



УДК 620.162.4

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЗРЫВОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ОБОЛОЧЕК НА ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТЬ

Руденко Сергей Анатольевич,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», заведующий отделом

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Николаенко Дмитрий Иванович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», научный сотрудник

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Аннотация

Представлены результаты разработки и изготовления экспериментальной установки для последующего исследования взаимосвязи динамического и статического методов испытаний взрывонепроницаемых оболочек на взрывоустойчивость. На основе анализа ранее выполненных работ выбрана схема ударной трубы с разделением внутреннего объема перфорированной диафрагмой. Регулирование импульсного давления предусмотрено изменением осевого положения диафрагмы и диаметра ее проходного отверстия, то есть управлением условиями эффекта накопления давления (pressure piling). Разработаны программа и методика четырехэтапного эксперимента, комплект конструкторской документации и изготовлен опытный образец установки. Для сопоставления методов предложено использовать порог разрушения пакетов металлических мембран одинаковой толщины при динамическом и статическом нагружении. Экспериментальная калибровка и сравнительные испытания на момент подготовки статьи еще не проводились; поэтому результатами работы являются конструктивная реализация регулируемого источника импульсной нагрузки и методическая схема будущего эксперимента.

Ключевые слова: взрывонепроницаемая оболочка, взрывоустойчивость, динамические испытания, статические испытания, ударная труба, накопление давления, pressure piling.

DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF AN EXPERIMENTAL TEST FACILITY FOR COMPARATIVE EXPLOSION RESISTANCE TESTING OF FLAMEPROOF ENCLOSURES

Rudenko Sergey Anatolyevich,

State Budgetary Institution "Research, Design and Technological Institute of Explosion-Protected and Mining Electrical Equipment", head of department

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Nikolaenko Dmitry Ivanovich,

State Budgetary Institution "Research, Design and Technological Institute of Explosion-Protected and Mining Electrical Equipment", researcher

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

ABSTRACT

The results of the development and manufacture of an experimental test facility for subsequent investigation of the relationship between dynamic and static methods of explosion resistance testing of flameproof enclosures are presented. Based on the analysis of previous studies, a shock-tube configuration with the internal volume divided by a perforated diaphragm was selected. Regulation of the impulse pressure is achieved by varying the axial position of the diaphragm and the diameter of its orifice, thereby controlling the conditions of the pressure piling effect. A four-stage experimental program and test procedure were developed, a complete set of design documentation was prepared, and a prototype test facility was manufactured. To compare the two methods, it is proposed to use the failure threshold of metallic membrane packs of identical thickness under dynamic and static loading. Experimental calibration and comparative tests had not yet been carried out at the time of preparation of the article; therefore, the results of the work consist in the structural implementation of an adjustable source of impulsive loading and the methodological framework for the subsequent experiment.

Keywords: flameproof enclosure, explosion resistance, dynamic test, static test, shock tube, pressure piling.

Введение

Оборудование с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка "d"» должно сохранять целостность при внутреннем взрыве и препятствовать передаче воспламенения во внешнюю взрывоопасную среду. Одним из ключевых этапов подтверждения соответствия такой оболочки является испытание на взрывоустойчивость. ГОСТ ИЕС 60079-1-2013 предусматривает динамический и статический способы такого испытания [1]. В первом случае нагрузка формируется непосредственно при воспламенении газозооушной смеси внутри оболочки, во втором – за счет гидростатического давления. Формально эти способы используются как альтернативные методы проверки одного и того же свойства конструкции, однако характер нагружения принципиально различается.

При динамическом испытании максимальное давление формируется за миллисекунды: область пикового воздействия составляет ориентировочно 2–30 мс, а полный процесс может занимать порядка 50–1000 мс. При статическом испытании давление удерживается не менее 10 секунд, а на практике – значительно дольше, для выявления течи

или капежа. Поэтому равенство пиковых значений давления само по себе еще не означает тождественности механического воздействия.

