

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Российский химико-технологический  
университет имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи

**Дмитриев Никита Викторович**

**Влияние дисперсных добавок на чувствительность  
высокоэнергетических веществ к удару**

2.6.12 Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н, профессор

Акинин Н.И.

Москва – 2025

## Оглавление

Введение.....	4
2. Литературный обзор .....	11
2.1 История развития изучения чувствительности к удару .....	11
2.2 Современные подходы к изучению чувствительности веществ .....	16
2.3. Свойства используемых веществ .....	24
2.3.1 Октоген.....	24
2.3.2 Алюминий.....	25
2.3.3 Аммиачная селитра .....	33
2.3.4 Компоненты твердых ракетных топлив.....	38
3. Методическая часть .....	41
3.1 Инструментальное обеспечение .....	41
3.2 Обработка экспериментальных данных .....	48
4. Обсуждение результатов .....	56
4.1 Сходимость данных, полученных методом критических давлений и методом определения нижнего предела чувствительности.....	56
4.2 Влияние флегматизирующей добавки на чувствительность смесей окфола-3,5 с горючими добавками.....	74
5. Чувствительность промышленных высокоэнергетических веществ .....	78
5.1 Чувствительность смесей аммиачной селитры с алюминием различной дисперсности .....	79
5.2 Чувствительность составов аммиачной селитры с использованием вторичного алюминия.....	85
6. Чувствительность к удару мощных высокоэнергетических веществ .....	88
6.1 Чувствительность смесей окфола-3,5 с алюминием различной дисперсности .....	88

6.2 Чувствительность смесей окфола-3,5 с оксидами переходных металлов.	98
6.3 Чувствительность смесей окфола-3,5 с углеродными добавками .....	109
6.4 Чувствительность к удару модельных составов твердых ракетных топлив .....	116
Выводы .....	119
Список литературы .....	120
Приложение 1. ....	145
Приложение 2 .....	159
Приложение 3 .....	198
Приложение 4 .....	219
Приложение 5 .....	236
Приложение 6 .....	240

## Введение

### **Актуальность темы работы**

Высокоэнергетические вещества активно используются как в оборонной промышленности, так и в гражданском секторе, прежде всего в горной промышленности и строительстве. При этом активное применение энергонасыщенных веществ непосредственно сопряжено с постоянной опасностью нежелательного срабатывания, которые может привести к крупным чрезвычайным ситуациям. С начала предыдущего века в связи с недостаточной изученностью высокоэнергетических материалов (тротил, октоген и др.) или основных компонентов взрывчатых составов (аммиачная селитра) неоднократно происходили аварии, связанные с производством, хранением, транспортировкой, эксплуатацией и утилизацией веществ. Изучение влияния внешних воздействий стало необходимым для обеспечения безопасности и разработки правил использования энергонасыщенных веществ и материалов. Чувствительность к данным воздействиям является качественным и количественным показателем безопасности веществ и материалов. Чувствительность к удару, как к наиболее распространенному внешнему механическому воздействию, требует особого внимания.

С развитием потребности в получении более эффективных для человеческих потребностей высокоэнергетических материалов стали использовать добавки, в том числе и дисперсные, способные существенно поднять энергетический потенциал основных веществ, среди которых наиболее широкое применение приобрел алюминий, что также привело к увеличению аварий из-за возросшей опасности таких составов. В настоящее время в области промышленных взрывчатых веществ растет доля применения вторичного алюминия, обусловленная экономической выгодой. В качестве модификаторов горения для твердых ракетных топлив активно используются различные углеродные добавки. В качестве новых перспективных модификаторов горения рассматриваются как порошки различных металлов, так и их оксидов. В то же время стоит помнить, что каждая добавка вносит

свой вклад и в чувствительность к удару с учетом присущих ей физико-химических и морфологических свойств.

На сегодняшний день в нормативных документах ООН (рекомендации по перевозке опасных грузов и приложения к ним), Евросоюза (ДОПОГ) указаны требования безопасности для взрывчатых веществ, в том числе чувствительность к механическим воздействиям. В техническом регламенте Таможенного союза 028/2012 «О безопасности взрывчатых веществ и изделий на их основе» в статье 5 говорится о классификации веществ по опасности и требованиях безопасности при транспортировке, производстве и применении веществ. Нормативным документом предписывается вносить в техническую документацию вещества или изделия показатели взрывобезопасности, к которым непосредственно относится чувствительность к удару.

**Степень разработанности темы.** Впервые целенаправленно изучать чувствительность к механическим воздействиям принялись Ф. Боуден и А. Иоффе. Одним из первоначальных суждений являлось мнение о соотношении к каждому энергонасыщенному веществу своя чувствительность к удару, которая может быть количественно определена. Данная оценка и будет считаться мерой опасности вещества при хранении, транспортировке и эксплуатации. В ходе многочисленных экспериментов был выявлен опорный ряд чувствительности, из которого могли быть взяты реперные точки для исследований новых веществ и составов. Данный ряд мог служить мерой проверки адекватности новых предлагаемых методов определения чувствительности к удару: если последовательность веществ не выдерживается, то метод не может считаться пригодным для определения чувствительности.

Помимо накопленных экспериментальных данных ходили мысли о взаимосвязи чувствительности с другими свойствами вещества. Предполагалось, что должна быть зависимость чувствительности с другими характеристиками, что, при ее нахождении, позволило бы производить расчеты, предсказывать чувствительность новых веществ. Проводились

попытки соотнести чувствительность к удару с прочностью химических связей, с теплотой образования и теплотой разложения вещества, но при этом полной картины данные способы не отображали.

Большое влияние на изучение вопроса чувствительности оказали советская и немецкая школы. В своих работах Н.А. Холево, К.К. Андреев, Ю.Б. Харитон, Г.Т. Афанасьев, В.К. Бобылев, А.В. Дубовик развивают теорию, постулирующую что причиной инициирования взрывной реакции являются локальные разогревы, так называемые «горячие точки», размер которых составляет примерно 10–0,1 мкм. В момент прочностного разрушения упругая энергия, находящаяся в испытуемом заряде, преобразуется в работу деформации на разрыве. На поверхности образовавшегося разрыва из-за трения возникает локальный очаг разогрева.

В ходе развития изучения вопросов чувствительности возникло большое количество способов оценивания характеристики. Зачастую в различных методах для оценивания чувствительности к механическим воздействиям используются различные параметры. В своей работе Б.Н. Кондриков проводит анализ существующих отечественных методик определения и приходит к выводу, что результаты в принципе коррелируют между собой.

В настоящее время предлагаются новые экспериментальные методы определения чувствительности к механическим воздействиям. В институте химической физики РАН под руководством А.Н. Пивкиной предложен метод определения чувствительности к удару исходя из энергии, поглощаемой веществом в ходе испытания, а не полной энергии удара.

Индивидуальные вещества широко и досконально изучены всеми возможными способами, в работах Афанасьева, Бобылева, Дубовика можно найти исчерпывающую информацию по мощным высокоэнергетическим материалам, в трудах В.А. Соснина есть подробная информация по безопасности аммиачной селитры разных марок. Однако исследования, направленные на вопросы чувствительности смесевых составов, недостаточно широко освещены.

**Цель:** изучить влияние различных добавок на чувствительность к удару для высокоэнергетических веществ

**Задачи:**

Сравнить результаты исследования чувствительности к удару полученные методом критического давления с методами ГОСТ 4545-88;

Определить влияния размера частиц и способа производства алюминиевого порошка на чувствительность к удару высокоэнергетических веществ;

Изучить влияние микроструктуры аммиачной селитры на ее чувствительность к удару;

Изучить влияние аллотропных модификаций углерода на параметры инициирования смесевых взрывчатых веществ;

Определить чувствительность к удару составов модельного ракетного топлива, в состав которого входят оксиды переходных металлов и алюминий

**Методология и методы исследования:**

В работе использовались методы, описанные в ГОСТ 4545-88, и разработанный в университете химической физики имени Н.Н. Семенова РАН метод критических давлений. Эксперименты проводились на вертикальном копре марки К-44-2, как с применением приборчика с затрудненным истечением вещества (№ 1 по классификации Холево), так и с применением приборчика со свободным истечением вещества (№ 2 по классификации Холево). Приборчик №2 представлен в двух вариациях: стандартный приборчик, представляющий собой железную муфту со специальной канавкой и модифицированный приборчик, где железная муфта заменена на муфту из кальки с целью обеспечения фиксации момента вспышки фотодиодом без существенной задержки, так как время взрыва ориентировочно составляет 150–300 мкс, то задержка фотодиода может являться причиной неточного определения взрыва. Данные о давлении, возникающем при ударе, а также сигнал фотодиода передаются сначала на осциллограф, а в дальнейшем – на персональный компьютер, где обрабатываются в специальной программе.

**Научная новизна.** Экспериментально установлено отсутствие (нивелирование) влияния флегматизирующей составляющей окфола-3,5 на чувствительность к удару смесей на его основе с горючими добавками.

Установлено, что нанодисперсные порошки алюминия оказывают качественно схожее сенсibiliзирующее воздействие, как в смесях «окислитель – горючая добавка», так и в смесях без окислителя.

Впервые определены показатели чувствительности к удару составов промышленных ВВ с добавлением вторично произведенного алюминия марки АГП.

Впервые определено влияние оксидов переходных металлов, рассматриваемых в качестве возможных катализаторов горения, на чувствительность к удару высокоэнергетических веществ.

**Практическая и теоретическая значимость работы.** В настоящее время наблюдается большая востребованность в алюминизированных промышленных высокоэнергетических веществах, а также в использовании мощных высокоэнергетических веществ в гражданской сфере. Сведения о чувствительности к удару высокоэнергетических веществ и составов на их основе способны положительно повлиять на снижение числа и последствий аварий при производстве промышленных и конверсионных взрывчатых веществ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Применимость метода критических давлений для исследования чувствительности к удару на основании высокого показателя корреляции пересчета нижнего предела чувствительности к удару по ГОСТ 4545-88 с результатами экспериментальных исследований методом критических давлений;
2. Результаты исследования влияния дисперсности алюминиевых добавок на чувствительность к удару взрывчатых смесей.

3. Результаты исследования влияния микроструктурных особенностей аммиачной селитры на чувствительность к удару промышленных взрывчатых составов на ее основе.

4. Результаты исследования влияния оксидов переходных металлов как модификаторов горения на чувствительность к удару высокоэнергетических веществ.

5. Результаты исследования влияния добавок высокоэнергетических веществ на чувствительность к удару модельных составов ракетных топлив.

**Достоверность результатов** обеспечивалась четкой постановкой исследовательских задач, тщательным планированием экспериментов, использованием адекватных целям и задачам исследования надежных методов и методик и современных средств обработки полученных данных. Для проверки каждого из выделенных положений применялся критерий научности Поппера, также каждый постулат выдвигался на основе применения не менее двух методик.

#### **Личный вклад автора**

Участие автора состоит в литературном поиске и анализе литературных источников. Автором собственноручно получена основная часть экспериментальных данных, проведена их необходимая обработка, подготовка публикаций. Обсуждение результатов и написание научных публикаций проведено автором при участии научного руководителя

#### **Апробация работы:**

Полученные данные докладывались и обсуждались на международных конференциях и конгрессах: III, V, VI, Международных научно-практических конференциях молодых ученых по проблемам техносферной безопасности (г. Москва, 2018, 2022, 2024 гг.); Europyro – 44th International Pyrotechnics Society Seminar (Франция, 2019 г.); 23rd Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials (Чехия, 2020 г.); XXIII Международной научно-практической конференции по взрывному и горному делу (г. Москва, 2023 г.); XIX

Международном конгрессе молодых ученых по химии и химической технологии (г. Москва, 2023 г.).

**Публикации:**

Непосредственно по теме диссертационной работы опубликовано 12 работ. Основные положения диссертации получили полное отражение в 4 публикациях в рецензируемых изданиях, в том числе в 3 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus, Chemical Abstracts, GeoRef. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня: опубликовано 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

**Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, методической части, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов и списка литературы. Работа изложена на 240 страницах, содержит 137 рисунка и 129 таблиц. Список литературы включает 216 источников.

## 2. Литературный обзор

### 2.1 История развития изучения чувствительности к удару

Чувствительность к удару и к трению по природе начального импульса являются практически однородными. Отличия заключаются в направлении внешнего воздействия: при ударе он направлен перпендикулярно поверхности, в то время как при трении происходит воздействие под углом. В связи со схожестью данных видов чувствительности принято их обобщенно называть чувствительностью к механическим воздействиям.

По статистике, установленной исходя из анализа чрезвычайных ситуаций и инцидентов на производстве энергонасыщенных материалах первопричиной возникновения аварий в большинстве случаев являются механические воздействия [15]. При этом порядка 15-30% аварий вызваны недостаточной изученностью процесса.

Одними из первых целенаправленно изучать чувствительность к механическим воздействиям принялись Ф. Боуден и А. Иоффе. [16] Однако их внимание было сосредоточено в основном на жидких веществах и не давало ответ на вопросы об иницировании взрыва при помощи удара. Изучение природы и закономерностей продолжалось и далее.

Одним из первоначальных суждений являлось мнение о соотношении к каждому энергонасыщенному веществу своя чувствительность к удару, которая может быть количественно определена. Данная оценка и будет считаться мерой опасности вещества при хранении, транспортировке и эксплуатации.

Исходя из практических данных о чувствительности к удару наиболее распространенных веществ удалось создать «опорный ряд чувствительности» состоящий по возрастанию из следующих веществ: тротил, тетрил, гексоген, тэн, тетразен, ТНРС, азид свинца, гремучая ртуть. Данный ряд мог помочь, как дать ориентировочную, понятную для других, оценку чувствительности, так и проверить ново вводимую методику определения чувствительности. Если

последовательность веществ не выдерживается, то метод не может считать пригодным для определения чувствительности. Однако делать вывод о том, что метод рабочий, опираясь только на совпадение с опорным рядом, не является вполне корректным.

Помимо накопленных экспериментальных данных ходили мысли о взаимосвязи чувствительности с другими свойствами вещества. Предполагалось, что должна быть зависимость чувствительности с другими характеристиками, что, при ее нахождении, позволило бы производить расчеты, предсказывать чувствительность новых веществ, выстраивать стройные теории чувствительности и иметь рычаги к ее уменьшению (флегматизации) или увеличению (сенсбилизации). Проводились попытки соотнести чувствительность к удару с прочностью химических связей [17], с теплотой образования и теплотой разложения вещества [18], но при этом полной картины данные способы не отображали.

Поскольку теоретический поиск зависимостей на первоначальном этапе не увенчался успехом, то взор был направлен на установление лабораторных методов чувствительности, которые могли моделировать практические задачи. Данный метод позволил бы на практике менять условия эксперимента, что таким образом позволило бы выявить какую-либо закономерность между чувствительностью веществ и параметрами их состояния.

С данной целью были разработаны многочисленные приборы по определению чувствительности к удару, отличающиеся друг от друга по геометрии, размеру, способу распределения удара по поверхности вещества, по степени зажатости вещества. Основная проблема, что ряды чувствительности, получаемые при применении того или иного метода, не согласовывались между собой и частично не соответствовали опорному ряду чувствительности, что ставило под вопрос их применимость. Стоит отметить, опорный ряд строился исходя из усреднения данных, полученных по различным методам. Соответственно само понятие к механическим воздействиям представляется комплексным, которое невозможно описать

одной количественной величиной, а требуется целый ряд испытаний, отличающихся друг от друга условиями проведения. Первопроходцами в определении чувствительности к механическим воздействиям и построению фундамента являются труды советских ученых: Холево [19,20], Андреева [21-23], а также американцев Кистяковского и Конора [24] и немцев Кенена, Иде и Хаупта [25].

Возникновение взрыва при механическом воздействии довольно сложный процесс. Механизм возбуждения взрывной реакции может различаться в зависимости от структуры вещества, условий деформирования вещества под нагрузкой и вида нагрузки. Согласно современным мнениям, в любом случае механизм возбуждения имеет очаговый характер и неразрывно связан со сдвиговыми процессами, которые сопутствуют динамическому напряжению. Происходило понимание данного процесса постепенно. Сперва Рябинин установил, что под давлением 4,5 ГПа скорость термического распада практически не изменяется по сравнению с нормальными условиями. [26,27]. После П. В. Бриджмен производил исследования, согласно которым энергонасыщенные вещества могут выдержать статическую нагрузку до 10 ГПа, но при воздействии динамической нагрузки взрывается гораздо легче. [28]

В очаговом механизме инициирования выделяют минимум две стадии: возникновение интенсивных очагов разогрева вещества и последующее развитие взрыва из одного или нескольких очагов. Считается, что развитие взрыва протекает через горение, которое перерастает в детонацию. Критические размеры таких очагов, получивших название «горячих точек», составляют примерно  $10^{-5}$  -  $10^7$  м. [29]

Хотя большинство ученых придерживается данной теории инициирования. Существует мнение, что инициирование взрыва происходит благодаря механической сдвиговой деформации кристаллической решетки и последующей активацией молекул подвергаемых механическому воздействию веществ. [30] Важным фактором считают одновременность

деформации решетки или разрыв связей, без которых может не хватить высвобождаемой энергии для возбуждения взрыва. Некоторые ученые связывают расположение «горячих точек» с месторасположением линейных дефектов кристаллов взрывчатых веществ, а сами критические разогревы – с высвобождением свободной энергии при уничтожении некоторых дефектов на плоскости скольжения.

Основой теории теплового инициирования являются представления о возникновении локальных очагов разогрева на неоднородности вещества. Впервые выдвинул подобную теорию Ю. Б. Харитон [31]. В зависимости от структуры энергонасыщенных веществ уточняется конкретный механизм инициирования. В жидких взрывчатых веществах очаги разогрева возникают вследствие адиабатического сжатия пузырьков воздуха или паров самого вещества, которые находятся в жидкости. Возможно, что при механическом воздействии возникает кавитация жидкости, [32] в связи с чем схлопываются полости и образуются очаги. В пластичных энергонасыщенных веществах с высокой вязкостью возникновение очагов происходит по итогам вязкого течения, которое сопровождается саморазупрочнением под влиянием теплоты и нагрузки. В твердых энергонасыщенных веществах процесс образования очагов разогрева связан с сухим трением или вязким разогревом на плоскостях скольжения, которые возникают в уплотненной массе вещества во время динамических нагрузок. [33]

В. К. Бобылев и Г. Т. Афанасьев [34] считают, что разогрев твердых энергонасыщенных веществ во время удара образуется за счет прочностного разрушения заряда. Первым протекает изотермическая упругая, а после пластическая деформация заряда. Касательные напряжения вызывают разрушение и выброс части вещества из области сжатия, из-за чего происходит резкий спад давления.

В момент прочностного разрушения упругая энергия, находящаяся в испытуемом заряде, преобразуется в работу деформации на разрыве. На поверхности образовавшегося разрыва из-за трения возникает локальный очаг

разогрева, температура которого имеет границу в виде температуры плавления ВВ при соответствующем давлении. Взрыв возникает в случае, если температура достигает критического значения.

Сравнивая значения критических температур веществ с их температурой плавления можно сделать вывод о том, что при нормальном давлении температура плавления ниже, чем критическая. При этом  $T_{пл}$  является определенным ограничителем максимально возможной степени разогрева вещества во время механического воздействия определенного вида. Поэтому для возникновения в очаге взрыва давление должно иметь определенное критическое значение, при котором температура плавления становится не ниже критической температуры. Данное условие приобрело название условия критических напряжений.

