является последним барьером.

Для сброса избыточного давления при взрыве была спроектирована система с мембранными предохранительными клапанами, настроенными на срабатывание при давлении 0,5 МПа, что исключает разрушение внутреннего слоя при сохранении условий локализации основной энергии внутри демпфирующего слоя.

Математическое моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе решалась задача нестационарной теплопроводности для оценки температурных полей и термических деформаций внутреннего слоя при экстремальных температурах. На втором этапе методом явного динамического анализа (Explicit Dynamics) моделировалось кратковременное воздействие ударной волны от детонации заряда, эквивалентного 100 г тротила. В качестве критерия оценки безопасности принималось отсутствие пластических деформаций во внешнем силовом слое и остаточная деформация внутреннего слоя, не препятствующая закрытию герметичной двери [4].

Результаты оригинального авторского исследования

Результаты теплового моделирования показали, что предложенная трехслойная конструкция эффективно изолирует внешний кожух от экстремальных внутренних температур. При установке внутренней температуры $+70^{\circ}\text{C}$ температура на внешней поверхности кожуха не превышала $+35^{\circ}\text{C}$, что соответствует требованиям безопасности для персонала. Термические напряжения в сварных швах внутренней камеры находились в допустимых пределах с запасом по текучести материала не менее 1,8.

Динамическое моделирование воздействия ударной волны позволило визуализировать процесс локализации. Было установлено, что ячеистый алюминиевый наполнитель поглощает до 70-75% импульса, значительно снижая пиковое давление, передаваемое на внешний кожух. Максимальное эквивалентное напряжение (по Мизесу) в материале внешнего слоя составило 415 МПа, что ниже предела текучести для стали 30ХГСА (≥ 750 МПа). Остаточная деформация внутренней камеры после условного «взрыва» составила порядка 1,5 мм в зоне, противоположной месту закладки заряда, что является допустимым и не нарушает геометрию уплотнения двери [5].

На основе проведенного анализа были определены окончательные конструктивные и эксплуатационные параметры разрабатываемой камеры (Таблица 1)

Параметр	Значение	Примечание
Рабочий объем, м ³	0,5	
Диапазон температур, °C	-60 ... +70	
Скорость изменения температуры, °C/мин	до 5	Скорость изменения температуры, °C/мин
Максимальная энергия локализуемого взрыва, г в тротиловом эквиваленте	100	
Материал внутренней камеры	Сталь AISI 321	
Материал	Алюминиевая пена	Плотность $\sim 0,5$ г/см ³

демпфирующего слоя		
--------------------	--	--

Материал внешнего кожуха	Сталь 30ХГСА	
Давление срабатывания сбросных клапанов, МПа	0,5	

Полученные данные моделирования подтвердили принципиальную работоспособность концепции. Критическим узлом, как показал анализ, является не сам корпус, а гермовводы для коммуникаций и конструкция быстросъемной двери с многоступенчатым уплотнением. Для этих узлов были предложены оригинальные решения с использованием конических разрывных мембран и уплотнительных профилей из силикона, сохраняющих эластичность в заданном температурном диапазоне [6].

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана и проанализирована конструкция специализированной климатической камеры для испытаний взрывоопасных изделий. Предложенное техническое решение, основанное на принципе многослойной энергопоглощающей структуры с системой аварийного сброса давления, позволяет решить актуальную научно-техническую проблему совмещения функций точного климатического воздействия и обеспечения взрывобезопасности.

Компьютерное моделирование методом конечных элементов подтвердило, что конструкция способна выдерживать термические циклические нагрузки в диапазоне от -60°C до $+70^{\circ}\text{C}$ и локализовать энергию внутреннего взрыва мощностью до 100 г в тротиловом эквиваленте без необратимых деформаций внешнего силового корпуса [7]. Ключевыми преимуществами разработанной схемы являются ее потенциальная ремонтпригодность (возможность замены демпфирующего наполнителя и внутренней камеры) и сохранение функциональности стенда после возможного инцидента, что обеспечивает экономическую целесообразность.

Основные выводы работы соответствуют поставленным целям и задачам:

1) Проанализированы и синтезированы нормативные требования к взрывобезопасным климатическим камерам.

2) Разработана оригинальная трехслойная конструкция камеры, обеспечивающая локализацию взрыва за счет комбинации пластической деформации ячеистого наполнителя и сброса избыточного давления.

3) Методами CAE-моделирования верифицирована прочность и термическая стойкость конструкции, определены ее оптимальные параметры. Полученные результаты открывают перспективу для создания линейки испытательного оборудования различного объема и мощности, а также для дальнейших исследований в области применения новых композитных материалов в качестве демпфирующих сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 52330-2005. Надежность в технике. Испытания на климатические внешние воздействующие факторы машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. – Введ. 2006-07-01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 15 с.
2. ГОСТ Р 53737-2009 (МЭК 60068-3-5:2001). Испытания на климатические и механические внешние воздействующие факторы. Руководство по подтверждению работоспособности оборудования при температурных испытаниях. – Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 40 с.
3. Baker W. E., Cox P. A., Westine P. S. et al. Explosion Hazards and Evaluation. – Amsterdam: Elsevier, 1983. – 807 p.
4. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2006. – 656 с.
5. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1966. – 635 с.
6. Андерсон Т. Анализ нелинейных динамических процессов методом конечных элементов. – М.: Мир, 1983. – 455 с.
7. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. – М.: Госстрой России, 1996. – 44 с.