Практический интерес к этой проблеме усиливается для оболочек со сложным или разделенным внутренним объемом. Узкие каналы, отверстия, зазоры и несплошные перегородки могут вызывать предварительное поджатие смеси в соседнем объеме и формирование повышенного давления – эффект накопления давления (pressure piling). Исследования и анализ, выполненные ранее в ГБУ «НИИВЭ» [2], а также современные публикации [3, 4] показывают существенную зависимость параметров давления от геометрии сообщающихся объемов и проходных сечений. В более ранних исследованиях ВНИИВЭ также ставился вопрос о сопоставимости кратковременного взрывного и гидростатического воздействия [5, 6].

Для проверки эквивалентности методов недостаточно единичного сопоставления двух испытаний. Необходимо получить серию воспроизводимых уровней динамического давления, применить к одинаковым модельным образцам оба вида нагружения и затем сопоставить порог разрушения. Это предъявляет к экспериментальной установке дополнительное требование: давление взрыва должно не просто измеряться, а управляемо изменяться в достаточно широком диапазоне без замены самой камеры. По результатам анализа технических и методических решений в области ударных труб [7–12] для этой задачи была выбрана конструкция, в которой управляющими параметрами выступают положение внутренней диафрагмы и площадь ее проходного отверстия.

На данный момент в ГБУ «НИИВЭ» выполняется научно-исследовательская работа по выявлению корреляции между статическим и динамическим методами испытаний.

Результаты

Целью данного этапа работы является разработка, конструктивное обоснование и изготовление экспериментальной установки для получения регулируемого импульсного давления взрыва, а также формирование методической схемы последующего сопоставления динамического и статического методов испытаний взрывонепроницаемых оболочек на взрывоустойчивость.

Для непосредственного сравнения методов выбран пакет тонких металлических мембран, имитирующих стенку взрывонепроницаемой оболочки. Для заданного динамического режима должна определяться пограничная суммарная толщина пакета, после чего такой же пакет испытывается гидростатическим давлением до разрушения. Тем самым оба вида нагружения сопоставляются по единому пороговому критерию на геометрически одинаковом образце.

Разработанная установка включает взрывную камеру в виде толстостенной металлической трубы, систему приготовления и перемешивания газоздушнoй смеси, систему инициирования воспламенения и измерительный тракт. Камера закрывается фланцевыми крышками и допускает две конфигурации выходной части: с диском, несущим датчик давления, либо с оправой для пакета мембран. Внутри камеры устанавливается перфорированная диафрагма, которая делит объем на первичную и вторичную полости. Инициирование взрыва производится в районе крышки первичной полости; во вторичной полости регистрируется давление либо размещается пакет мембран. Общая функциональная схема приведена на рисунке 1 [разработан авторами].