Средние значения давления, при котором происходит взрывное разрушение образцов, можно с высокой точностью описать зависимостью:

$$p_{пр} = \sigma_{пр} * \left(1 + \frac{d}{3*\sqrt{3}h}\right), \quad (1)$$

Где  $p_{пр}$  – среднее предельное давление разрушения образца,  $\sigma_{пр}$  – предел прочности ВВ во время сжатия;  $d$  и  $h$  – диаметр и толщина исследуемого заряда. В. К. Боболев и Г. Т. Афанасьев дали название этой зависимости: критическое условия прочности. При  $p_{пр}$  меньше критического давления, то взрыв не может произойти, поскольку температура плавления в таком случае меньше критического значения, и температура разогрева не может превысить значение  $T_{пл}$ . В противоположном случае значение давления выше критического, из-за чего температура плавления больше критической температуры, а, следовательно, разогрев может достигнуть необходимой величины для возбуждения взрыва.

Итогом различных школ послужило появление многообразных методик определения чувствительности к механическим воздействиям. В работе [35] Б.Н. Кондриков оценил отечественные методы определения чувствительности, которые отличались друг от друга инструментами,

навесками веществ и параметрами чувствительности к удару, среди которых основными можно выделить высоту нижнего предела чувствительности, частоту взрывов, энергию удара, необходимая для инициирования исследуемого заряда, и давления прижатия. Рассмотренные в 12 методиках показатели чувствительности к удару и трению коррелируют между собой и хорошо связаны с величиной критического давления, не зависимо от способа получения данных.

## 2.2 Современные подходы к изучению чувствительности веществ

В конце XX и на протяжении всего XXI века с учетом сильного скачка в развитие вычислительных способностей компьютерной техники и накоплению значительного багажа экспериментальных данных по всем возможным методам определения чувствительности к удару вновь происходили попытки нахождения закономерностей и попыток выстроить широко применимые методы расчета чувствительности к удару, которые согласовывались бы для веществ различного строения и характеристик.

Измерения чувствительности к удару могут быть получены либо на основе первой реакции разложения, либо путем обнаружения звука [36-39]. Неудивительно, что эти два различных метода приводят к разным значениям чувствительности к удару, и оба они встречаются в литературе, часто без упоминания происхождения измерений. Независимо от используемого метода, эти две группы результатов показывают связь с молекулярно-структурными параметрами [35-37, 39], и связь между обеими группами была описана и интерпретирована [38]. Наиболее серьезные данные, основанные на измерениях обнаружения звука (по методу Брюсетона), получены в Лос-Аламосской национальной лаборатории [40] и/или в Центре надводного вооружения ВМС [41-43]. Для научных целей были выбраны опубликованные результаты по чувствительности к удару и результаты, полученные на основе их корреляции с химическими сдвигами ЯМР тех атомов, которые несут наиболее реакционноспособную нитрогруппу в молекуле [36-38]. В случае

нитраминов использовались сдвиги  $^{15}\text{N}$  атомов азота [36, 37, 40, 47], Используя этот тип отношений, можно уточнить реакционные центры инициирования и в полинитросоединениях [36-38,40, 46].

Что касается развития и рационализации научных исследований, то за последние 30 лет в литературе было опубликовано множество прогностических методов для чувствительности к удару [36,47]. Обзор разработок в этой области до 2008 года приведен в обзоре Кешаварза [47], который также недавно разработал относительно сложные полулогарифмические зависимости с не менее чем шестью ограничениями, основанные на данных для около 86 различных полинитросоединений [48], но результаты не очень хорошо согласуются с экспериментально полученными значениями. В другом исследовании [49] тот же автор, отталкиваясь от элементного состава ЭМ, вывел положительные и отрицательные молекулярные связи для увеличения и уменьшения функции ядра для предсказания чувствительности к удару и построил полулогарифмическую зависимость, основываясь на данных по чувствительности к удару для 90 различных полинитросоединений. В другом исследовании [50] Кешаварз и др. представляют новую компьютерную программу для предсказания чувствительности к удару, и обе эти работы [49,50] в определенной степени представляют собой статистический подход. Лаи и другие. представляют [51] аналогичное решение для предсказания чувствительности к удару с их корреляциями, начиная с количества атомов С, Н, N, О в 196 соединениях, и другими поправочными факторами, которые определяются влиянием соединительных позиций групп на чувствительность к удару. Лаи разделил эту группу на шесть подгрупп с соответствующими относительно сложными уравнениями и заявил, что его подход дает лучшие результаты, чем уравнения Кешаварца (см. обзор [47]). Для предсказания чувствительности к удару Ванг и др. [52] использовали модель QSPR с описанием молекулярной структуры 156 нитросоединений путем объединения электронных и топологических характеристик (подход ETSI) анализируемых молекул. Однако, как было

отмечено в [36], из-за смешанных данных по очень разным структурам (ароматическим и алифатическим с группировками C-NO<sub>2</sub> и N-NO<sub>2</sub>) их предсказания в лучшем случае являются лишь ориентировочными. Используя 3D дескрипторы для всего набора из 156 структурно различных энергетических соединений и применяя множественную линейную регрессию в своем исследовании QSPR, Ксу и его коллеги. [53] пришли к мнению, что их нелинейная модель (построенная с помощью ANN) может быть использована для оценки чувствительности к удару для новых ЭМ. Эти подходы QSPR, в целом, не позволяют оценить химическую физику инициирования. Относительно большое число публикаций посвящено корреляциям, в которых участвуют квантово-химические величины [36, 47, 54-58]. Так, метод B3P86/6-31G\*\* был использован Цао [59] для прогнозирования эффективности и чувствительности к воздействию гипотетических динитраминобензолов, который включал в расчет как чистый заряд нитрогрупп, так и кислородный баланс изучаемых соединений. Автор сравнивает свои результаты с результатами, полученными в рамках подхода Политцера и других [60,61], и ограничивается заявлением, что разница здесь необъяснима. На той же основе Жанг и Гонг [62] рассчитали электронную плотность в критических точках связи N-O для 33 конкретных полинитросоединений, и результаты коррелировали с данными по чувствительности к удару - однако они не нашли никакой связи, а только наметили тенденцию. Аталар и др. [63] рассчитали энергии диссоциации связей, BDE, самых слабых связей N-N для 14 нитраминов с помощью методов UB3LYP/6-31G\* и UB3LYP/6-31+G\*\*//PM3. Обнаруженные зависимости между значениями BDE и логарифмами чувствительности к удару для этих нитраминов, выраженные как энергия падения,  $E_{dr}$ , не являются однозначными, поскольку существуют три индивидуальные зависимости, соответствующие структурно близким подгруппам изученных нитраминов [63]. Последние работы Политцера и др. [57 59,60, 63-68] представляют собой наиболее сложное на сегодняшний день решение проблемы чувствительности, основанное, прежде всего, на

поверхностных электростатических потенциалах. Эти потенциалы могут служить основной детерминантой всех молекулярных свойств [66,68]. Помимо электростатических потенциалов, с чувствительностью связаны и другие характеристики, такие как аминозаместители, слоистая кристаллическая решетка, свободное пространство в кристаллической решетке, слабая триггерная связь и соотношение N/C в молекулярном каркасе [66,68]. Уже в работе [36] было отмечено, что экситонная модель инициирования Кукльи согласуется с экспериментальными данными, полученными при исследовании низкотемпературного распада полинитросоединений. Кукльи опубликовал обширную работу [70]. С помощью квантово-химического моделирования и симуляции меж- и внутримолекулярных взаимодействий она изучила их влияние на более ранние химические распады, их связь со структурными и электронными дефектами и деформациями – все это в контексте инициирования ЭМ и экспериментальных данных. В связи с межмолекулярными взаимодействиями уместно упомянуть работу Ма и других. [71], из которой следует, что планарная сопряженная молекулярная структура и межмолекулярные водородные связи, поддерживающие  $\pi$ - $\pi$  скопления, необходимы для кристаллической инженерии низкочувствительных высокоэнергетических взрывчатых веществ. Кроме того, они обнаружили, что в большинстве существующих малочувствительных к удару ЭМ доминирующими межмолекулярными взаимодействиями являются O---O взаимодействия. Чжу и Сяо провели обзор недавних исследований по предсказанию чувствительности к ударам для различных классов энергетических кристаллов на основе первопринципного метода полосовой щели, который был разработан для измерения чувствительности к ударам для ряда энергетических кристаллов [71]. Чем меньше полоса пропускания, тем легче происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости, а затем тем легче происходит разложение или взрыв. Первопринципный критерий полосы пропускания применим к различным сериям энергичных кристаллов со схожей структурой

или со схожим механизмом термического разложения [72]. Эти структурные и термоаналитические сходства очень важны, но они недостаточно учитывались в перечисленных выше подходах, и их значение будет показано далее. Подход Чжана [73], основанный на наибольших зарядах Малликена нитрогрупп в молекулах полинитросоединений, относительно хорошо известен. Однако, в понимании Чжана, эти заряды имеют криволинейную зависимость от чувствительности к удару, показывая, возможно, лишь тенденцию, в основном в результате того, что не учитывается структурное сходство изучаемых соединений. С другой стороны, использование того же подхода для девяти "настоящих" высокотермостабильных полинитроаренов приводит к двум линейным зависимостям [74]. Отсутствие структурного сходства, а также выбор неподходящих данных при исследовании связи между чувствительностью к удару и сжимаемостью кристаллической решетки в нитраминах [65] приводит к другим выводам по сравнению с тем, когда в группу анализируемых нитраминов включено значение  $E_{dr}$  для чистого e-HNIW (e-2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовуртцитан) [75]. Таким образом, связь между значениями  $E_{dr}$  и свободным объемом кристаллической решетки,  $DV$ , однозначно не определена [75]. Включение в этот анализ объемных (K) и сдвиговых (G) модулей изученных нитраминов и их АТС привело к обнаружению [75] относительно тесной линейной корреляции между коэффициентами  $K \cdot G^{-1}$  и чувствительностью к ударам. Интересный подход к определению чувствительности к ударам был опубликован Мэтью [76]. Он описал приблизительные зависимости между индексом ударной чувствительности, SI, и ударной чувствительностью,  $h_{50}$ , для 156 различных полинитросоединений. Индекс SI определяется уравнением (2):

$$SI = \frac{ND_{min}}{\Delta dH_0} \quad (2)$$

где  $N$  - соответствующее число атомов, а  $\Delta H_0$  - теплота реакции. Эта зависимость не является однозначной и может быть разбита на четыре подгруппы (по-видимому, на основе структурного сходства ЭМ). В другой работе Мэтью использовал константу скорости,  $k_{pr}$ , уже выведенную в его работе [77] для экзотермической реакции, которая выражается как сумма вкладов от различных эксплозифоров  $i$ , потенциально связанных с инициацией [78]:

$$k_{pr} = \frac{1}{Na} \sum Z_i * e^{-\frac{E_i^+}{k_B T_e}} \quad (3)$$

где  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $NA$  - число атомов на молекулу,  $T_e$  - температура активации процесса,  $E_i^+$  энергия активации, а  $Z_i$  - предэкспонента [77,78]. Между значениями  $k_{pr}$  и чувствительностью к удару,  $h_{50}$ , Мэтью обнаружил [77] относительно приличную логарифмическую зависимость. Следуя этой работе [77], Мэтью и Алаиме вывели [78] для высоты удара  $h_{50}$  выражение:

$$h_{50} = \left( \frac{k_c}{k_{pr}} \right)^4 \quad (4)$$

где  $k_c$  - эмпирическая постоянная. Авторы утверждают [78], что по сравнению с предыдущими подходами их метод является более полным и демонстрирует хорошую предсказательную ценность.

В работе [40] указывается на известный факт. В [40] отмечается хорошо известный факт, что чувствительность к удару энергетических материалов зависит, в общем, от качества и гранулометрии кристаллов. Это было продемонстрировано на примере HNIW, для которого требуются особые условия получения кристаллов RS-класса, обеспечивающие идеальное размещение молекул в кристаллической решетке во время кристаллизации (см., например, [75] и цитаты из нее). Однако большинство нитраминов (например) при кристаллизации из простой "мензурки" в лаборатории дают продукты, чувствительность к удару которых соответствует опубликованным данным (т.е. данным NSWC и LLNL [41-43]). В работе [40] была предпринята

попытка найти чувствительность к удару. [40] попытался найти ответ на это наблюдение и заявил, что следует обратить внимание на зависимость ударной чувствительности от конкретных поверхностей кристаллов из образца данного индивидуального энергетического материала, полученного путем отсева.

Не отстают от западных коллег и отечественные ученые, которые рассматривают как более традиционные подходы к вопросам чувствительности, так и ищут ответы при помощи постоянно улучшающихся компьютерных методов. Весомый вклад в теоретические расчеты внес А.В. Дубовик. В своих работах он не только развил идеи своих предшественников [79], но и предлагал свой взгляд на теоретическое обоснование чувствительности к удару. Дубовик подходил больше с физической стороны вопросы и обращал внимание больше на передачу энергии от частицы к частице, но при этом и не исключал влияние химизма. Ученым разработана теоретическая модель фрикционного разогрева частиц в смесях энергонасыщенных материалов с твердыми добавками, способных сенсibilизировать составы. [79-81]

Помимо Дубовика предлагают методы определения чувствительности к удару и другие видные современные отечественные ученые. В своих работах А.Н. Пивкина и коллеги [82, 83] всесторонне рассматривают преобразование энергии при копровых испытаниях. Ученые выявили существенное влияние технического состояния копра и необходимости своевременного технического обслуживания. При этом в ходе испытаний с более чем 100 высокоэнергетическими веществами выяснилось, что только 50-75 % полной энергии удара передается образцу, а поглощается всего лишь от 13 до 28 процентов, что ставит вопрос об адекватности использования полной величины энергии удара как показатель чувствительности к удару. Авторы считают, что правильнее использовать передаваемую и поглощаемую энергию для оценки чувствительности веществ.

Проводятся российскими учеными и методы прогнозирования при помощи квантохимическими расчетами с использованием современного

программного оборудования. Белик [84, 85] являлся одним из первых, кто пробовал применить расчетные квантохимические методы и сумел найти определенную закономерность между чувствительностью к удару веществ и их геометрическим строением молекулы. Бадретдинова и Анисимов изучали на основании полученных данных о чувствительности (в основном использовался такой показатель как  $h_{50}$ ) применяли полуэмпирические методы пакетного модуля AM1 [86-89] для различного ряда соединений: полинитросоединения [86], нитропиридинов совместно с их бензольными аналогами [87] и исследовали возможность использования кластерных моделей на основе уже известных индивидуальных энергонасыщенных материалов (октоген, тротил, гексоген и другие) [88]. Расчеты проявили хорошую сходимость с полученными экспериментальными данными, что говорит о возможности применения метода расчета.

При всем накоплении знаний о чувствительности к удару, как наработанных за счет экспериментальных данных, так и постоянное накапливание теоретических знаний, в том числе и при помощи компьютерных методов, не дали определенного ответа, от чего именно зависит чувствительность к удару, на какие параметры веществ и их смесей необходимо обращать внимание, чтобы с хорошей точностью предсказывать чувствительность к ударному воздействию.

## 2.3. Свойства используемых веществ

### 2.3.1 Октоген

Октоген ((CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>N<sub>4</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>4</sub>) – термостойкое бризантное взрывчатое вещество. Порошок белого цвета, ядовит. Имеет форму крупных прозрачных кристаллов ромбической формы при получении путем кристаллизации из ацетона. Температура плавления – 276-277 °С, наблюдается разложение при плавлении. Температура вспышки – 330 °С, плотность – 1,9 г/см<sup>3</sup>.

Октоген не растворим в таких органических растворителях как: метиловый спирт, этиловый спирт, бензол, толуол, ксилол, серный эфире. Растворимость в воде крайне невысокая при 15-20 °С – 0,0003%, при 100 °С – 0,02%. [90]

Октоген обладает высокой чувствительностью к удару, расширение в бомбе Трауця составляет 415 мл, объем газообразных продуктов взрыва 782 л/кг. Тротильный эквивалент равен 1,6, скорость детонации при плотности 1,84 г/см<sup>3</sup> составляет 9100 м/с, теплота взрыва равняется 5,73 МДж/кг. [34]

Широко используется термостойкость октогена. В США его используют при 210 °С, в Европе – при 220 °С. Применяют октоген в горном деле для бурения глубинных скважин и других взрывных работах. Октоген применяют для получения клейких взрывчатых составов, предназначенных для взрывной обработке металлов, водонаполненных ВВ, желатинированных ВВ, работающих при температурах ниже 65 °С и композиций с нитроцеллюлозой.

В военной промышленности октоген используется как самостоятельно, так и в смеси с тротилом, является компонентом высокоэнергетического пороха, взрывчатого состава для снаряжения противотанковых ракет, высокобризантных взрывчатых смесей.

Октоген является одним из компонентов высокоэнергетического пороха, который используется в боеприпасах малокалиберного огнестрельного

оружия. Данный порох имеет состав 90% смеси октогена и 10% полиизобутилена, являющимся полимерным горючим. [91]

Флегматизатором октогена используются фторполимеры (сополимеры винилиденфторида и гексафторпропилена), снижающие его чувствительность к удару. Полученное вещество получило название окфол. Наиболее распространены виды окфол-3,5 и окфол-5,5, где цифры обозначают массовый процент содержания флегматизирующей добавки.

Рассматривается возможность применение октогена в дымообразующих составах, для изготовления детонирующих зарядов и инициирования ракет за счет лучшей чем у тэна вакуумной способности. Октоген в составах с другими веществами (тротил, гексоген) используется для изготовления детонационного шнура, шашки детонатора или бустера. [92-94].

### 2.3.2 Алюминий

Алюминий – это горючий металл. Теплота сгорания алюминия равняется 31087 кДж/кг. В промышленности особо опасна алюминиевая пудра, находящаяся как во взвешенном, так и в насыпном состоянии. Температура воспламенения алюминия в состоянии аэрозоля 540 °С (взрывоопасна), в состоянии аэрогеля – 320 °С, температура самовоспламенения – 520 °С, температура тления составляет 410 °С (пожароопасна). НКПР аэрозоля – 40 г/м<sup>3</sup>. Максимальное давление взрыва составляет 1,3 МПа. [95]

Мелкодисперсный алюминий – аэрозоль преимущественно фиброгенного действия, ПДК рабочей зоны – 2 мг/м<sup>3</sup>, класс опасности – 3. Работа с алюминиевой пылью долгое время без СИЗ может привести к фибронизированию и алюминозу легких. [96]

Алюминий сферический дисперсный (АСД) был изобретен в области порошковой металлургии, как порошок с повышенными физико-химическими свойствами. Используется в качестве компонента в ракетных топливах, пиротехнике, энергетике, электротехнике, химии и других областях.

Наибольший интерес представляют мелкодисперсные порошки, с размером частиц до 30 мкм. Данные марки АСД распылением расплавов сжатым газом (азотом), содержащим кислород лишь для того, чтобы на поверхности образовалась тонкая оксидная пленка, воспрепятствующая возгоранию при соприкосновении с оксидом воздуха.

Свое распространение данные порошки нашли в топливных составах, за счет полноты сгорания, уменьшения двухфазных потерь и улучшения физико-химических характеристик ракетных топлив.

АСД-4 имеет размер частиц от 5 до 7 мкм, удельную поверхность от 0,4 до 0,6 м<sup>2</sup>/г при содержании чистого Al не менее 98%, размеры частиц АСД-1 составляют приблизительно 15 мкм, удельная поверхность 0,15-0,18 м<sup>2</sup>/г, содержание алюминия – 99%.

Наноразмерный алюминий (НРА) благодаря большей площади удельной поверхности может обеспечить некоторые преимущества, которые не способны обеспечить микроразмерные порошки. [97]

Проводилось сравнение термических свойства НРА марки ALEX с промышленными порошками алюминия при их нагреве в атмосферах воздуха, чистого кислорода и чистого азота. Порошок ALEX вступал в экзотермическую реакцию при 660 °С, что ниже температуры плавления алюминия. В тех же условиях порошок с размером частиц 20 микрон не вступает в реакцию с кислородом, азотом или воздухом до температуры 1000 °С. Различие также наблюдается в скорости воспламенения. Для НРА задержка возгорания всего 3 микросекунды, а для алюминиевого порошка с усредненным диаметром частиц 3 мкм – 600 мкс.

При изучении возможности применения порошка ALEX во взрывчатых веществах было выяснено, что использование наноразмерного алюминия может снижать критический диаметр энергонасыщенных веществ эффективнее, чем микронный алюминиевый порошок (при использовании наноразмерного алюминия в тритонале критический диаметр снизился на 10 мм по сравнению с составом, в котором использовался более крупный

алюминий). Наблюдается также увеличение метательной основы взрывчатых составов, но при этом скорость детонации снижается при сравнении с аналогичными составами с применением микроразмерного алюминия [98].

Существуют несколько методов производства наноразмерных порошков алюминия. По своей природе они могут быть как физические, так и химические. Каждый из них имеет ряд преимуществ и недостатков. Производство наночастиц алюминия ориентируется на физические способы производства, среди которых можно выделить способ получения НРА методом испарения исходного материала на ускорителе электронов с последующим охлаждением высокотемпературного пара, конденсацией вещества в очень малых частицах, которые в дальнейшем становятся наноразмерным порошком [99], метод с электрическим взрывом проводника [100], который позволяет получить НРА с повышенной активностью частиц, метод получения с применением наносекундного неодимового лазера, который позволяет получить сферические полые частицы, в состав которых входит большое содержание инкапсулированного водорода [101].

Химический состав порошка ALEX состоит из активного алюминия (90%), оксида алюминия (9%) и адсорбированных газов (1%).

Насыпная площадь порошка составляет 1-1,2 г/см<sup>3</sup>, точка плавления порошка – 640 °С. Размер частиц неоднороден в связи с погрешностями во время эксперимента: среднеарифметический размер частиц приблизительно равен 113 нм, средний размер по поверхности равен 136 нм, усредненный массовый размер - около 160 нм.

При применении электронной микроскопии можно отметить большое количество кристаллических дефектов.

НРА вступает в химическую реакцию с водой уже при 50 °С с выделением водорода. Активно вступает в экзотермические реакции с жидкостями, в состав которых входит кислород, а также с

галогенсодержащими органическими соединениями и другими окислителями. Воспламеняется в сухом воздухе при температуре порядка 300 °С.

Для организма человека может быть опасен. Рекомендуемая ПДК — 0,1 мг/м<sup>3</sup>, при попадании частиц порошка в легкие может вызвать пневмокониоз, при попадании на слизистую глаза – некроз.

Конденсированные взрывчатые вещества (ВВ) с металлической добавкой занимают важное место среди смесевых взрывчатых веществ. Интерес к таким составам вызван возможностью увеличения метательных характеристик ВВ. смеси ВВ с металлом представляют интерес, так как они являются примером неидеальной детонации. Для подобных составов взаимодействие между компонентами может продолжаться в фазе сильного расширения продуктов. В связи с этим необходимо знать время взаимодействия и механизм инициирования взрыва. На сегодняшний день нет точно определённого механизма и существует несколько точек зрения на данный вопрос. (см. [102–115] и библиографию в них). Большинство исследователей склоняется к тому, что реакция происходит в фазе сильного расширения продуктов детонации. Подтверждением этой точки зрения служит положительный эффект использования смеси в экспериментах по метанию пластин. Улучшение метательных свойств смесевых составов отмечается при большом времени наблюдения, спустя несколько микросекунд после прохождения детонационного фронта [109, 110]. В то же время, так как нельзя точно утверждать о протекании реакции, нет ясности в природе этого явления. Предположительно, например, что алюминий выступает в роли катализатора или меняет ход реакции. Некоторые исследователи утверждают, что алюминий реагирует (по крайней мере, частично) в зоне химической реакции ВВ. Непосредственное увеличение скорости или давления детонации отмечается в незначительном количестве [102, 111, 113]. Как правило, металлическая добавка снижает основные детонационные параметры. Опытные данные сопоставляют с результатами расчетов параметров смеси в предположении различного механизма влияния добавки для анализа. Такой

подход не универсален в силу слабого влияния реакции добавки на измеряемые параметры и невозможности однозначно описать состояния продуктов детонации. Неудивительно поэтому, что оценки степени окисления металла в зоне химической реакции ВВ дали существенно различающиеся значения.

На сегодняшней день наиболее перспективным является создание смесевых ВВ и твердых ракетных топлив, в состав которых входят ультрадисперсные энергоемкие компоненты, способных в процессе реакций горения и взрыва выделять большое количество тепла. Изучается большое количество веществ в этой сфере, в том числе и наноразмерный алюминий (НРА). В первую очередь изучаются метательная способность, скорость детонации, количество выделяемого тепла. Так как работа с ультрадисперсными веществами началась активно вестись относительно недавно, то большое внимание необходимо уделять чувствительности смесей. В работах В. А. Теселкина [116,117] изучались чувствительности смесей НРА с ВВ. Для изучения был выбран метод разрушающейся оболочки (РО). Суть метода описана в работах Афанасьева, Боболева [118] и Щетинина [119].

В работе Теселкина использовались порошки алюминия с размерами частиц 7 мкм (АСД-4), 0,1 и 0,03 мкм (НРА). В результате экспериментов была построена зависимость критического давления инициирования от содержания алюминия в смеси. Исходя из этой зависимости Теселкин, делает вывод, что существенное возрастание чувствительности при использовании НРА связано с тем, что уменьшение размера частиц алюминия способствует к увеличению эффективной площади контакта между ВВ и алюминием. В данном случае В. А. Теселкин утверждает, что основным механизмом инициирования является химическая реакция между продуктами распада ВВ с активным алюминием в очагах разогрева, в которой ВВ выступает в качестве окислителя, а алюминий – горючее. Однако не проводился анализ продуктов реакции и нет подтверждения протекания реакции между продуктами разложения ВВ и Al.

Порошки наноразмерного алюминия содержат большое количество оксидной пленки, которое может превышать 10% при заводском производстве. Для получения более активного алюминия во время производства порошка еще до контакта с воздухом производят покрытия пассивирующими порошками. Теселкин оценил их влияние на чувствительность смесей наноразмерного алюминия с энергонасыщенными материалами. Из-за меньшей прочности используемых покрытий по сравнению с оксидом алюминия, покрывающего порошок при контакте с воздухом, наблюдается увеличение чувствительности по сравнению с порошками, которые не содержат данные покрытия [120].

С. Д. Гилев и В. Ф. Анисичкин в своей работе [121] использовали метод электропроводности, объясняя тем, что электропроводность зависит от электрических свойств отдельных компонентов и наблюдая за изменением электропроводности смеси можно наблюдать протекание реакции. Также ставились цели определения продуктов реакции алюмосодержащих взрывчатых веществ. Для этого проводились эксперименты в герметичной взрывной капсуле, предварительно прокачанную азотом. После эксперимента шихта (твердые остатки) собиралась со стенок камеры и изучалась под микроскопом. В продуктах реакции смеси октоген/алюминий были обнаружены частицы различной формы (чешуйчатая, сферическая) и размеров. Для определения наличия оксида алюминия шихта растворялась в сильных кислотах (смесь азотной и серной, хлорная кислота), которые растворяют алюминий, но не реагирует с более стойкими твердыми веществами (оксид алюминия). Сделанные до и после обработки микрофотографии дают основание утверждать то, что оксид алюминия образовался в небольших количествах и лишь поверхностно, так как после растворения в кислотах частицы оказались полыми внутри, что свидетельствует о том, что алюминий внутри не вступил в химическую реакцию во время взрыва.

П.Г. Тамбиев, Е. А. Петров и В. П. Удовиченко в своей работе [122] изучали полноту химической реакции и характеристики продуктов взрыва

алюминизированных смесей. Для своих экспериментов ученые использовали различные ВВ и алюминий марки ПП-2Л. Опыты проводились во взрывной камере при различных условиях (вакуум; азот) и анализировали продукты реакции при помощи микрофотографий и рентген фазного анализа, при помощи которых фиксировали наличие свободного активного алюминия и размер частиц. Ученые установили, что при увеличении ширины зоны химических реакций в детонационной волне полнота окисления алюминия повышается. С помощью рентгено-фазного анализа удалось определить конфигурацию образующегося оксида алюминия ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , корунд) и форму его частиц (близкая к сферической). Было установлено, что в камере присутствуют процессы коагуляции и спекания частиц в более крупные, что дает возможность специалистам управлять размером и формой образующихся частиц, что может быть полезно для детонационного синтеза сверхтвердых и жаростойких материалов.

Исследования проводились не только для смесей алюминия с взрывчатыми веществами, но и с полимерами. Так, Денисаев А. А. [123] исследовал возможность инициирования взрывной реакция в смесях алюминия с фторопластом. Для фиксации давления была использована тензометрическая методика измерения. В ходе экспериментов изучался диапазон концентрация алюминия в смесях от 1,4 до 54% и отдельно выполнялись эксперименты с содержанием Al, не превышающим 1%. В качестве образцов использовались многослойные пленочные композиции. Итогом работы было получение кривых зависимости критического давления и прочности от содержания алюминия. Кривая для  $P_{кр}$  имела вид, кардинально отличающийся от зависимостей при работе с порошковыми смесями. Этот вид объясняется особенностями работы с пленочными образцами, что не позволяет точно определить минимум критического давления. Однако на пленках любой толщины сохранялась закономерность: с увеличением содержания алюминия, уменьшается чувствительность смесей, хотя при небольших концентрациях замечается падения  $P_{кр}$ .

Большое внимание уделяется скорости детонации и метательным способностям алюминизированных ВВ. Зависимости параметров детонации и метательной способности от плотности заряда являются основополагающими характеристиками взрывчатых веществ (ВВ). Исследованию скорости детонационной волны посвящено множество испытаний. В высокоплотных зарядах смесей мощных ВВ с различным (положительным и отрицательным) кислородным балансом зафиксировано снижение скорости детонации (одновременно и снижение давления и массовой скорости продуктов детонации) при добавлении дисперсных металлов. Выявлено, что добавки с меньшим размером частиц приводят к большему уменьшению параметров детонации ВВ. При этом инертные добавки (тальк, LiF, NaCl) зачастую снижают на меньшее значение, чем добавки Al. Чтобы объяснить причины снижения скорости детонации выдвигались различные гипотезы [109, 124, 125]. Анализ этих гипотез установил, что физически ясными причинами снижения являются потери энергии на сжатие, прогрев и ускорение частиц добавки.

В работе Давыдова В. Ю. и Губина А.С. [126] представлены исследования зависимости скорости детонации и метательной способности, выполненные по методике М-40, от плотности смеси ВВ-алюминий с различной концентрацией металла. По итогам работы установлено:

- Зависимости  $\partial D/\partial \rho$  от массовой доли добавки Al марки АСД в окфоле-3,5 и А-IX-1 имеют максимум при  $\alpha = 10 \div 15$  %. При этом положение этих максимумов совпадает с положением максимумов на зависимостях метательной способности от массовой доли добавки в этих смесях.
- Добавка 10 % Al марки АСД-4 в А-IX-1 приводит к большему на 27 % повышению значения  $\partial D/\partial \rho$ , чем добавка 10 % Al марки ПАП-2. Об этом свидетельствуют результаты измерения в испытаниях на баллистическом маятнике.
- Оценки, выполненные с использованием измеренных зависимостей скорости пластины от плотности заряда, показали, что в случае смесей

БТНЭНА с 15 % Al марки АСД-4 в газодинамических условиях методики М-40 на метание может быть затрачено 20 ÷ 40 % энергии сгорания Al.

В работе [127] авторы изучали возможность синтеза алюмината железа путем детонационного и ударно-волнового синтеза из чистого алюминия и гидроксида. Чистый алюминий был использован в смесях с октогеном и флегматизированным гексогеном с содержанием алюминия до 40%<sub>мас</sub>. При помощи программы REAL проводился расчет температуры взрывной реакции. Образцы после испытаний были отданы на рентгенофазовый анализ, результатом которого является наличие в продуктах взрыва трех фаз: две – алюминат железа со структурой шпинели, а третья – оксид алюминия.

В настоящее время основными экспериментальными методами исследования смесей ВВ/металл являются измерения скоростей метаемой пластины и детонации, профилей давления, массовой скорости и температуры. Зависимость этих параметров от химической реакции с участием добавки слабая, поэтому установить ее характеристики довольно трудно.

Невозможность прямого наблюдения за процессом окисления металлической добавки не позволяет в настоящее время дать однозначный ответ о ее роли в смесевых составах.

### 2.3.3 Аммиачная селитра

Аммиачная селитра или нитрат аммония ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) на протяжении долгого времени нашла различные области применения, но основные – сельскохозяйственная область и горнодобывающая промышленность. Визуально нитрат аммония выглядит как белое кристаллическое вещество. Температура плавления вещества при нормальных условиях: 170 °С, температуры термического разложения четко не определена и приблизительно составляет 200-210 °С, хорошо растворима в воде. По токсическому воздействию аммиачная селитра может незначительно отличаться в зависимости от способа производства. Предельно допустимая концентрация в

воздухе рабочей зоны для нитрата аммония устанавливается численно равной  $10 \text{ мг/м}^3$ , что позволяет отнести ее к умеренно-опасным веществам (3 класс опасности). [128]

Одной из главных особенностей является высокая гигроскопичность, что приводит к высокой слеживаемости. Для решения данной проблемы при производстве самой аммиачной селитры используют различные технические решения, среди которых можно отметить добавление антислеживаемых добавок. [129-131]

Кристаллическая структура аммиачной селитры довольно сложна и содержит несколько различных состояний, также нитрат аммония имеет несколько точек эфтектики. В зависимости от температур и условий насчитывают 9 различных модификаций, при атмосферном давлении и при отсутствии экстремально низких температур – всего 5. Характеристика структурных состояний и температурные условия, в которых могут они существовать приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Модификации аммиачной селитры

Система	Диапазон температур (°C)	Состояние	Изменение объёма (%)
I	169,6 — 125,2	кубическая	-2,13
II	125,5 — 84,2	тетрагональная	-1,33
III	84,2 — 32,3	$\alpha$ -ромбическая (моноклинная)	+0,8
IV	32,3 — -16,8	$\beta$ -ромбическая (бипирамидальная)	-3,3
V	-50 — -16,8	тетрагональная	+1,65

Производство аммиачной селитры является одним из крупнейших в мире. В России ежегодно производится порядка 35-40 тысяч тонн нитрата

аммония в год, разделяемого на нужды аграриев, промышленных производств, а также на экспорт. При этом важно обращать внимание на форму аммиачной селитры. Установленный ГОСТ 2-2013 [132] для аммиачной селитры регулирует производство гранулированной аммиачной селитры. Согласно межнациональному стандарту, нитрат аммония может быть двух марок: марка А, предназначенная для промышленности, и марка Б, производимая для сельского хозяйства. При этом использование селитры марки Б допускается для промышленных целей, в то время как продукция марки А не допускается для использования в аграрном комплексе.

Помимо гранулированной аммиачной селитры налажено производство пористого нитрата аммония, который производится непосредственно для использования в промышленных взрывчатых веществах. Единой рецептуры, как и стандарта, регулирующих требования к данному типу вещества нет, что открывает возможность для различных методов производства, в зависимости от возможностей и попытки достичь необходимые характеристики. [133-137]. Если анализировать различные методы производства пористой селитры, то уместно их разделить на три большие группы [139]: добавление в расплав нитрата аммония порообразующей добавки, в которых содержатся порообразующее вещество, к которым можно отнести карбонаты кальция, натрия или калия, а также поверхностно активное вещество [140]; метод обсушивания гранул, в данном методе порообразующим агентом выступает удаляемая вода; метод термообработки, базирующийся на изменении структуры молекулы аммиачной селитры при изменении температур, из-за чего могут возникать поры.

Помимо гранулированной и пористой аммиачной селитры в последнее время активно используется еще один вид нитрата аммония – известково-аммиачная селитра. Создается данный подвид селитры непосредственно для сельского хозяйства и призван решить одновременно две главные проблемы: смешиваемость и возможную взрывоопасность селитры за счет введения в структуру большого количества карбоната кальция. [141] За счет уменьшения

взрывчатых свойств известково-аммиачную селитру не используют для промышленных нужд.

Как индивидуальное вещество аммиачная селитра не проявляет высоких взрывчатых свойств и ее не относят к энергонасыщенным веществам. Скорость детонации принимают в диапазоне от 1,5 до 2,5 км/с в зависимости от промежуточного детонатора, теплота взрыва приблизительно равна 1400 кДж/моль [142]. Но за счет сильной окислительной способности даже с небольшим количеством топливной добавки значительно повышать свои взрывчатые характеристики. Используются как жидкие топливные добавки (дизельные топлива), так и твердые добавки, среди которых наиболее распространенными являются порошки алюминия и тротил.

На основании того, какие именно топливные добавки используются в промышленных взрывчатых веществах подразделяют целые подклассы:

- класс типа аммиачная селитра/дизельное топливо (АСДТ или ANFO на английском языке) представляет собой бинарную смесь нитрата аммония с жидкой топливной добавкой (дизельное топливо или керосин). Соотношение компонентов может отличаться, при этом обычно жидкое топливо не превышает 6 массовых процентов, при маркировке указывается содержание горючего.
- Составы, включающие в свой состав тринитротолуол называют амматами. Содержание тротила может достигать вплоть до 50%. При маркировке указывают дробное соотношение селитры и тротила, в числителе указывая количество селитры, а в знаменателе – тротила). Наиболее распространенным представителем является аммонит (содержание компонентов 80/20). [143]
- При использовании алюминия в качестве добавки существует несколько дополнительных подгрупп: гранулиты, в состав которых помимо алюминия входит и жидкая топливная добавка

(дизельное топливо), допускаются также простейшие гранулиты, в которых не используется третий компонент, [144] и аммонал, в состав которых третей добавкой используются взрывчатые вещества (наиболее распространен тротил, но возможно применение гексогена). [143, 145]

- Водонаполненные взрывчатые вещества, содержащие помимо воды алюминий и тротил имеют название акваалы.

Исследования взрывчатых свойств как индивидуальных составов, так и промышленных взрывчатых веществ проводили на протяжении долгого времени [146] и с учетом использования новых методов изготовления аммиачной селитры актуальность исследования не сбавилась [147, 148].

Постоянно ищутся подходы для модернизации рецептов взрывчатых составов для достижения необходимых параметров [149] и изучения влияния либо типов самой аммиачной селитры [150-154].