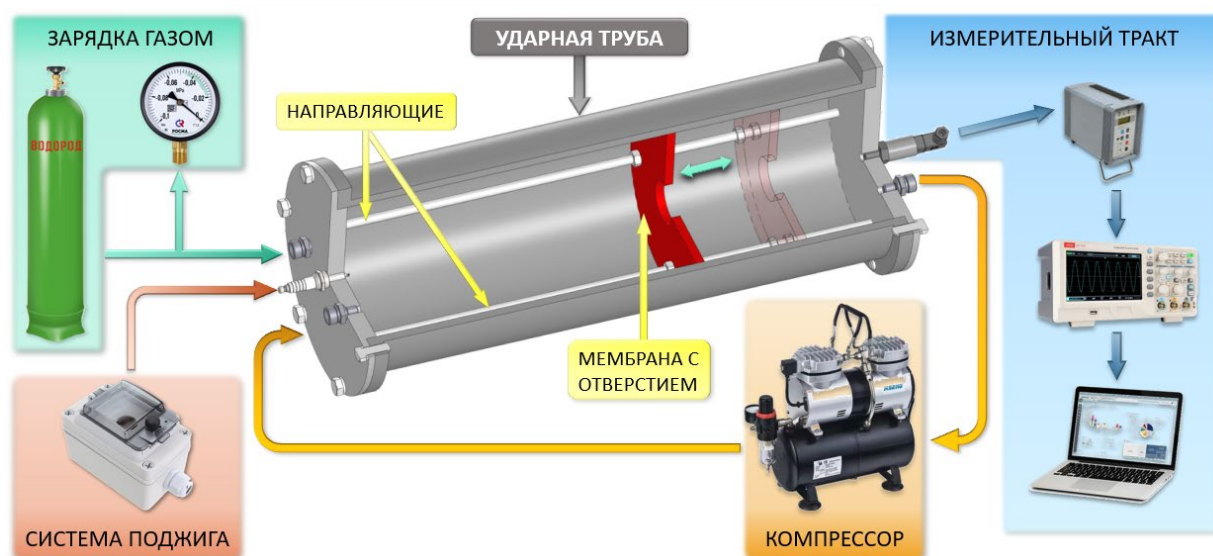


Рисунок 1 – Функциональная схема установки

Ключевые геометрические и метрологические параметры, заложенные в конструкцию и программу испытаний, приведены в таблице 1 [разработана авторами]. Значения относятся к разработанной установке и средствам измерения; они не являются результатами испытательной калибровки.

Таблица 1 – Основные параметры экспериментальной установки

Параметр	Значение / средство	Назначение
Внутренний диаметр камеры	200 мм	Рабочий поперечный размер взрывной камеры
Длина трубчатой части	625 мм	Формирует основной рабочий объем
Толщина стенки трубы	10 мм	Обеспечение прочности камеры
Свободный объем камеры	20 000 см ³	Расчетный/конструктивный объем газовой смеси
Проходные отверстия диафрагм	10; 20; 34; 51 мм	Один из двух регулирующих факторов давления
Направляющие диафрагмы	6 шпилек М6	Позволяют изменять осевое положение диафрагмы
Измерение давления взрыва	KISTLER 6031 + KISTLER 5001	Диапазон до 10 МПа
Регистрация сигнала	HAMEG HM 507	Запись временной реализации давления

Концентрация газовой смеси контролируется интерферометром ИТР-1; воспламенение выполняется импульсным высоковольтным источником. Давление регистрируется преобразователем KISTLER 6031 через усилитель заряда KISTLER 5001 с записью сигнала осциллографом HAMEG HM 507. Это позволит анализировать как максимальное давление, так и временную форму импульса.

Основным результатом этапа является переход от общей идеи ударной трубы к изготовленной экспериментальной камере, в которой условия накопления давления задаются двумя независимыми геометрическими факторами. Первый фактор – расстояние от диафрагмы до торцевой части камеры, то есть соотношение объемов первичной и

вторичной полостей. Второй фактор – диаметр отверстия в диафрагме. Изменение первого параметра влияет на объем смеси, участвующий в начальном горении и в последующем поджати смеси во второй полости; изменение второго определяет интенсивность газодинамического обмена между полостями. Совместное варьирование этих факторов должно позволить получить семейство устойчивых режимов с различным максимальным давлением.

С инженерной точки зрения важным является то, что изменение режима не требует переделки корпуса камеры. Диафрагма перемещается вдоль направляющих и фиксируется в требуемом положении, а диаметр проходного сечения меняется установкой сменного элемента. Это превращает одну и ту же оболочку в многофакторный экспериментальный стенд. Общий вид взрывной камеры представлен на рисунке 2 [разработан авторами].