Постоянным вопросом для различных рецептов промышленных ВВ является повышение мощности составов. Решается это либо добавлением высокоэнергетических веществ (тротил, гексоген), либо поиск оптимальных рецептов, поиск соотношений компонентов, добавление энергетических добавок, к которым в первую очередь относятся порошки алюминия, а также ферросилиций, магний [155-168].

При этом необходимо учитывать условия применения промышленных взрывчатых веществ. Они применяются в первую очередь для добычи полезных ископаемых, поэтому на применимость могут влиять наземным или подземным образом ведутся работы, соответственно под каждый вид работ необходимо производить модернизирование составов. [169-171]. Влияние также оказывает и природные условия, сложившиеся на территории, где ведется добыча [171]. Отдельно стоит выделить арктическую зону. В связи с вечной мерзлотой привычные составы могут быть неэффективно, что приводит к поиску новых компонентов для промышленных взрывчатых веществ и новых способах взрывания [172].

Вопрос безопасности аммиачно-селитренных взрывчатых веществ остается актуален до сих пор. Проводились и проводятся исследования о взрыво- и пожаробезопасности вещества. При использовании стандартных методиках определения чувствительности к удару вещество проявило себя нечувствительности. Только при использовании груза массой 24 кг, сбрасываемого с высоты 2 м, что превышает предельную высоту по стандартным методам в 4 раза, удалось достигнуть срабатывания чистой аммиачной селитры [142]. Для промышленных взрывчатых веществ определенных марок в государственных стандартах прописана требуемая частота к взрыву [143-145].

Изучение смесевых взрывчатых составов на основе аммиачной селитры в открытых источниках не так много. В работе Дубовика рассматривается вопрос чувствительности простейших гранулитов к удару [176]. В данной работе не только приводятся численные значения, но и дается пояснение причины сенсбилизации аммиачной селитры.

#### 2.3.4 Компоненты твердых ракетных топлив

Порох по классификации взрывчатых веществ относят к метательным взрывчатым веществам [177-182]. По своей сути пороха представляют собой энергетические конденсированные системы, отличительной чертой которых является насыщенность энергией в единице контроля. Ключевым у веществ является способность устойчиво гореть в том числе и без доступа кислорода с выделением большого количества тепла и газовой выделением.

Твердое ракетное топливо (ТРТ) представляет собой порошок, который используются в ракетных топливах. ТРТ в плане структуры являются композиционными полимерными материалами [178, 179, 182-184].

К порохам в общем, и к ТРТ в частности, предъявляется ряд специальных требований, в связи с которыми связано сложность производства и обосновывают разнообразие рецептур [185]

Среди эксплуатационных характеристик выделяют большое количество требований, обеспечивающих заданных требований для скорости и дальности ракеты. Помимо оборонной промышленности пороха могут использовать и в гражданской сфере, в том числе и горной промышленности для поиска полезных ископаемых на большой глубине.

Помимо физических свойств, способных обеспечить необходимую скорость горения в зависимости от давления в камере ракетного двигателя, ТРТ должны обладать химической стойкостью, термостабильностью и другими важнейшими физико-механическими свойствами, например гигроскопичностью.

В состав твердых ракетных топлив одним из основных компонентов является октоген, что позволяет значительно увеличить энергетический потенциал топлива. Высокоэнергетическое вещество может быть использовано и в двухосновных, баллистических, ТРТ [186,187], так и в составе смесевых ТРТ [188,189]. Увеличение энергетического потенциала ракетных топлив помимо введения мощных энергонасыщенных материалов используют различные модификаторы горения, состоящие из солей переходных металлов. При использовании подобных модификаторов одним из необходимых требований является наличие сажи, чья задача является в образовании углеродного каркаса в процессе горения, на которой накапливаются частицы модификаторов горения, благодаря чему происходит катализ [190, 191]. Помимо этого, образованный каркас является горючим компонентом, которое при окислении дополнительно катализируют соли переходных металлов.

В работах [192,193] установлено, что вместо сажи без потери качества могут быть использованы углеродные нанотрубки. Очевидным преимуществом УНТ над сажой являются повышенные физические и морфологические характеристики: более развитая структура частицы и на несколько порядков превышающая сажу теплопроводность [194].

В качестве модификаторов горения, как ранее было сказано, используются большое количество оксидов и солей переходных металлов,

среди которых можно выделить оксид железа (III) [195, 196], диоксид титана [197], оксида меди (II) и свинца (II) [198].

Помимо оксидов металлов рассматриваются и чистые металлы, способные повысить энергетический потенциал состава, среди которых можно выделить алюминий [199-203], никель [204-206], медь [207-209]. Помимо этого, определяют влияние размера частиц модификаторов горения, особенно с развитием и обильным внедрением наноразмерных порошков металлов и оксидов металлов. В работах [210,211] установлено, что использование нанопорошков в составе ТРТ дает большую прибавку в скорости горения по сравнению с микроразмерными порошками.

При этом вопросу чувствительности к внешним воздействиям при исследовании и поиске новых рецептур практически не уделяется, хотя в [185] в качестве требований к ТРТ представляется необходимость обеспечивать низкая чувствительность к механическим воздействиям во избежания аварий при производстве и снаряжении в камеру ракеты.

В.А. Теселкин [212] изучал бинарные композиции ТРТ с углеродной добавкой. Чувствительность состава твердого ракетного топлива составила порядка 0,32 ГПа, что является показателем довольно высокой чувствительности к удару. При этом увеличение угля в составе снижает чувствительность к механическому воздействию. Однако стоит отметить, что массовая часть, приведенная в работе, практически не используется в составах ракетных топлив.

### 3. Методическая часть

#### 3.1 Инструментальное обеспечение

В работе эксперименты проводились по нескольким методикам: методикам, описанным в ГОСТ 4545-88 [213] года и разработанному в университете химической физики имени Н.Н. Семенова РАН методу критических давлений. Эксперименты проводились на вертикальном копре марки К-44-2, как с применением приборчика с затрудненным истечением вещества (№ 1 по классификации Холево), так и с применением приборчика со свободным истечением вещества, который представлен в двух вариациях: стандартный приборчик, представляющий собой железную муфту со специальной канавкой и модифицированный приборчик, где железная муфта заменена на муфту из кальки с целью обеспечения фиксации момента вспышки фотодиодом без существенной задержки, так как время взрыва ориентировочно составляет 150-300 мкс, то задержка фотодиода может являться причиной неточного определения взрыва.

Вертикальный копер К-44-2 состоит из наковальни, на которую устанавливаются снаряженные приборы, трех направляющих, установленных вертикально и параллельно друг другу, между которыми крепится механизм сбрасывания груза. Дополнительно устанавливается зубчатая рейка, которая препятствует повторное или непланируемое сбрасывание груза на наковальню копра (рисунок 1). В работе использовался груз массой 10 кг, который должен быть обязательно снаряжен ограничителем движения. Перед каждым сбрасыванием груза необходимо проверить надежность крепления сбрасывающего механизма и крепления направляющих.

Решение о пригодности копра принимают на основе экспериментов с неснаряжёнными приборами с высоты 50 см. Отскок груза после сбрасывания должен составлять примерно 70-75% от первоначальной высоты (35-37,5 см). Проводится 3 эксперимента и полученные результаты усредняются, после чего делается вывод о пригодности копра к использованию.

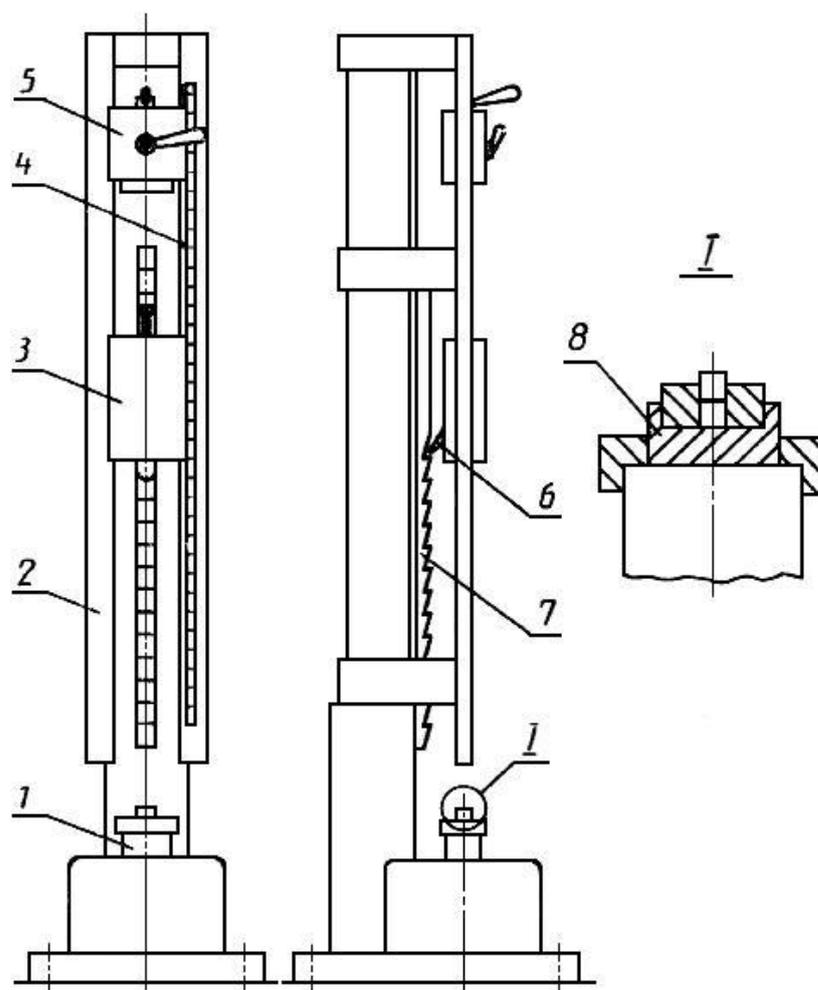


Рисунок 1 – Копер вертикальный К-44-II

1 - наковальня; 2 - колонна; 3 - груз; 4 - линейка; 5 - устройство для зацепления и сбрасывания груза; 6 - ограничитель движения; 7 - рейка зубчатая; 8 - роликовый прибор

Согласно ГОСТ 4545-88 существует два основных критерия по определению чувствительности к удару веществ:

1. нахождение нижнего предела чувствительности – наибольшей высоты сбрасывания груза, при которой в серии из 25 экспериментов не зафиксировано ни одного взрыва. Стоит отметить, что наличие или отсутствие взрыва в данном случае определяется органолептически: наличие вспышки, характерного хлопка и ожогов на роликах после эксперимента;

определение частоты взрывов, представляющая собой статистический показатель и определяющаяся как количество взрывов в 25-ти ударной серии

с высоты сбрасывания груза равной 250 мм. Частость взрывов определялась в приборах №1 с навесками массой  $50\pm 5$  мг.

Работа по определению нижнего предела чувствительности в работе проводилась с индивидуальными веществами как в стандартизированных приборчиках №2, так и в модифицированных. Предварительно определялась частость взрывов навесок массой  $50\pm 5$  мг по упрощенной схеме (проводилось только 10 опытов). Навески производились на торсионных весах. Исходя из полученных данных о частости согласно таблице № проводился выбор первоначальной высоты эксперимента (таблица 2)

Таблица 2 – Рекомендуемые высоты начала эксперимента в зависимости от частости взрывов

Частость взрывов в приборе № 2, %	Рекомендуемая начальная высота сбрасывания для определения нижнего предела чувствительности, мм
0	От 500 до 400
10	От 400 до 300
20	От 300 до 250
30	От 250 до 200
40	От 200 до 150
50	От 150 до 120
60	От 120 до 100
70	От 100 до 70
80-100	50

Во время определения непосредственно нижнего предела чувствительности навеска увеличивалась до  $100 \pm 5$  мг. Различий между значениями нижних пределов между стандартным приборчиком №2 и модифицированным не выявлено.

Метод критического давления базируется на индивидуальных характеристиках как индивидуальных взрывчатых веществах, так и смесевых составах. Каждое вещество обладает определенным давлением, которое необходимо создать для инициирования взрыва. Чем меньше данное давление, тем исследуемое вещество более чувствительное к механическим воздействиям. Критическое давление инициирования зависит от критической толщины заряда и прочности системы. Данный параметр, как характеристика чувствительности к удару качественно отличается упором на индивидуальные свойства веществ. Высота сбрасывания груза, соответственно, и скорость сбрасывания груза практически не оказывают влияния на критическое давление инициирования, что не характерно для частоты взрывов. Однако использование данного метода усложняет приборную базу эксперимента. Определение взрыва или его отсутствия путем наблюдения за процессом недостаточно, необходимо понимать четкий момент возникновения взрывных процессов и распределения давления на заряд во время удара. Для этого используется тензометрическая методика.

Тензометрическая методика состоит в использовании специального датчика, устанавливаемого соосно зарядам исследуемых веществ на наковальню копра. Во время ударов токопроводящая обмотка датчика несколько «разбухает», увеличивая длину обмотки, что приводит к увеличению сопротивления, и соответственно, увеличению разности потенциалов на концах тензодатчика. Данное изменение фиксируется при помощи двухканального осциллографа Velleman PCS-500 (рисунок 2). Ко второму каналу прибора подключается фотодиод, фиксирующий радиационную вспышку, область чувствительности которого составляет 0,5-1,75 мкм), устанавливаемый наиболее близко к зарядам веществ.



Рисунок 2 – осциллограф Velleman PCS-500

Тензометрический датчик для работы изготавливается самостоятельно и состоит из шарикоподшипникового ролика высотой  $\approx 12$  мм и константановой проволоки толщиной 30 мкм, наматываемой на боковую поверхность ролика. Для изготовления датчика используется специальный станочек (рисунок 3)

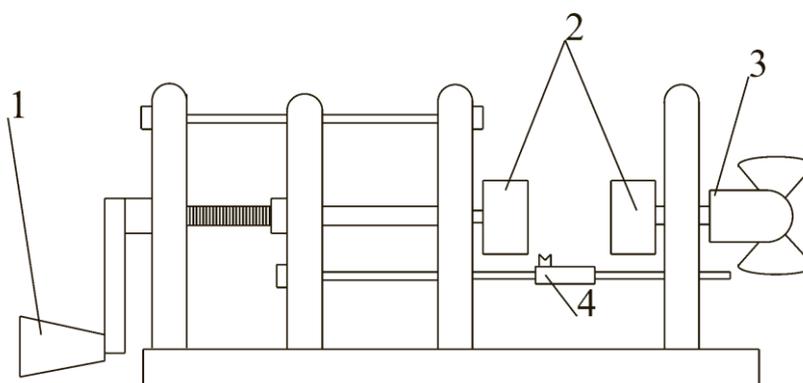


Рисунок 3 – Станочек для намотки тензометрических датчиков

1 – ручка, 2 – зажим, 3 – вентиль, регулирующий силу зажима, 4 – насечка для равномерного наматывания проволоки.

Ролик, используемый для основы датчика, не должен иметь дефектов или трещин, как на боковой поверхности, так и на торцах во избежание разрушения во время эксперимента. Перед намоткой обрабатываем растворителями поверхность для избавления от загрязнения поверхностей. Ролик устанавливается в зажимы (2) станочка. Фиксируется ролик при помощи вентиля (3) таким образом, чтобы было возможно свободное вращение ролика в зажимах. При этом необходимо гарантировать, чтобы во время вращения ролик был довольно плотно зафиксирован и не мог вращаться в других плоскостях. При помощи ручки (1) устанавливаем насечку (4) до такого положения, чтобы расстояние от начала ролика до насечки составляло примерно 1 мм. После чего константановая проволока толщиной длиной от 120 см складывается вдвое и приклеивается ее на месте перегиба к началу

ролика. Вращая ручку (1) от себя ролик приходит во вращение, и проволока наматывается. Насечка (4) обеспечивает необходимое равномерное расположение проволоки по боковой поверхности ролика. Необходимо контролировать, чтобы витки проволоки не накладывались внахлест.

После этого для изоляции поверхности ролика вся боковая поверхность тщательно покрывается клеем для обеспечения изоляции обмотки датчика и отсутствия замыканий непосредственно на ролик. После чего необходимо поместить ролик в эбонитовую заготовку, в которую вкручены два самореза, необходимые для подключения тензометрического датчика к осциллографу. После чего устанавливается провод, при помощи которого установка будет подключаться к двухканальному осциллографу, концы которого необходимо зачистить и припаять к саморезам. (рисунок 4) Участок проволоки, при помощи которого будет происходить соединение тензометрического датчика с осциллографом зачищается до металлического блеска и припаивается к саморезам (рисунки 5 и 6)

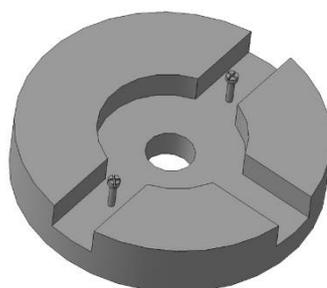


Рисунок 4 – Эбонитовая заготовка с болтами

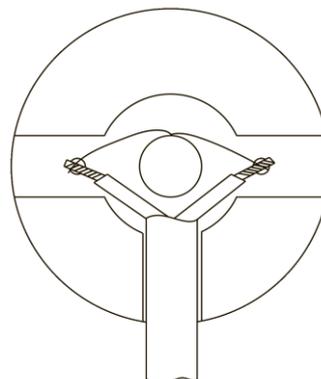
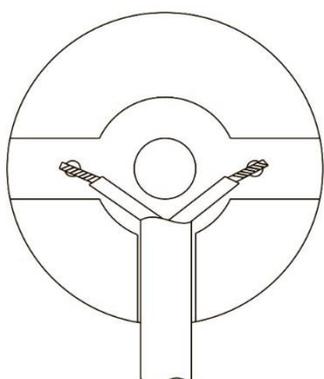


Рисунок 5 – Пайка провода от осциллографа Рисунок 6 – Припаянный датчик

Критерием, определяющим качество датчика, является образующееся сопротивление. Если сопротивление менее 800 Ом, то датчик считается недостаточно чувствительным, из-за чего разность потенциалов становится не такой заметной, что приводит к увеличению погрешности определения параметров инициирования. При превышении давления более 1600 Ом датчик считается чрезмерно существенным, что может привести к фиксированию большого количества помех, которые могут помешать определению точного момента инициирования взрыва. При соответствии требований датчик в эбонитовой заготовке устанавливается на наковальню копра и подключается к осциллографу согласно схеме (рисунок 7)

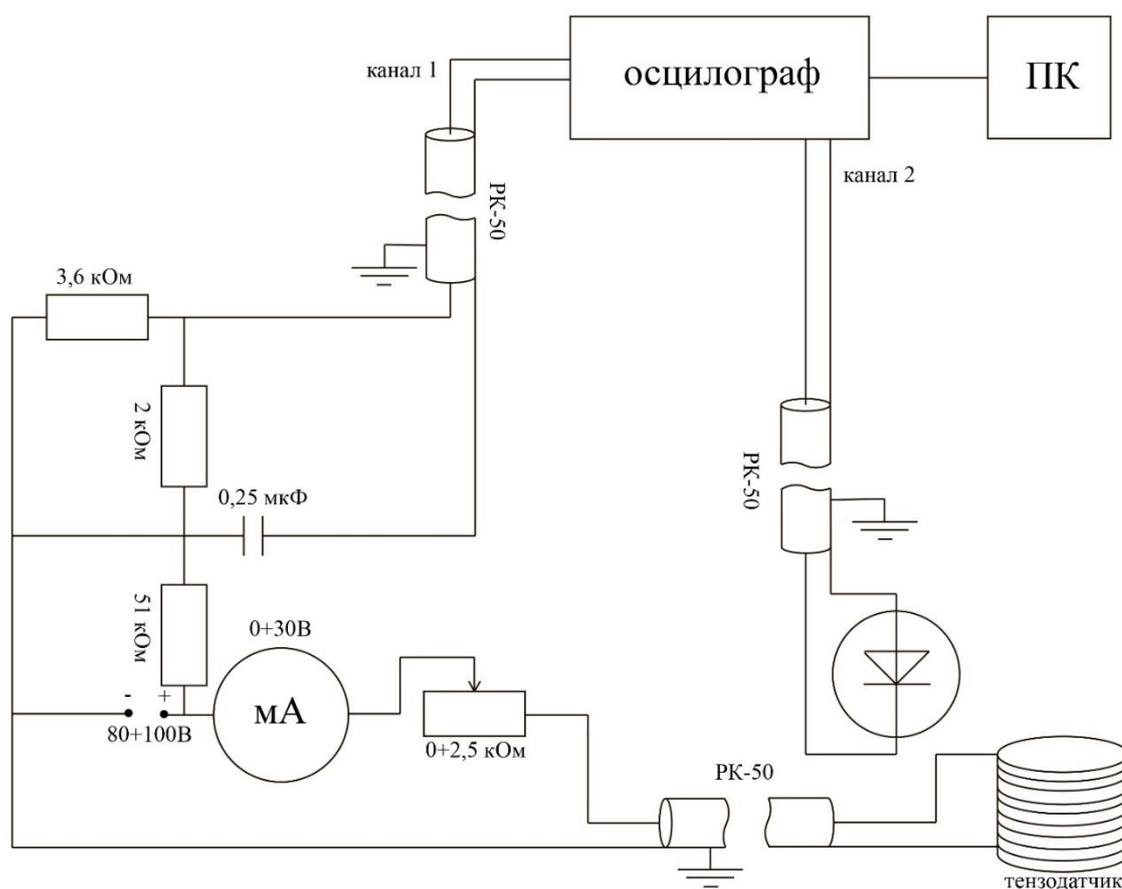


Рисунок 7 – Электрическая схема подключения

### 3.2 Обработка экспериментальных данных

Перед проведением каждой серии опытов на определение критических параметров инициирования смесей необходимо провести серию холостых ударов. Холостой удар представляет собой проведение эксперимента по приборчику №2, между торцами которого не содержится ВВ (неснаряженному приборчику №2). Необходимость проведения холостого удара заключается в проверке датчика на пригодность и его калибровку для последующего определения критического давления инициирования исследуемых смесей. Холостые удары необходимо проводить до трех сходящихся результатов. К сходящимся экспериментам относят такие осциллограммы, при которых показатель изменения напряжения не изменяется. При этом во время выполнения удара возможно непроизвольное срабатывания триггера сигнала канала осциллографа. Это может быть вызвано излишней чувствительностью используемого датчика или неполадками при соединениях осциллографа и датчика. Такие случаи трактуются как неудачная проверка датчика. Если на протяжении большого количества (более 10) экспериментов не удастся получить желаемый результат, то датчик считается непригодным для эксперимента, и его необходимо заменить. В некоторых случаях при недоброкачественной пайке возможно исправление путем перепаявания зачищенных концов датчика. Выяснить данный момент можно либо при помощи визуального осмотра, либо по характерных для такой ошибки показателей осциллографа: большое количество ровных вертикальных линий, которые выходят за диапазон измерений осциллографа. Зарегистрированная в ходе холостого удара осциллограмма представляет собой силовую нагрузку с равномерным подъемом и спадом давления. (рисунок 8).

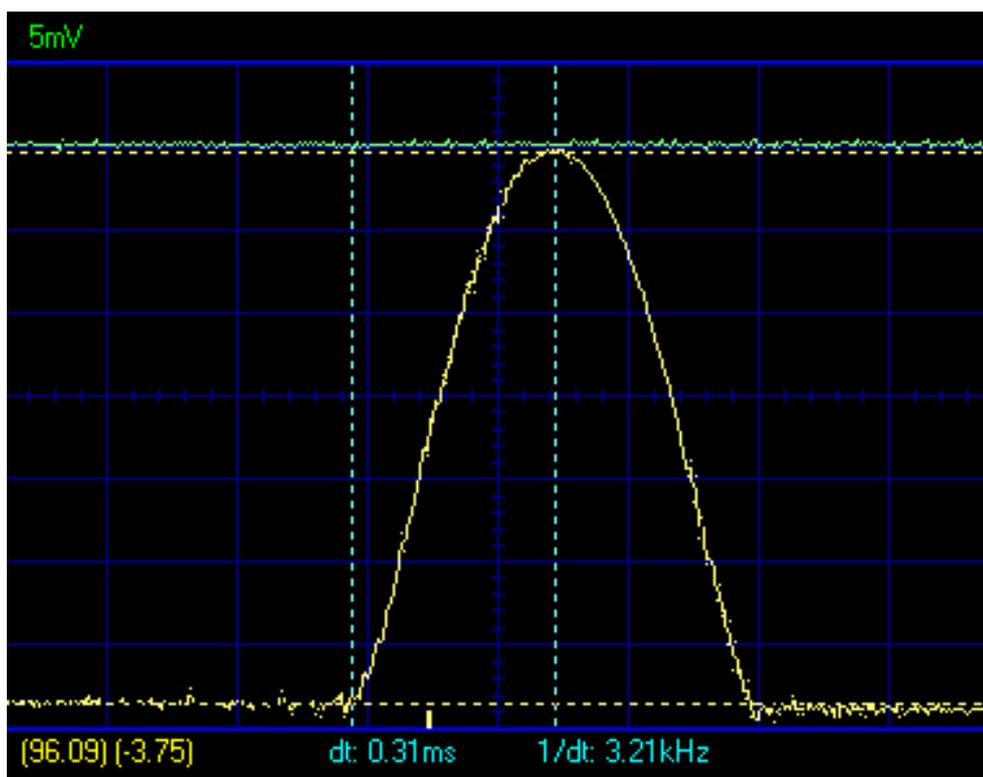


Рисунок 8 – Осциллограмма холостого удара

Программа фиксирует изменение напряжения, создающегося при ударе в коротком временном промежутке (порядка 0,3 мс). Поскольку в результате эксперимента осциллограммы представлены в единицах напряжения, то необходимо перевести в единицы давления. Для того, чтобы произвести пересчет напряжения в давление, то необходимо произвести расчеты по формуле:

$$P = K_p \cdot \Delta V, \text{ где} \quad (5)$$

$P$  – давление, ГПа;  $\Delta V$  – изменение напряжения в сети, мВ,  $K_p$  – коэффициент пропорциональности ГПа/мВ.

Для расчета единиц давления применяется программа, способная произвести математические вычисления (в данном случае MS Excel), там первоначально вычисляется единичный шаг времени и напряжения в программе. Согласно установленным показаниям на 125 единиц приходится изменение времени численно равное 0,2 мс, из чего можно сделать вывод, что единичное изменение времени, фиксируемое в программе численно равно  $0,2/125 = 0,0016$  мс. По аналогичному алгоритму вычисляется единичное изменение напряжения, которое численно равно 0,46875 мВ.

Следующим шагом в вычислении является выявление фонового уровня сигнала, который подает установленный тензометрический датчик с последующим вычетом его из значений изменения напряжений, взятых из базы данных программы. Осциллограмма холостого удара сопровождается постоянным фоновым шумом, идущем по каналу при отсутствии внешних воздействий. Для дальнейшего пересчета необходимо убрать этот шум. При записи единичных воздействий сохраняются временной интервал ориентировочно равный 6,55 сек (4095 точек), из которых количество точек, отвечающих за силовую нагрузку – ориентировочно 400-500. Все остальные являются показателями шума. Экспериментально определено, что на первой тысячи значений записи подъем напряжения еще не начинается, но по времени максимально приближен к нему. Усредняя значения этих показателей можно получить уровень шума, который мы должны учесть в дальнейшем. Расчет по точкам, которые следуют после удара допускается, но с некоторыми оговорками. В некоторых случаях сразу после разгрузки могут присутствовать затухающие остаточные эффекты, которые нельзя использовать в расчетах. Определить их можно визуально: после осциллограммы холостого удара наблюдается не ровная линия, как до момента удара, а волновые колебания.

Далее необходимо определить максимум изменения напряжения, которому соответствует величина максимально возможного для фиксации давления. Для этого необходимо определить уравнение функции, достоверно описывающее полученную графическую зависимость (можно осужествить при помощи Линии Тренда, обычно наиболее точно соответствует полином 6-ой степени). Следующим шагом является вычисление производной функции, определение экстремума при помощи нахождения критических точек производной (точки, в которых производная не существует или равна 0). Значение давления в данной точке будет соответствовать максимуму. Возможны значения, которые превышают рассчитанное. Их нельзя считать максимальными, поскольку они могут быть вызваны помехами.

В дальнейшем мы находим площадь осциллограммы при помощи метода трапеций.

Коэффициент пропорциональности зависит от скорости, которая развивается грузом в момент ударом. Расчет проводится по формуле:

$$W_0 = \sqrt{2 * g * H} \quad (6)$$

В условиях проводимых экспериментов она численно равна 3,13 м/с

Необходимо по вышеописанному алгоритму рассчитать коэффициенты пропорциональности для всех трех сходящихся холостых ударов и принять за расчетный усредненное значение. Максимальное давление холостого удара, фиксируемое тензометрическим датчиком, находится в диапазоне 2,0-2,5 ГПа.

В ходе экспериментов полученные осциллограммы разделялись на две большие группы: «взрыв» и «отказ». К взрывам относились такие осциллограммы, у которых на стадии подъема давления происходил единичный резкий спад давления. В момент такого спада фотодиод фиксирует вспышку (на полученной осциллограмме это отображено резким движением зеленой линии, отображающей показания фотодиода). Если резких спадов давления несколько, и фотодиод отклоняется при первом «сколе», то такие эксперименты также считаются «взрывами», поскольку взрывная реакция произошла при первом разрушении таблетки, характеризующимся резким спадом давления, следовательно известна толщина заряда, при котором произошло взрывное разрушение. (рисунок 10).

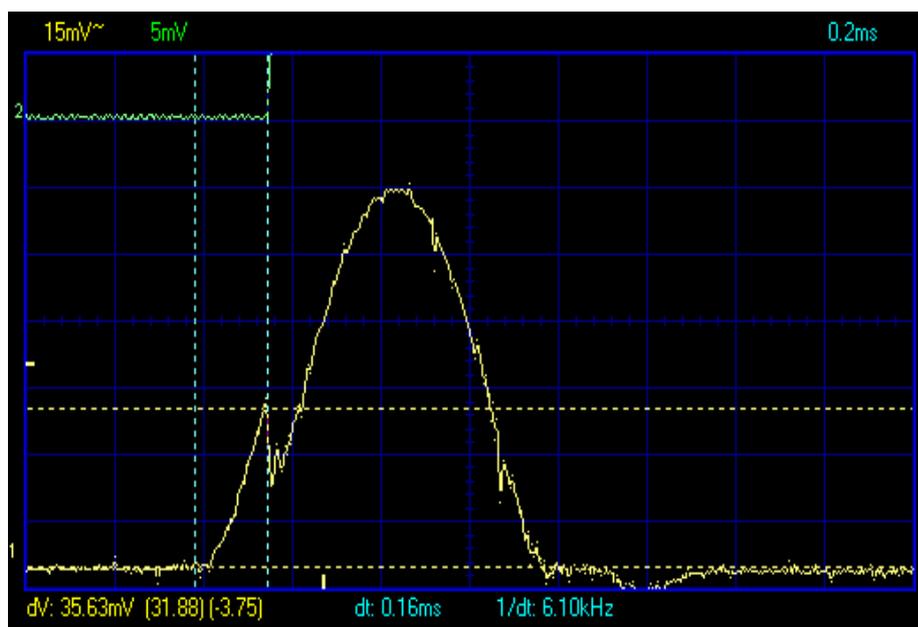


Рисунок 9 – Осциллограмма записи давления удара при взрыве смеси.

К «отказам» относят такие осциллограммы, которые визуально совпадают с осциллограммами холостого удара. Это может происходить в случае, если масса исследуемой смеси в эксперименте настолько мала, что недостаточно энергии для возбуждения взрывной реакции. (рисунок 10)

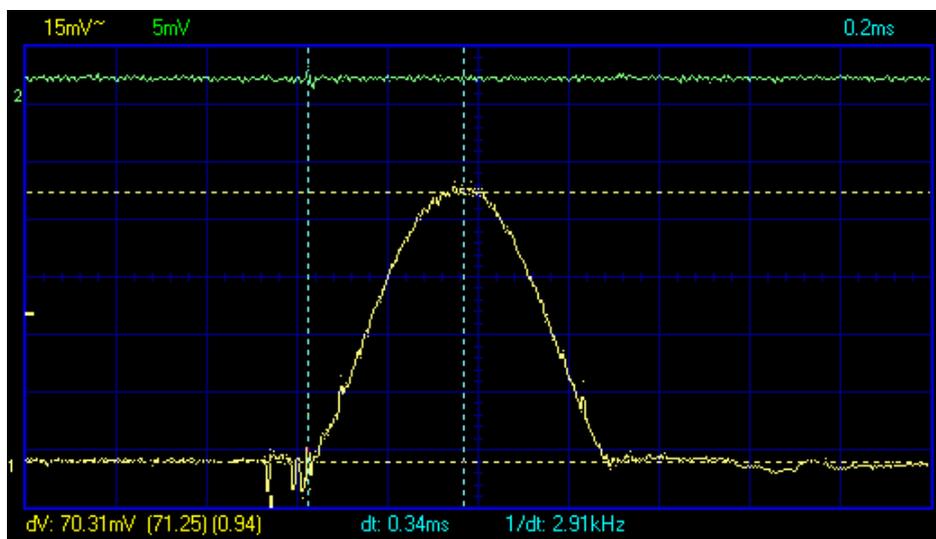


Рисунок 10 – Пример «отказа», имеющего вид холостого удара

Еще одним типом «отказов» являются осциллограммы с множественным резким спадом давления на стадии подъема давления, если взрывное разрушение произошло на втором или последующих «сколах» (определяется по отклонению фотодиода). При первичном снижении таблени можно утверждать, что происходит допрессование заряда, соответственно

толщина таблетки уменьшается. Последующие допрессования могут быть не единичными, зависит от того, в какой момент толщина таблетки станет меньше определенного критического давления. В таком случае неизвестна заранее толщина заряда, при которой произошел взрыв, что необходимо для точного определения критических параметров инициирования (рисунок 11). В таком случае берутся значения, при каком давлении произошло первое разрушение исследуемого вещества (без взрыва). Расчет по «отказам» проводится для выяснения, какое давление необходимо для изменения первоначальных характеристик изготовленных зарядов. Звук и наличие ожогов на роликах, в отличие от методики ГОСТ, не являются основополагающими критериями при определении взрыва или отказа.

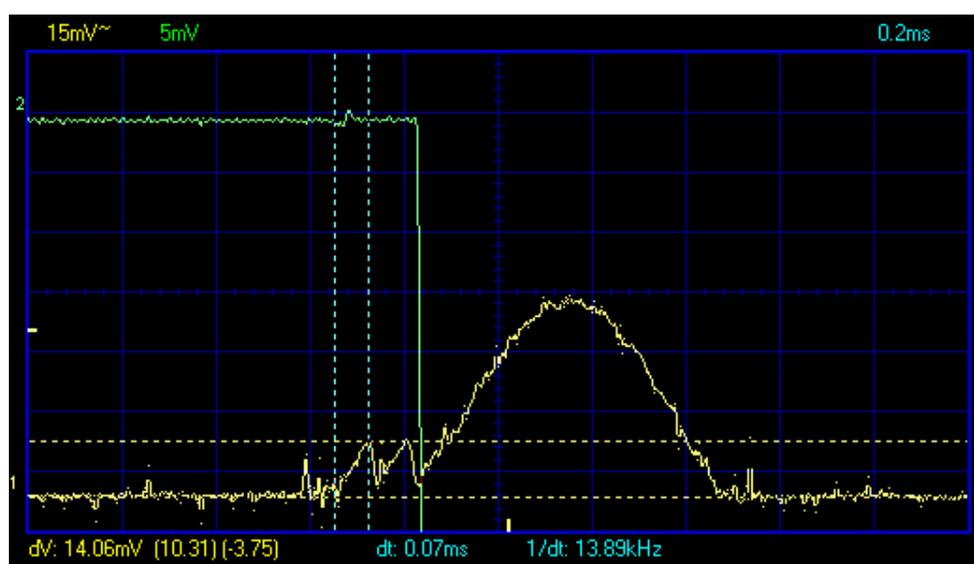


Рисунок 11 – «Отказ» при множественных «сколах»

Для определения критических параметров создается таблица, в которой указывается толщина спрессованной таблетки вещества, вычисляемая как разность между высотой сборки без вещества и сборки с веществом. Значение изменения напряжения, при котором произошло первое разрушение заряда (в случае, если осциллограмма приобретает вид холостого удара, то берется максимальное значение изменения напряжения), давление, которое рассчитывается по формуле 5, относится ли эксперимент к «взрыву» (1) или к «отказу» (2), наличие звука, прочность заряда, рассчитываемая из формулы:

$$P = \sigma_0 \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h}\right) \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  – средняя прочность вещества на сжатие при ударе,  $D$  – диаметр заряда исследуемого вещества,  $h$  – толщина образца, рассчитанная по формуле. Таблица имеет следующий внешний вид (рисунок 12):

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа	Взрыв/отказ	звук
10	23,84	23,9	0,06	74,53	2,199	0,066	0,196	0	0
20	23,92	24,07	0,15	73,13	2,157	0,156		0	1
30	23,9	24,1	0,2	52,03	1,535	0,144		1	1
40	23,89	24,12	0,23	67,03	1,977	0,211		1	1
50	23,92	24,23	0,31	49,22	1,452	0,201		1	1
60	23,85	24,21	0,36	29,53	0,871	0,137		1	1
70	23,28	23,73	0,45	39,38	1,162	0,220		1	1
80	23,91	24,37	0,46	38,91	1,148	0,221		1	1
90	23,78	24,35	0,57	21,09	0,622	0,142		1	1
100	23,78	24,38	0,6	33,75	0,996	0,237		1	1
110	23,84	24,46	0,62	21,09	0,622	0,152		1	1
120	23,92	24,56	0,64	37,03	1,092	0,273		1	1
130	23,9	24,61	0,71	25,78	0,761	0,205		1	1
140	24,07	24,87	0,8	21,09	0,594	0,175		1	1
150	23,92	24,71	0,79	26,72	0,753	0,219		1	1
160	23,9	24,74	0,84	24,38	0,687	0,209		1	1
170	23,89	24,79	0,9	23,44	0,661	0,211		1	1
180	23,92	24,86	0,94	23,44	0,661	0,217		1	1
190	23,99	24,95	0,96	20,63	0,581	0,194		0	1
200	23,85	24,82	0,97	21,56	0,608	0,204		0	1
210	23,91	24,96	1,05	21,56	0,608	0,215		0	1
220	23,78	24,86	1,08	20,16	0,568	0,204		0	1
230	23,78	24,89	1,11	18,75	0,528	0,193		1	1
240	24,07	24,91	0,84	17,34	0,489	0,148		0	1
250	23,92	25,12	1,2	17,81	0,502	0,193		1	1
260	23,9	25,07	1,17	12,66	0,357	0,135		0	1
270	23,92	25,21	1,29	18,28	0,515	0,207		1	1
280	23,89	25,05	1,16	12,19	0,344	0,129		0	1
290	23,99	25,1	1,11	15,94	0,449	0,163		0	1
310	23,91	25,15	1,24	11,72	0,330	0,250		0	1
320	23,78	25,29	1,51	14,06	0,396	0,283		0	1

Рисунок 12 – Таблица для определения критических параметров инициирования

По полученным данным о прочностях конкретного заряда определяется средняя прочность смеси как среднеарифметическое число всех прочностей, где произошло разрушение таблетки (не важно взрывное или допрессование). В случае, когда заряд остался целым, смесь не достигла своего предела прочности и эти данные не должны учитываться.