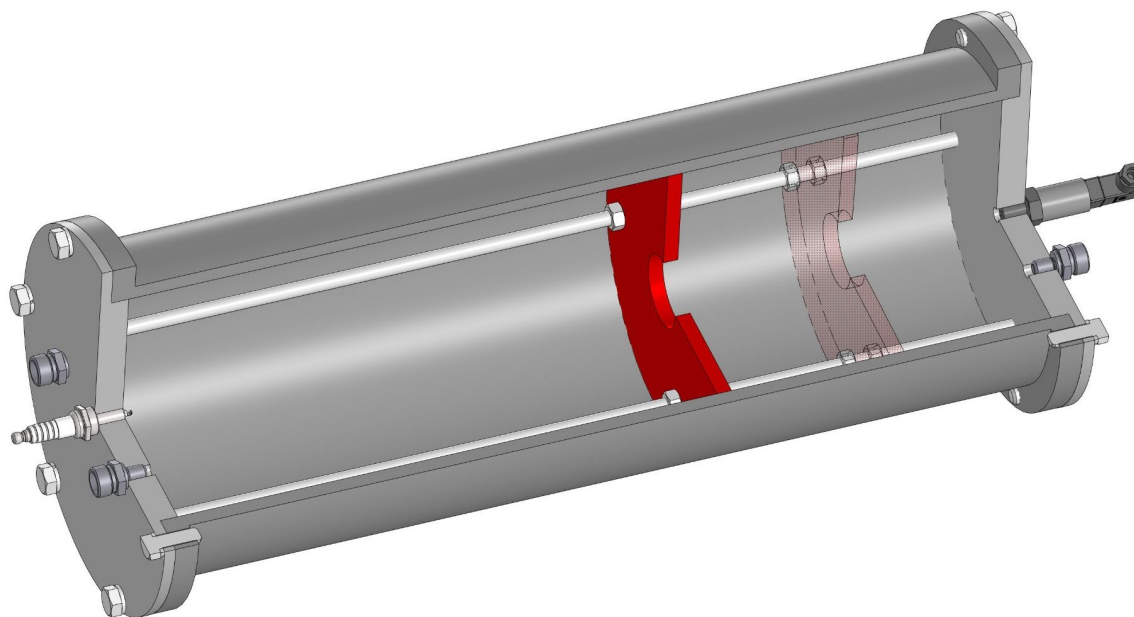


Рисунок 2 – Трехмерная модель взрывной камеры с направляющими и сменной диафрагмой

Вторым существенным результатом является унификация модельного образца и рабочей камеры для обоих способов нагружения. При динамическом испытании в торцевой части устанавливается оправа с пакетом мембран, а внутри камеры сохраняется диафрагма, формирующая требуемый импульс давления. При переходе к статическому испытанию та же камера подключается к гидравлическому стенду, а внутренние элементы удаляются. На оправу устанавливается пакет мембран той же суммарной толщины. Благодаря этому сравниваются не разные конструкции, а один и тот же тип модельного элемента при двух принципиально различных характерах нагружения.

Использование одинакового пакета мембран уменьшает влияние геометрических различий между опытами и дает однозначный критерий разрушения. Ограничение модели состоит в том, что мембрана не воспроизводит пространственную жесткость, соединения и концентраторы напряжений реальной оболочки, поэтому в дальнейшем понадобится расчет коэффициентов приведения.

Разработанная методика разделяет будущий эксперимент на четыре последовательных этапа. Такое разделение важно методически: сначала устанавливается управляемость источника нагрузки, затем определяется порог динамического разрушения, после чего тот же пороговый образец исследуется статически, и лишь на заключительном этапе выполняется сопоставление. Таким образом, отсутствие калибровки не смешивается с задачей сравнения методов. Последовательность этапов представлена в таблице 2 [разработана авторами].

Таблица 2 – Логика последующего экспериментального исследования

Этап	Содержание	Результат этапа
Калибровка	Перебор положений диафрагмы (L) и диаметров отверстия (d); многократная регистрация давления взрыва (P)	Функция $P = f(L, d)$, выбор пяти воспроизводимых контрольных уровней
Динамическое разрушение	Испытание пакетов мембран при выбранных контрольных уровнях	Пограничная толщина пакета мембран для каждого уровня динамического давления
Статическое разрушение	Гидростатическое нагружение пакетов той же толщины	Давление статического разрушения
Сопоставление	Построение зависимостей и учет погрешностей	Оценка корреляции

Для обработки результатов предлагается использовать отношение критического статического давления к критическому динамическому для одной и той же толщины пакета мембран. Взаимосвязь методов в исследованном диапазоне может быть описана масштабным коэффициентом, систематическое изменение которого будет указывать на нелинейный характер зависимости. Каждый режим должен воспроизводиться многократно, а контрольные точки выбираться только после оценки разброса давления.