Для определения критического давления по формуле (4) необходимо иметь данные по средней прочности смеси и критической толщине ( $h_{cr}$ ).

Критическую толщину принимают как среднее значение между толщиной заряда, при которой произошел последний взрыв, и толщиной, где был зафиксирован «отказ» в связи с многократным разрушением таблетки. Определять можно как исходя из расчетных значений, представленных в таблице усредняя значения толщины между последним зафиксированным «взрывом» и первым «отказом», так и графическим методом. В этом случае работа проводится с прочностной кривой, которая представляет собой теоретическую зависимость давления, необходимого для разрушения заряда определенной толщины, от непосредственно самой толщины таблетки (пунктирная линия). На зависимость наносят экспериментальные данные, цветом отделяя «взрывы» (черные точки) и «отказы» (белые точки). При этом образуются области «взрывов» и «отказов», местом их соприкосновения является критические параметры инициирования – критическая толщина и соответствующее ей критическое давление. (рисунок 13) Для увеличения точности определения критических параметров инициирования необходимо в предполагаемой области  $h_{cr}$ , определенной из первых опытов, проводить большое количество опытов для сужения диапазона, изменяя толщину таблетки на небольшие значения.

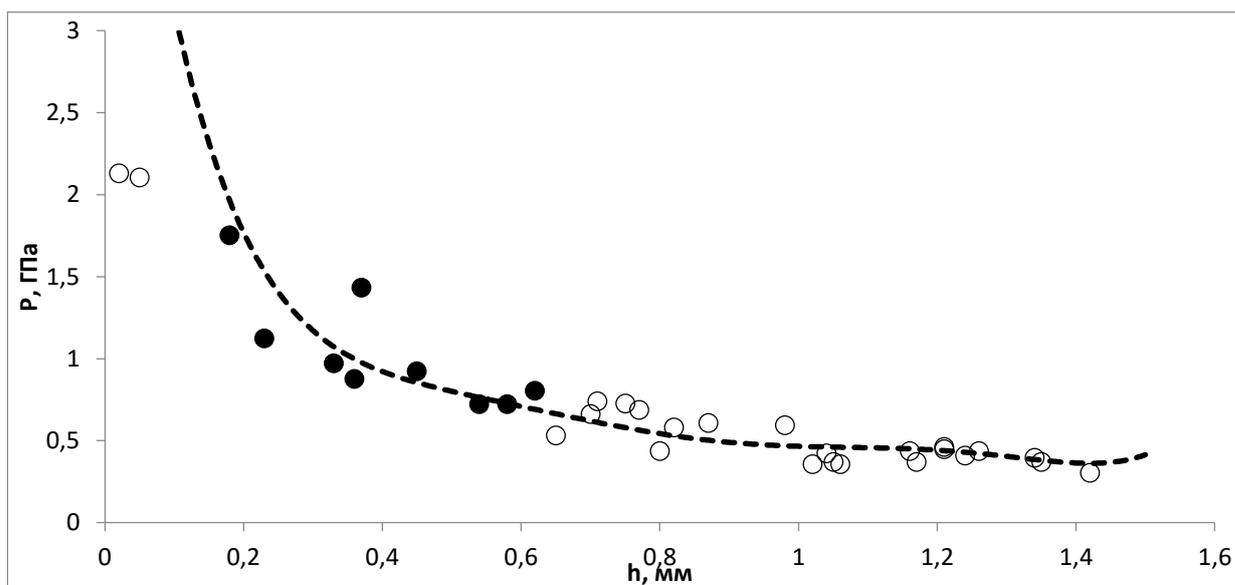


Рисунок 13 – Пример прочностной кривой

## 4. Обсуждение результатов

### 4.1 Сходимость данных, полученных методом критических давлений и методом определения нижнего предела чувствительности

Как ранее говорилось, согласно ГОСТ 4545-88 и регламенту таможенного союза основными показателями чувствительности к удару являются нижний предел чувствительности (в мм) и частота взрывов (в %). Максимальный нижний предел чувствительности веществ, согласно документам, составляет 500 мм. В случае, если и на данной высоте не было зафиксировано ни одного взрыва, то говорят о том, что нижний предел чувствительности равен или более полуметра. В европейском документе о правилах перевозки опасных грузов (ДОПОГ) основным параметром, определяющим чувствительность к удару, является предельная энергия удара (Дж), суть которой находится в нахождении такой минимальной энергии удара на вертикальном копре, при которой «взрыв» будет зафиксирован как минимум единожды. Варьировать энергию удара возможно как изменяя высоту падения груза, так и используя грузы различной массы. Наибольшей предельной энергией для веществ по изложенной в нормативных документах методики является величина, численно равная 50 Дж. Данная величина получается путем сбрасывания 10-ти килограммового груза с высоты 50 см, что соответствует предельным показателям для определения нижнего предела чувствительности.

Среди отечественных и зарубежных методик испытаний метод критических давлений, активно использующийся в данной работе, не признан стандартизированным. На основе экспериментальных данных с индивидуальными веществами (аммиачная селитра, тротил, окфол-3,5) определено критическое давление инициирования, являющееся одним из показателей чувствительности к удару, и нижний предел чувствительности согласно методике ГОСТ.

Для окфола-3,5 частота взрыва, определяемая по усеченной методике для определения начальной высоты эксперимента, составила 90% (таблица 3), следовательно, ориентируясь по таблице №2 исходная высота эксперимента составляет 50 мм (таблица 4). При данной высоте не было зафиксировано ни одного взрыва, что говорит о том, что данная высота недостаточная для инициирования данного вещества, следовательно, необходимо поднять высоту сбрасывания десятикилограммового груза. Высоты выбирались из списка, который установлен по ГОСТ 4545-88. Следующей высотой в списке обозначалось 70 см (таблица 5), на которой также не было зафиксировано ни одного взрыва. При дальнейшем повышении до 100 мм из 25 экспериментов не было обнаружено положительного результата (таблица 6), дальнейшее проведение экспериментов состояло на высоте 120 мм, на которой 5 из 25 экспериментов явился результативным (таблица 7). Серия не была закончена до конца, поскольку практического смысла не было. Для окфола-3,5, используемого в работе, нижний предел чувствительности составляет 100 мм, что в принципе согласуется с другими литературными данными [79, 35]. По методу критических давлений было проведено три серии экспериментов, согласно которым критическое давление инициирование составило 0,73 ГПа (таблица 8).

Таблица 3 – Частота взрыва окфола-3,5

№ Испытания	Взрыв/отказ
1	+
2	+
3	+
4	+
5	+
6	+
7	+
8	+
9	-
10	+

Таблица 4 – Исследование нижнего предела чувствительности окфола 3,5 при 50 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-					

Таблица 5 – Исследование нижнего предела чувствительности окфола 3,5 при 70 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-					

Таблица 6 – Исследование нижнего предела чувствительности окфола 3,5 при 100 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-					

Таблица 7 – Исследование нижнего предела чувствительности окфола 3,5 при 120 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	+					
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ										
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ										

Таблица 8 – Результаты экспериментов по методу критических давлений с окфолом-3,5

мг	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	0,1	20,16	0,73	0,036	0,098	+
20	0,13	24,38	0,88	0,056		+
30	0,2	15,94	0,58	0,054		+
40	0,27	20,16	0,73	0,090		+
50	0,32	38,44	1,02	0,146		-
60	0,41	19,22	0,69	0,122		-
70	0,46	18,28	0,49	0,094		-
80	0,5	25,78	0,69	0,141		-
90	0,59	15,94	0,42	0,099		-
100	0,65	22,03	0,59	0,148		-

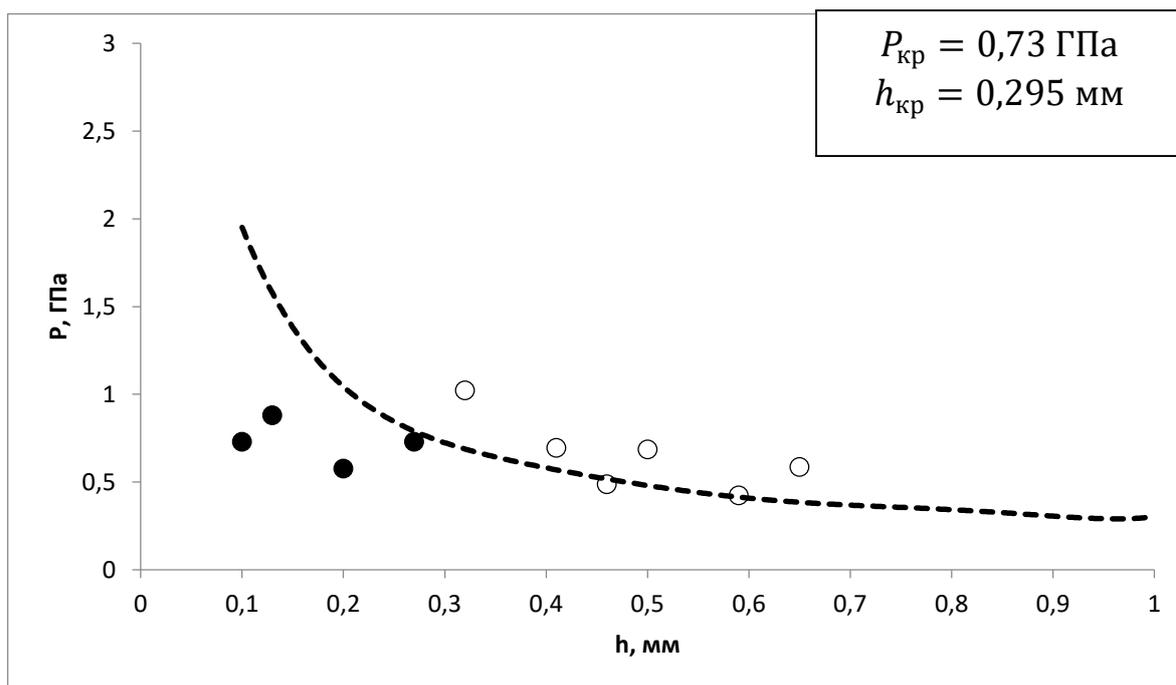


Рисунок 14 – Зависимость критического давления разрушения образцов от толщины таблетки окфола 3,5 (серия 1)

Для тротила ориентировочная частота взрыва в приборчике № 2 оказалось нулевой (таблица 9), соответственно первоначальной отчетной точкой служила высота 500 мм. На данной высоте не было зафиксировано ни одного взрыва (таблица 10), согласно рекомендациям ГОСТ, дальнейшие испытания не проводятся и нижний предел чувствительности остается четко неопределенным и используется довольно расплывчатая фраза «Нижний предел чувствительности к удару в приборе 2 испытуемого ВВ равен или более 500 мм». В данной работе мы решили выйти за пределы установленной предельной высоты. Начиная с 300 мм, согласно национальному стандарту, изменение высоты происходило с шагом 100 мм. По нашему мнению, такой шаг довольно велик, и принято решение взять шаг 50 мм. На высоте 550 мм. На 13 ударе произошла взрывная реакция, соответственно можно сделать вывод, что нижним пределом чувствительности является высота равная 500 мм (таблица 11). При определении чувствительности по методу критических давлений возникли определенные сложности. Из-за довольно узкого

диапазона толщин, критическая толщина таблетки приблизительно равна 0,1 мм, что соответствует довольно небольшие (5-20 мг) массы, при которых возможно зафиксировать «взрывы» некоторые серии экспериментов полностью состояли из «отказов». Результатом было определено критическое давление 1,1 ГПа (таблица 12).

Таблица 9 – Частота взрыва тротила

№ Испытания	Взрыв/отказ
1	-
2	-
3	-
4	-
5	-
6	-
7	-
8	-
9	-
10	-

Таблица 10 – Исследование нижнего предела чувствительности тротила при 500 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-					

Таблица 11 – Исследование нижнего предела чувствительности тротила при 550 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	+							
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ										

Таблица 12 – Результаты экспериментов по методу критических давлений с тротилом (серия 1)

мг	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	0,1	33,75	0,88	0,043	0,060	-
20	0,17	39,38	1,02	0,083		-
30	0,33	19,22	0,50	0,073		-
40	0,4	15	0,39	0,067		-
50	0,36	13,13	0,34	0,054		-
60	0,51	8,44	0,22	0,046		-
70	0,56	13,13	0,34	0,077		-
80	0,59	10,31	0,26	0,063		-
90	0,59	6,56	0,17	0,040		-
100	0,73	7,97	0,20	0,057		-

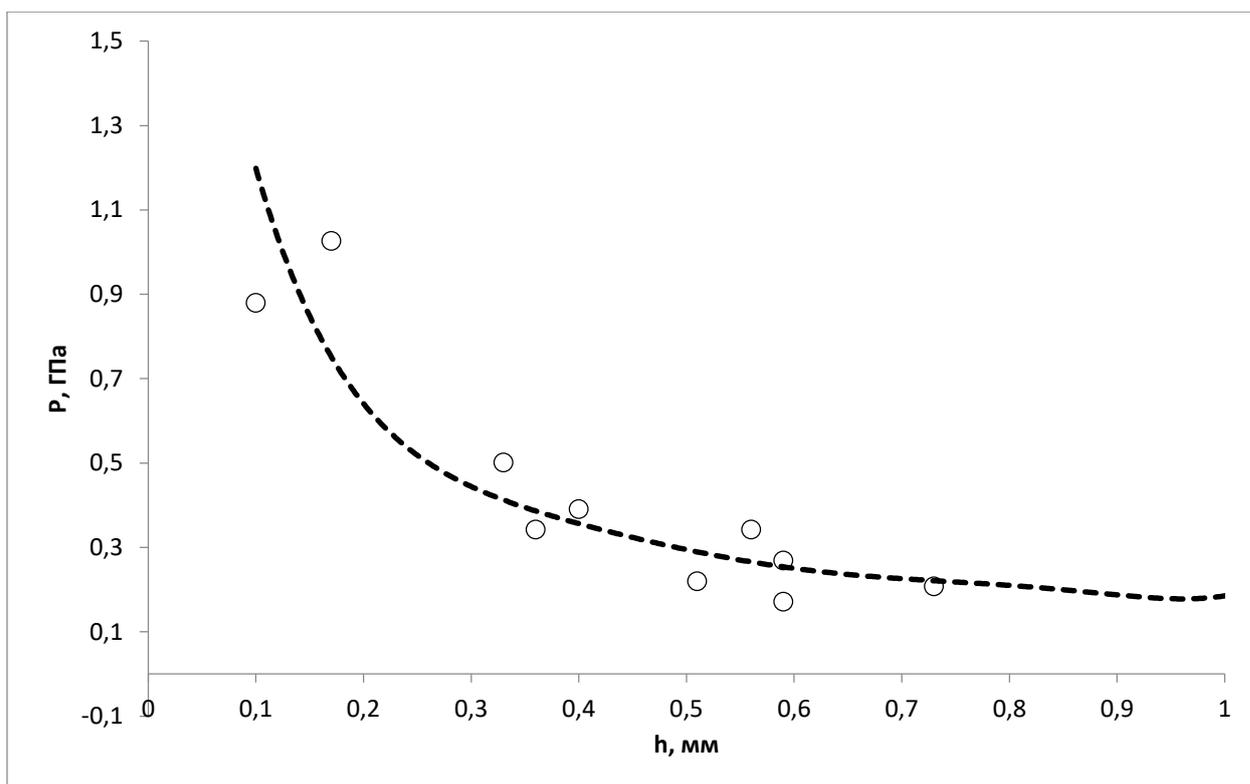


Рисунок 15 – Зависимость критического давления разрушения образцов от толщины таблетки тротила (серия 1)

Таблица 13 – Результаты экспериментов с тротилом (серия 2)

мг	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	0,09	33,75	1,08	0,048	0,073	-
20	0,19	39,38	1,27	0,114		-
30	0,27	19,22	0,62	0,076		-
40	0,29	15	0,48	0,063		-
50	0,39	13,13	0,42	0,071		-
60	0,47	8,44	0,27	0,053		-
70	0,56	13,13	0,42	0,095		-
80	0,6	10,31	0,33	0,079		-
90	0,66	6,56	0,21	0,054		-
100	0,77	7,97	0,26	0,073		-

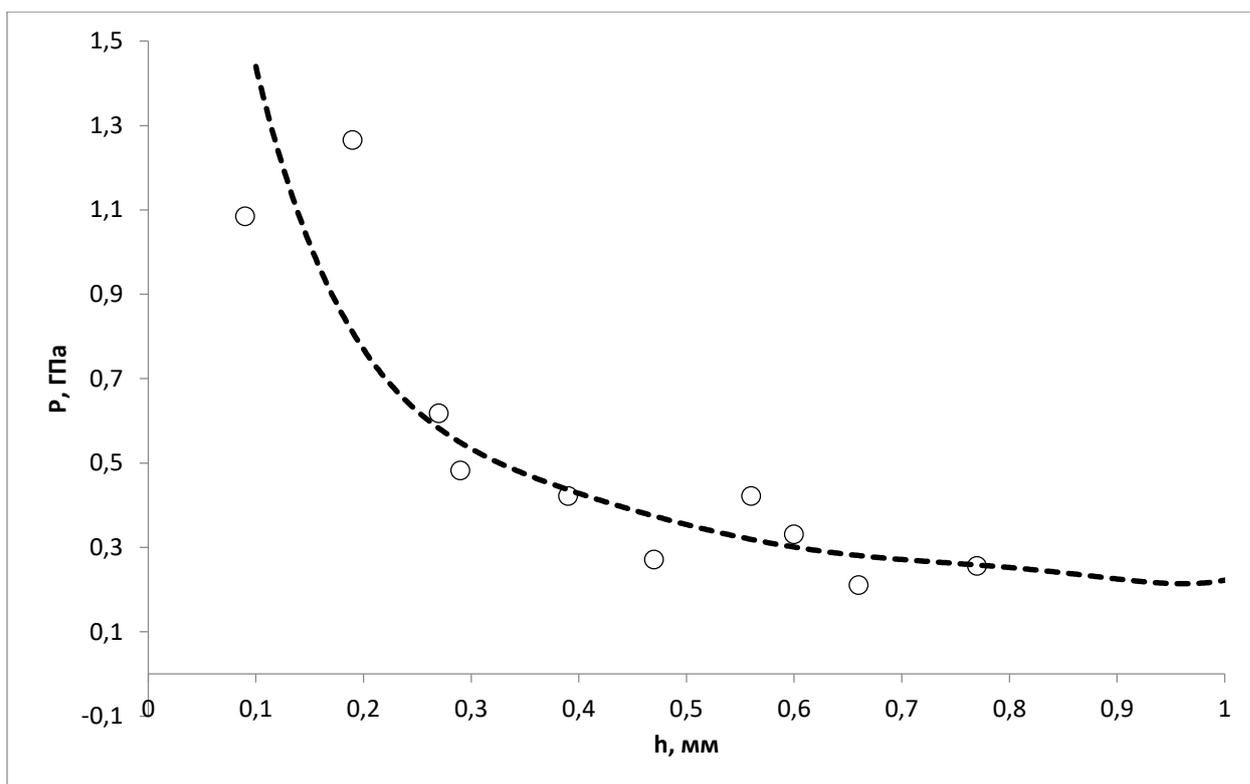


Рисунок 16 – Зависимость критического давления разрушения образцов от толщины таблетки тротила (серия 2)

При работе с аммиачной селитрой частота взрывов, как в случае и с тротилом, оказалась нулевой (таблица 14). Серия экспериментов с полуметровой высотой оказалась состоящей полностью из отказов (таблица 15). С шагом в 50 мм до высоты 600 мм, далее шаг был увеличен до 100 мм. Серии продолжались до 800 мм (таблицы 16-19), где также не было зафиксировано ни одного взрыва. Дальнейшее повышение высоты оказалось затруднительным из-за возможностей копра, поэтому было принято решение остановиться. Критические параметры инициирования чистой аммиачной селитры также остались неопределенными, поскольку при проведении многочисленных серий экспериментов не удалось получить ни одного «взрыва». Можем только утверждать, что критическое давление инициирования находится выше 3,2 ГПа (таблица 20). В отличие от других исследуемых веществ, для аммиачной селитры создавались таблетки небольшой толщины ( $h < 0,1$ ). Это было вызвано тем, что критическая толщина имеет обратную связь с критическим давлением, соответственно критическая

толщина должна иметь малую величину. При этом существует пороговая толщина, при которой инициирование заряда не происходит в принципе. Анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод, что для аммиачной селитры пороговое значение толщины довольно велико и находится в диапазоне 0,1-0,13 мм. В дальнейших экспериментах фиксируется разрушение таблетки, однако оно не является взрывчатым. В условиях имеющего оборудования невозможно инициировать чистую аммиачную селитру. Следует отметить, что при данных экспериментах использовалась гранулированная аммиачная селитра марки Б, соответствующая ГОСТ 2-2013, производства Уралхим.