По разработанной конструкторской документации изготовлены корпусные детали, фланцы, крышки, оправа для мембран, штуцеры и сменные диафрагмы. На момент подготовки статьи изготовление и сборка установки завершены, реализованы узлы подключения пневматической линии, системы зажигания и измерительного тракта. Общий вид взрывной камеры показан на рисунке 3 [разработан авторами].

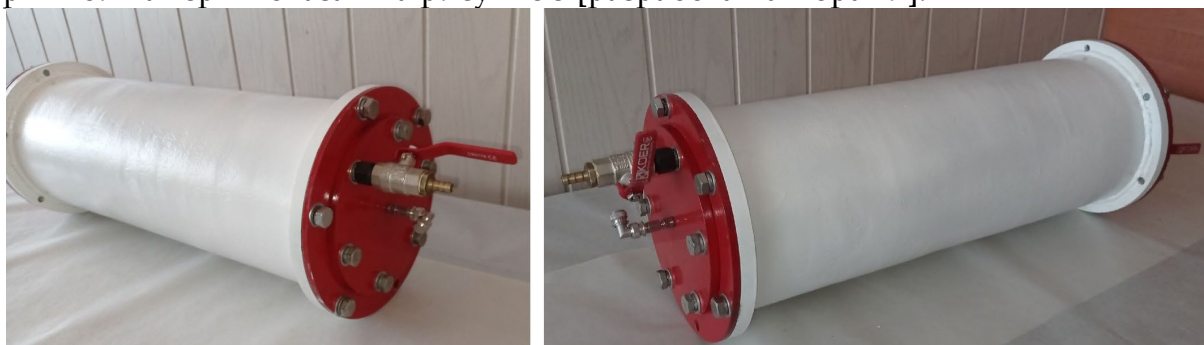


Рисунок 3 – Изготовленная экспериментальная камера

Самостоятельное значение выполненного этапа состоит в том, что задача сравнения методов переведена в измеримую схему: определены независимые факторы L и d, единый модельный образец и пороговый критерий разрушения; один стенд позволяет формировать серию динамических режимов без изменения корпуса, а измерительный тракт обеспечивает регистрацию временной реализации давления. Поэтому дальнейший анализ сможет учитывать не только максимальное давление, но и время его нарастания до пикового значения.

Заключение

Разработана и изготовлена экспериментальная установка, в основе которой лежит взрывная камера с внутренней перфорированной диафрагмой. Изменение положения диафрагмы и диаметра ее проходного отверстия создает два управляемых фактора формирования импульсного давления. Конструкция позволяет в одной камере выполнять калибровку давления и испытания пакетов мембран (макетов стенки оболочки).

Сформирована четырехэтапная методика проведения исследования: калибровка установки, определение пограничной толщины мембран при динамическом нагружении, гидростатическое разрушение тех же пакетов и сопоставление результатов с учетом погрешности. Следующий этап работы – наладка установки и получение воспроизводимых контрольных режимов давления.

Список литературы:

1. ГОСТ IEC 60079-1-2013. Взрывоопасные среды. Часть 1. Оборудование с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемые оболочки “d”» (с Изменением № 1). М.: Стандартинформ, 2014.
2. Руденко С.А. Исследование эффекта накопления давления для смежных отделений взрывонепроницаемых оболочек // Сборник научных трудов ГУ «НИИВЭ». 2017. С. 146–153.
3. Li D., Dai S., Lin T. Evaluation of the Explosion Pressure Parameters in Flameproof Enclosures under the Pressure Piling Condition // Energies. 2021. Vol. 14. 8156.
4. Li D. et al. Numerical Simulation of the Effect of Diaphragm Orifice in a Flameproof Enclosure with an Interconnected Structure during Pressure Piling // Thermal Science. 2023. Vol. 27, No. 2B. P. 1539–1551.
5. Совершенствование методов испытаний электрооборудования на взрывозащищенность: отчет о НИР (промежуточный) / ВНИИВЭ; рук. С.С. Гескин; исполн. Н.П. Власенко [и др.]. Донецк, 1972. Инв. № 13.2675. 75 с.
6. Совершенствование методов испытаний электрооборудования на взрывозащищенность: отчет о НИР (заключительный) / ВНИИВЭ; рук. С.С. Гескин; исполн. Н.П. Власенко [и др.]. Донецк, 1974. Инв. № 13.2675. 122 с.
7. Кузнецов В.В., Котов М.А. Анализ газодинамических процессов и разработка моделей течений в ударной гиперзвуковой аэродинамической трубе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2014. № 1. С. 3–25.
8. Масленников В.Г., Сахаров В.А. Двухдиафрагменная ударная труба Физико-технического института // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 11. С. 88–95.
9. Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И. Исследование акустических характеристик резонатора Гельмгольца // XXVII сессия РАО. 2014. С. 1–7.
10. Лепешкин О.М., Доронин А.С. Теория горения и взрыва: учебное пособие. СПб., 2023. 165 с.
11. Фомин П.А. Физика взрыва и удара: учебное пособие. Новосибирск: СГУГиТ, 2018. 122 с.
12. Знаменский Е.А., Кравцов В.О., Кэрт Б.Э., Михайлов Н.П. Определение параметров воздушной ударной волны: методические указания. СПб., 2018. 27 с.

References:

1. GOST IEC 60079-1-2013. Explosive atmospheres. Part 1. Equipment protection by flameproof enclosures “d” (with Amendment No. 1). Moscow: Standartinform; 2014. (In Russian).
2. Rudenko S.A. Investigation of the pressure-piling effect for adjacent compartments of flameproof enclosures. Collection of Scientific Papers of NIIVE. 2017:146–153. (In Russian).

3. Li D., Dai S., Lin T. Evaluation of the Explosion Pressure Parameters in Flameproof Enclosures under the Pressure Piling Condition. *Energies*. 2021;14:8156.
4. Li D. et al. Numerical Simulation of the Effect of Diaphragm Orifice in a Flameproof Enclosure with an Interconnected Structure during Pressure Piling. *Thermal Science*. 2023;27(2B):1539–1551.
5. Improvement of methods for testing electrical equipment for explosion protection: interim research report. VNIIE; S.S. Geskin, supervisor; N.P. Vlasenko et al., performers. Donetsk; 1972. Inventory No. 13.2675. 75 p. (In Russian).
6. Improvement of methods for testing electrical equipment for explosion protection: final research report. VNIIE; S.S. Geskin, supervisor; N.P. Vlasenko et al., performers. Donetsk; 1974. Inventory No. 13.2675. 122 p. (In Russian).
7. Kuznetsov V.V., Kotov M.A. Analysis of gas-dynamic processes and development of flow models in a hypersonic shock tunnel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2014;(1):3–25. (In Russian).
8. Maslennikov V.G., Sakharov V.A. Double-diaphragm shock tube of the Physico-Technical Institute. *Technical Physics Journal*. 1997;67(11):88–95. (In Russian).
9. Komkin A.I., Mironov M.A., Yudin S.I. Study of acoustic characteristics of a Helmholtz resonator. XXVII Session of the Russian Acoustical Society. 2014:1–7. (In Russian).
10. Lepeshkin O.M., Doronin A.S. *Theory of Combustion and Explosion: textbook*. Saint Petersburg; 2023. 165 p. (In Russian).
11. Fomin P.A. *Physics of Explosion and Impact: textbook*. Novosibirsk: SSUGT; 2018. 122 p. (In Russian).
12. Znamenskiy E.A., Kravtsov V.O., Kert B.E., Mikhailov N.P. Determination of air shock wave parameters: methodological guidelines. Saint Petersburg; 2018. 27 p. (In Russian).