Таблица 14 – Частота взрыва аммиачной селитры

№ Испытания	Взрыв/отказ
1	-
2	-
3	-
4	-
5	-
6	-
7	-
8	-
9	-
10	-

Таблица 15 – Исследование нижнего предела чувствительности аммиачной селитры при 500 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-					

Таблица 16 – Исследование нижнего предела чувствительности аммиачной селитры при 550 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ										

Таблица 17 – Исследование нижнего предела чувствительности аммиачной селитры при 600 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ										

Таблица 18 – Исследование нижнего предела чувствительности аммиачной селитры при 700 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ										

Таблица 19 – Исследование нижнего предела чувствительности аммиачной селитры при 800 мм

№ исп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Взрыв/отказ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ исп.	21	22	23	24	25					
Взрыв/отказ										

Таблица 20 – Результаты экспериментов с аммиачной селитрой (серия 1)

мг	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа	Взрыв/отказ
2	0,04	90	2,60	0,05	0,087	-
5	0,08	90	2,60	0,10		-
8	0,13	85,78	2,48	0,16		-
10	0,1	92,34	2,67	0,13		-
20	0,18	23,44	0,68	0,06		-
30	0,23	26,25	0,76	0,08		-
40	0,33	22,97	0,66	0,10		-
50	0,35	22,97	0,66	0,10		-
60	0,45	14,06	0,41	0,08		-
70	0,52	16,88	0,49	0,10		-

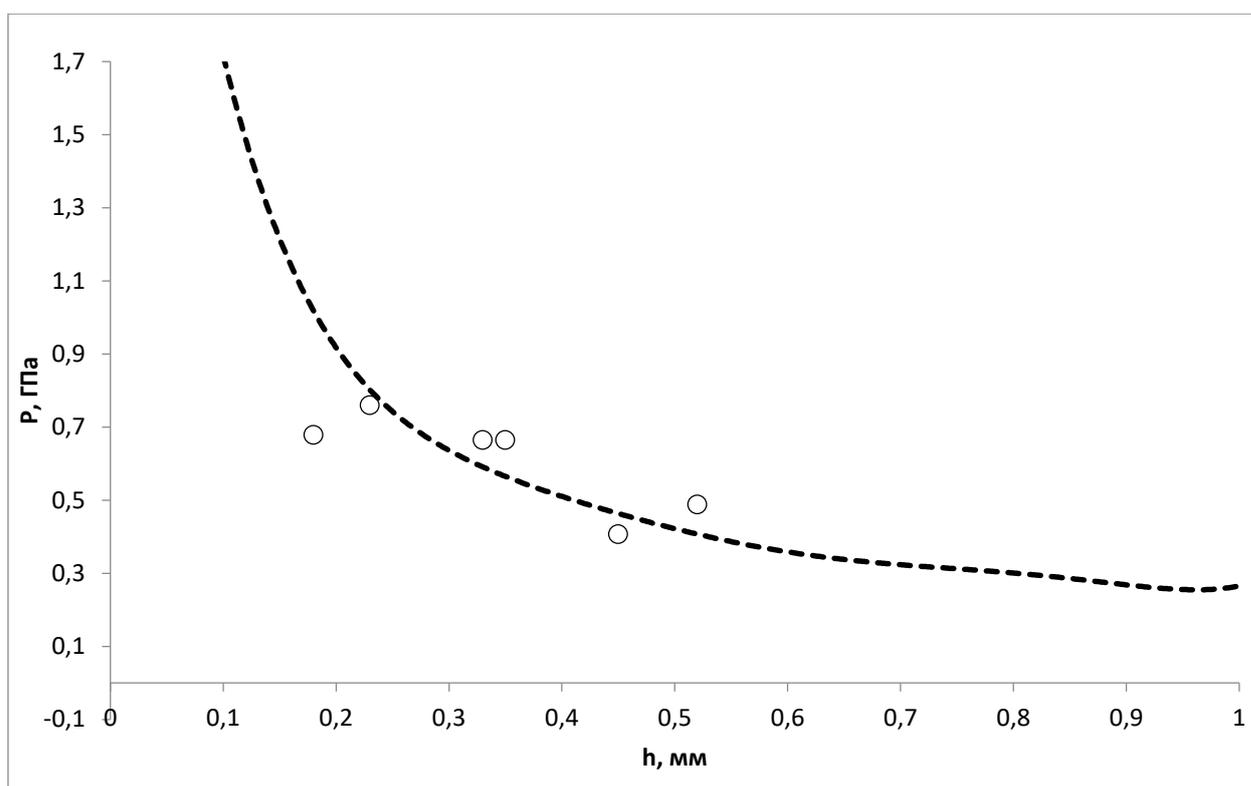


Рисунок 17 – Зависимость критического давления разрушения образцов от толщины таблетки аммиачной селитры (серия 1)

Таблица 21 – Результаты экспериментов с аммиачной селитрой (серия 2)

мг	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа	Взрыв/отказ
2	0,04	89,53	2,49	0,051	0,046	-
5	0,08	90,94	2,53	0,101		-
8	0,14	90,94	2,53	0,171		-
10	0,13	88,59	2,46	0,156		-
20	0,18	30	0,83	0,071		-
30	0,23	19,22	0,53	0,057		-
40	0,32	11,72	0,33	0,046		-
50	0,36	7,97	0,22	0,035		-
60	0,45	6,09	0,17	0,032		-
70	0,53	5,63	0,16	0,034		-

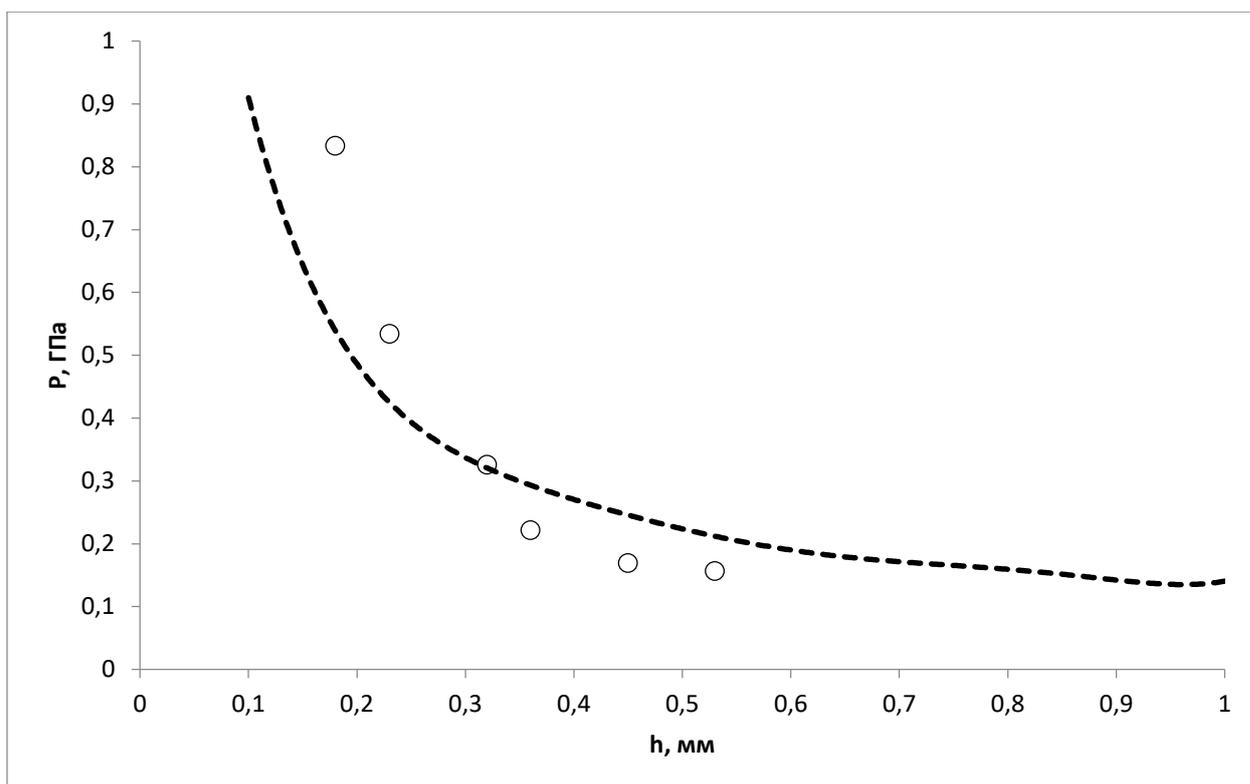


Рисунок 18 – Зависимость критического давления разрушения образцов от толщины таблетки аммиачной селитры (серия 2)

При сравнении полученных показателей чувствительности к удару необходимо перейти к общей величине. Принято решение вести пересчет на единицы давления. Согласно общему представлению в мире: давления представляет собой единицу силы, приложенную перпендикулярно к единице площади. Площадь поверхности роликов известна и составляет  $78,5 \text{ мм}^2$ . Силу, действующую на вещество согласно [79] можно выразить как произведение энергии удара ( $E$ ) на жесткость копра ( $k$ ). Для используемого копра значение жесткости составляет  $0,33 \text{ ГН/м}$ . Энергия, возникающая в момент работы, полностью является кинетической. Однако в связи со скоротечностью самого эксперимента экспериментально определить скорость становится проблематично. Поэтому мы вводим допущение, что потеря энергии на скольжения по направляющим копра, преодоления их шероховатости и сопротивления воздуха пренебрежимо малы. Соответственно вся потенциальная энергия, зависящая от высоты сбрасывания и массы груза, переходит в кинетическую и рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{нп}} = Mgh_{\text{нп}}, \text{ где} \quad (8)$$

$E_{\text{нп}}$  – энергия, развиваемая зарядом ВВ при сбрасывании на него груза с высоты нижнего предела чувствительности, Дж;  $M$  – масса груза, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H_{\text{нп}}$  – высота нижнего предела чувствительности взрывчатого вещества, м.

Произведя расчеты по полученным экспериментальным данным с индивидуальными взрывчатыми веществами, энергии удара для окфола-3,5 и тротила составляют 9,8 Дж и 49 Дж соответственно.

Далее рассчитываем по формуле давление удара, реализуемое при сбрасывании груза с высоты нижнего предела чувствительности:

$$P_{\text{нп}} = (E_{\text{нп}} \cdot k)^{1/2} / S, \text{ где} \quad (9)$$

$P_{\text{нп}}$  – давление разрушения образцов ВВ, Па;  $E_{\text{нп}}$  – энергия, развиваемая зарядом ВВ при сбрасывании на него груза с высоты нижнего предела чувствительности, Дж;  $k$  – механическая жесткость копра, Н/м;  $S$  – площадь соударения роликов, м<sup>2</sup>.

Подставляя все известные значения в формулу (8) получаем значения для окфола равное 0,72 ГПа, и для тротила – 1,12 ГПа.

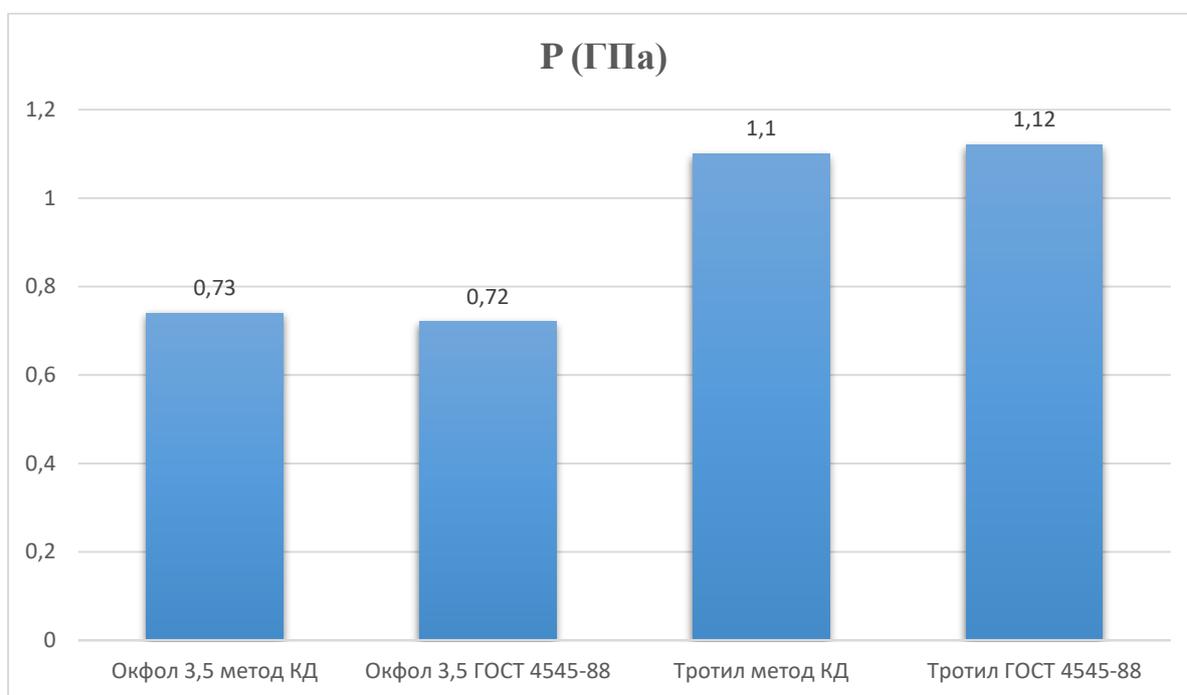


Рисунок 19 – Сравнение критического давления инициирования индивидуальных веществ со сравнением пересчитанных значений, исходя из нижнего предела чувствительности

При сравнении полученных значений заметно, что полученные значения по пересчету исходя из данных, полученных по стандартизированному методу, практически полностью совпадают с критическими давлениями инициирования. Погрешности рассчитывались с условиями, что данные, полученные по ГОСТ, являются более точными составляют 1,39% для окфола-3,5 и 1,79 для тротила.

$$\Delta = \frac{|0,72 - 0,73|}{0,72} \cdot 100\% = 1,39 \%$$

$$\Delta = \frac{|1,12 - 1,1|}{1,12} \cdot 100\% = 1,79 \%$$

Для подтверждения расчета проведены расчеты с другими известными индивидуальными ВВ, сведения о чувствительности которых опубликованы в литературе. При поиске возникло две трудности: метод критических давлений довольно специфичный и широкого применения не сыскал. Возможно, это связано со стремлением исследователей придерживаться признанных на государственном уровне методов. Вторая причина заключается в ограничении ГОСТом высоты испытаний в 500 мм. Для веществ, у которых нижним пределом чувствительности указана данная высота, расчеты могут оказать неприменимы, поскольку настоящая высота нижнего предела чувствительности может оказаться несколько выше, при этом дальнейших поисков высоты более полуметра практически не проводится. Яркой иллюстрацией может служить хорошо исследованная литература. В справочных данных [35] и в нормативных документах [213] указаны сведения, что нижний предел чувствительности не менее 500 мм. При этом, ссылаясь на эксперименты, проведенные в данной работе, нижней предел находится на высоте не менее 800 мм, что на 60% превышает высоту, встречаемую в литературе. В итоге, среди веществ, для которых есть данные как по методу критических давлений, так и по методу определения нижнего предела чувствительности отобраны ТЭН, гексоген и перхлорат аммония (ПХА). Обобщенные данные представлены в таблице 22:

Таблица 22 – Сведения о чувствительности некоторых индивидуальных веществ

	Высота нижнего предела чувствительности, мм	$P_{кр}$ (литературное), ГПа
ТЭН	50	0,49
Гексоген	70	0,7
ПХА	130	0,85

Пересчет на единицы давления и сравнения показателей представлены на рисунке 20. При анализе заметно, что для ТЭНа и ПХА данные с малой погрешностью совпадают. Для гексогена заметно расхождение довольно существенное. Погрешность составляет 14,75%. Такое расхождение может быть вызвано несколькими факторами: эксперименты по методу критических давлений и методам ГОСТ проводились в различных условиях с различными образцами ВВ. Возможно использовались различные марки гексогена с различной дисперсностью, что повлияло на результаты и расхождения в чувствительность. Не стоит исключать и возможность человеческой неточности при пробоподготовки и проведения эксперимента. Еще одной причиной возможно использование копров различных марок или различного состояния, что повлияло непосредственно на результаты экспериментов.

$$\Delta = \frac{|0,61 - 0,7|}{0,61} \cdot 100\% = 14,75 \%$$

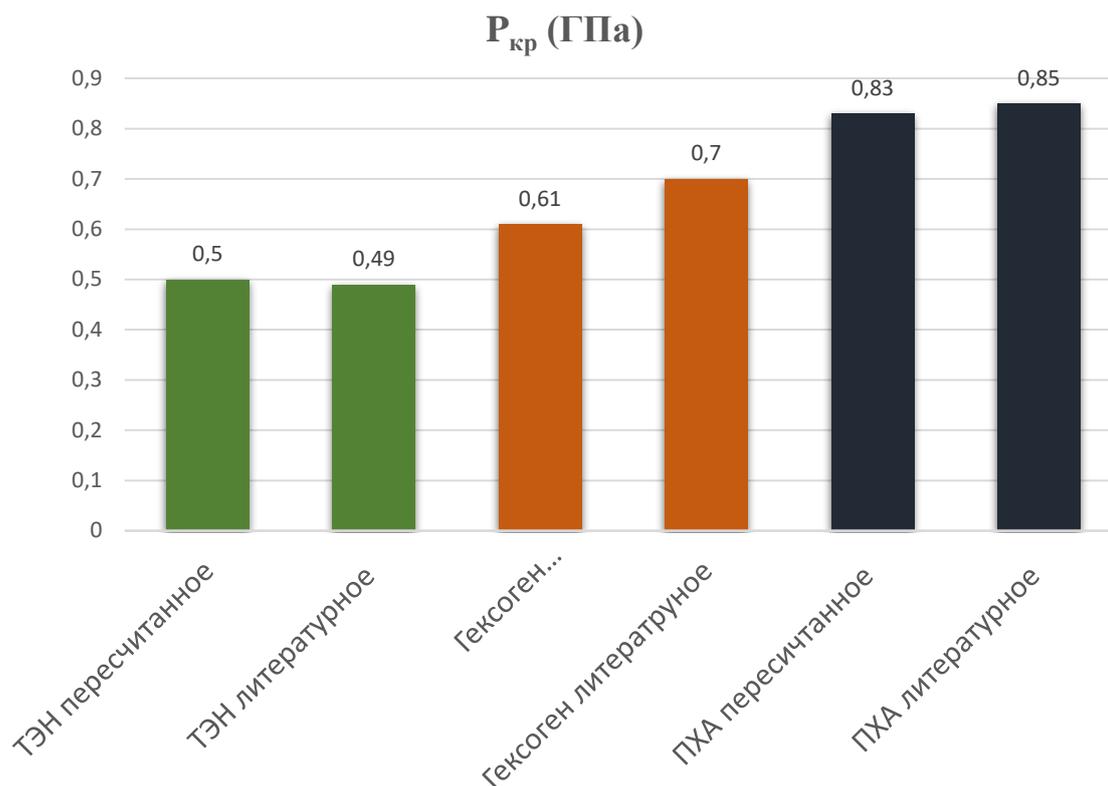


Рисунок 20 – Сравнение литературных и пересчитанных значений критического давления инициирования для индивидуальных энергонасыщенных веществ

В целом можно сделать вывод о том, что данные, получаемые по методу критических давлений, сходятся с данными по стандартизированному методу определения нижнего предела чувствительности к удару и могут восприниматься в качестве одного из показателей чувствительности к удару.

#### 4.2 Влияние флегматизирующей добавки на чувствительность смесей окфола-3,5 с горючими добавками

Окфол-3,5 представляет собой одну из модификаций октогена, в состав которого входит 3,5 процента пластификатора, зачастую воска, фторпласта, парафина или церезин-стеаринового сплава. В связи с этим мощность вещества несколько снижается, например скорость детонации снижается до 8650 м/с. Это связано с тем, что энергия дополнительно расходуется на сжатие, разгон и разогрев флегматизирующей добавки. Помимо характеристик, отвечающих за мощность энергонасыщенных веществ, снижается и показатель чувствительности к механическим воздействиям. Нижний предел чувствительности к удару для октогена составляет 70 мм, а окфола-3,5 – 100 мм, что в том числе позволяет его перевозить согласно требованиям технического регламента таможенного союза ТР ТС 028/2012 без дополнительных условий. Критическое давление инициирования для чистого высокоэнергетического вещества составляет 0,6 ГПа, его флегматизированной версии – 0,73 ГПа.

Горючие добавки, которые представлены в работе оксидами металлов, алюминиевыми порошками оказывают сенсibiliзирующее воздействие на высокоэнергетические вещества. При этом не совсем очевидно, насколько большой эффект они окажут при взаимодействии с флегматизаторами. Предположительно воздействие внедренного в состав пластификатора может если не нивелировать, то снизить параметры чувствительности в смеси типа «энергонасыщенное вещество – горючая добавка». Для проверки влияния флегматизирующего компонента проводились сравнения между критическими давлениями инициирования бинарных смесей октогена с горючей добавкой и окфолом-3,5 с горючей добавкой. В качестве сенсibiliзирующего компонента был выбран оксид меди (II). Выбор оксидов проводился на основании физических характеристик, влияющих на процесс

возбуждения взрывной реакции, а именно теплоемкость и теплопроводность.

Данные параметры представлены в таблице 23

Таблица 23 – Физические характеристики оксидов металлов

	Ср Дж/Моль*К)	теплопроводность Вт/(м*К)	плотность г/см <sup>3</sup>
CuO	42,3	78	6.315
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	103.76	0,8	5,242
TiO <sub>2</sub>	55.3	10	4.235
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	127.7	4	3.34

Согласно вышеизложенным данным оксид меди (II) обладает наименьшей теплоемкостью и наибольшей теплопроводностью, что говорит о том, что этот оксид может наиболее благоприятно влиять на разогрев и распространение тепла по исследуемому веществу. Испытания проводились в разном соотношении компонентов. Результаты приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Критические давления инициирования смесей октогена и окфола-3,5 с оксидом меди (II)

Содержание оксида меди в смеси $\alpha$ , масс.%	Критическое давление инициирования смесей, ГПа	
	окфол-3,5 + CuO	октоген+CuO
0	0,73	0,59
2	0.35	0.33
5	0.37	0.37
10	0,40	0,37
20	0,42	0,38
30	0,44	0,37
40	0,42	0,38
50	0,45	0,39

При анализе полученных значений заметно, что при использовании чистого октогена в смесях показатели критического давления инициирования

несколько ниже по сравнению с аналогичными показателями его флегматизированной вариации. Однако данное различие может быть объяснена инструментальной и расчетной погрешностью, которая может достигать до 10%. При этом при небольших количествах модификатора горения различия не заметны.

На основании полученных результатов полученная графическая зависимость критического давления инициирования от содержания оксида меди (II), представленная на рисунке 21

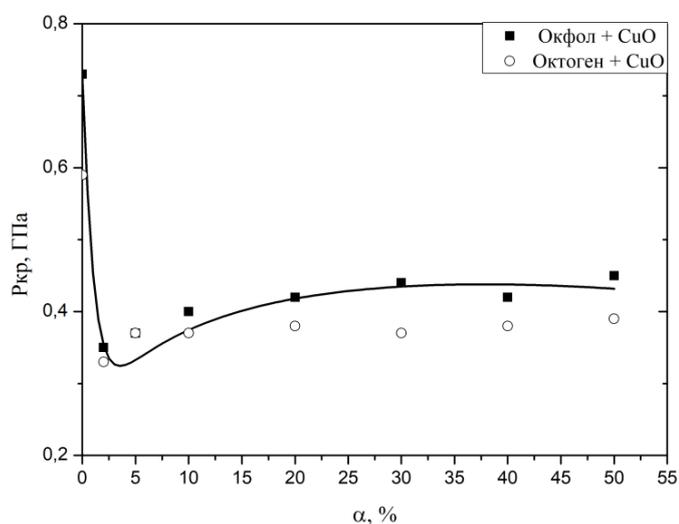


Рисунок 21 – Зависимость критического давления от содержания оксида меди (II) в смеси.

По рисунку 21 заметно, что качественных различий между двумя анализируемыми составами нет. Количественные показатели с учетом погрешности погрешностей, возникающих во время копровых испытаний, также имеют удовлетворительную сходимость. Такое несущественное различие между составами с окфолом-3,5 и октогеном говорит о том, что пластификатор не оказывает флегматизирующее воздействие в смесях с модификатором горения. Это может быть вызвано тем, что количества тепла, которое передается от частиц оксида меди (II) системе сопоставимо с

необходимыми дополнительными затратами тепловой энергии на разогрев, сжатие и разгон высокоэнергетического вещества. За счет этого пластификатор при высоких температурах, возникающих во время экспериментов, в самом начале процесса расплавляются, что позволяет говорить о том, что происходит реакции уже «чистого» октогена с разогретым оксидом меди (II).

## 5. Чувствительность промышленных высокоэнергетических веществ

В Российской Федерации объем использования и производства промышленных взрывчатых веществ на 2023 год составляет 2591 тысяч тонн, из которых практически 80 % изготавливается на местах. С одной стороны, такое количество значительно уменьшает риски возникновения аварий с отсутствием необходимости транспортировать опасные вещества. Однако количество аварий непосредственно на местах в процессе смешения компонентов также велико.

Основной компонент промышленных ВВ – аммиачная селитра (нитрат аммония). Для потребностей горной промышленности энергии взрыва индивидуального нитрата аммония недостаточно. Наиболее распространённые составы ВВ содержат нефтепродукты, которые отличаются дешевизной и доступностью, например, дизельное топливо (ДТ, соответственно – смесь АСДТ). В то же время данный состав имеет ограниченную мощность, что особенно важно при использовании смеси в подземной выработке. Для увеличения энергии взрыва используют различные энергетические добавки, среди которых наиболее распространённой является дисперсный алюминий (порошки, пудры), что позволяет приблизиться к мощности сопоставимой с мощностью тротила. Наиболее актуальны алюминизированные составы при ведении подземных горных работ, где необходима повышенная мощность, которую классические составы АСДТ не могут предложить. Алюминизированные гранулиты производятся как предварительно на специализированных заводах, так и непосредственно на местах ведения взрывных работ. В обоих случаях первично происходит механическое смешение аммиачной селитры с жидким нефтепродуктом (ДТ, масла минеральные), а затем с алюминиевым порошком. Объем производства алюминизированных промышленных составов довольно велик: *ОАО «ЗФ «Норильский никель»* до 6 000 т/год, Казахстана - до 10 000 т/год, а также *АО «РДМ»* – до 3 000 т/год что говорит о большой востребованности данного вида гранулитов.

Заряжание таких ВВ во взрывные полости (шпуры) осуществляют, как правило, с помощью сжатого воздуха – пневмозаряжания, при котором в результате соударений происходит частичное разрушение исходных гранул ВВ и увеличение плотности заряда. Взрывчатые вещества при пневмозаряжании подвергается дополнительным внешним воздействиям, наиболее проблемными из которых являются соударение гранул между собой и стенками шпура, трение и электризация, что может приводить к возникновению аварийных ситуаций. Соответственно в рамках задач представляемой работы выполнена оценка влияния дисперсных добавок на чувствительность смесей типа АСДТ к механическим воздействиям, в частности, к удару.

### 5.1 Чувствительность смесей аммиачной селитры с алюминием различной дисперсности

Результаты смесей гранулированной аммиачной селитры с алюминием представлены в таблице 24 и графически на рисунке 22. Результаты по критическим параметрам чувствительности для отдельных смесей и соответствующие им прочностные кривые представлены в приложении 1.

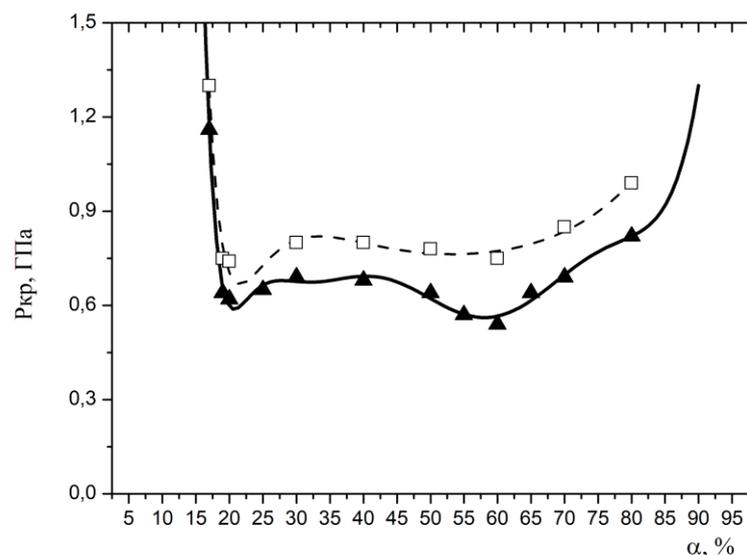


Рисунок 22 – Параметры инициирования смесей аммиачной селитры с алюминием различной дисперсности (▲ - 0,1 мкм; □ - 8 мкм;)

Таблица 25 – Критическое давление инициирования для простейших гранулитов с алюминием различной чувствительности

Содержание алюминия в смеси $\alpha$ , масс.%	Критическое давление инициирования смесей AC+al, ГПа	
	Alex (размер частиц 0,1 мкм)	АСД-4 (размер частиц 8 мкм)
0	-	-
15	-	-
17	1,16	1,30
19	0,64	0,75
20	0,62	0,74
30	0,69	0,80
40	0,68	0,80
50	0,64	0,78
60	0,54	0,75
70	0,68	0,85

Чистая аммиачная селитра, а также смеси, содержащие до 15% алюминия, не взрываются в условиях проводимых экспериментов, что делает невозможным определение критических параметров, поскольку энергии удара недостаточно для возбуждения взрывной реакции. Мы можем только утверждать, что значение критического давления превышает 2,5 ГПа. Заметна существенная инициация смесей при приближении к стехиометрической смеси компонентов ( $\approx 18\%$ ).

При анализе полученных зависимостей становится очевидно, что качественного изменения хода зависимостей при изменении размера частиц нет, что говорит об однотипности механизмов сенсбилизации аммиачной

селитры. Механизм возбуждения аммиачной селитры не так однозначен по сравнению с аналогичными смесями окфола-3,5, поскольку аммиачная селитра за счет избыточного содержания кислорода в своей структуре является окислителем, а алюминий – топливом. При обычных условиях реакция между ними не будет бурно протекать, за счет оксидной пленки, покрывающей частицы металлического порошка. Однако во время процессов, происходящих в момент удара и в его последствии, механическая энергия от удара, трения вещества о поверхности роликов переходит в тепловую энергию, которая хоть и частично, но разрушает оксидную пленку. В то же время аммиачная селитра в связи с нейтральностью проходящего процесса распадается не только на азот и пары воды, но и на различные радикалы, в том числе и большое количество кислородосодержащих радикалов, к которым можно отнести ионизированные оксиды и тому подобное, обладающих небольшой энергией активации. В результате активный алюминий вступает в химическое взаимодействие с данными радикалами, в следствии чего выделяется дополнительная тепловая энергия, позволяющая продолжить протекание реакции на протяжении всего заряда смеси. При этом возможен и другой механизм возбуждения взрыва, а именно фрикционный разогрев частиц, который говорит о том, что в ходе трения о твердые механические поверхности во время радиального разлета в следствии удара происходит сильный разогрев частиц алюминия, создающие большое количество «горячих точек», где создается большое количество тепловой энергии, передающейся аммиачной селитре, что в разы увеличивает скорость ее разложения. В таком случае, в отличие от основных понятий протеканий процессов «окислитель-горючее» инициирующее воздействие оказывает не селитра, являющаяся окислителем, а топливная добавка, представленная алюминием в данной смеси. Однозначно говорить, какой из этих механизмов является основной затруднительно, следует считать, что оба из них вносят свой вклад. При небольших концентрациях, особенно при стехиометрических концентрациях, химическое взаимодействие вносит наибольший вклад. При увеличении

добавки более 30% - основной вклад вносит уже механизм фрикционного разогрева частиц.

Количественно же, также как в случае и со смесями с окфолом-3,5, сенсibiliзирующий эффект при уменьшении размера частиц до наноразмерная возрастает. Это заметно на всем диапазоне концентраций компонентов. Уменьшение критического давления инициирования происходит на 11-16 % при небольших концентрациях (до 40%) и до 28% при больших концентрациях добавки.

Поскольку при рассмотрении вопроса об использовании аммиачной селитры важно обращать внимание на ее структуру. Помимо гранулированного нитрата аммония особое внимание требует и пористый аналог. В взрывчатых составах такая селитра проявляет себя эффективнее по сравнению с гладкой. На основе простейших гранулитов (AC+Al) были рассмотрены их чувствительность к удару по ГОСТ 4545-88. Метод критических давлений не применялся, поскольку в данном случае проводили приблизительную оценку чувствительности к удару при помощи сравнения частотей составов. Были выбраны смеси с 15-ти и 18-ти процентным содержанием металлической добавки. Первое содержание выбрано исходя из того, что в данных соотношениях не удалось определить критические параметры инициирования, что говорит о нечувствительности смесей. Второе соотношение обусловлено стехиометрией системы. Дальнейшее увеличение содержания алюминия в данных экспериментах не проводилось, поскольку на практике дальнейшее увеличение практически не используется. Использовался в составах алюминий марки Alex из-за наибольшей сенсibiliзирующей способности. Данные представлены в таблице 25.

Нулевая частота при 15-ти процентном содержании, у обоих типов селитры подтверждает полученные ранее результаты о чувствительности по методу критических давлений. При этом заметна существенная сенсibiliзация при стехиометрических концентрациях компонентов. Что говорит о том, что структура селитры играет ключевую роль на

чувствительность простейших алюминизированных составов. Частота взрывов возрастает в 5,5 раз (таблица 26).

Таблица 26 – Частота взрывов смесей аммиачной селитры с наноразмерным алюминием

Состав	Частота взрывов
АС (гр)+н-Al (15%)	0%
АС (пор)+ н-Al (15%)	0%
АС (гр)+ н-Al (18%)	8%
АС (пор)+ н-Al (18%)	44%

Для возможного объяснения природы такой существенной сенсibilизации состава были сделаны микрофотографии составов с гранулированной и пористой аммиачной селитрой с алюминием. На них заметно, что частицы гранулированной селитры с алюминием на 2 порядка крупнее по сравнению с смесями, где использована пористая селитра. При механическом смешивании компонентов, наноразмерный алюминий создает большую площадь контакта с пористой аммиачной селитрой за счет более разветвленной структуры нитрата аммония. Это приводит к образованию большей площади контактов горючего и окислителя, способствующего более активной передаче энергии, направленной на возбуждение взрывной реакции. (рисунок 23, 24)

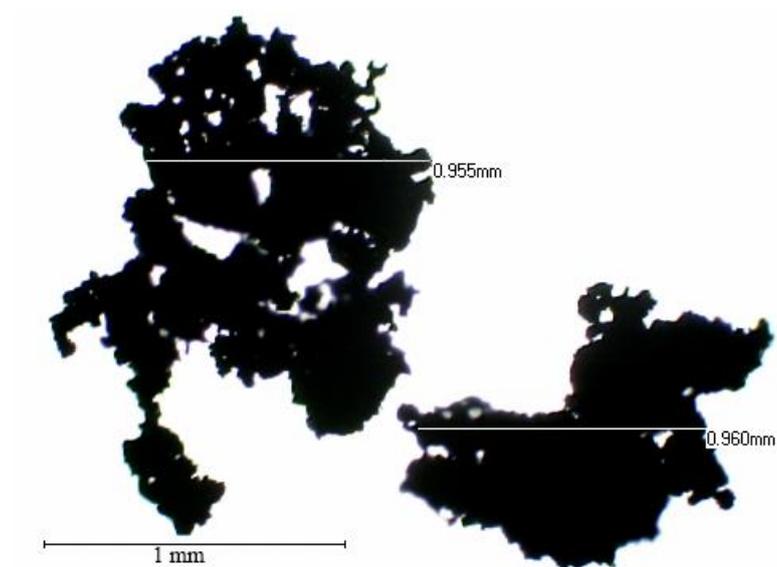


Рисунок 23 – Микрофотографии смесей аммиачной селитры с алюминием марки АСД-4

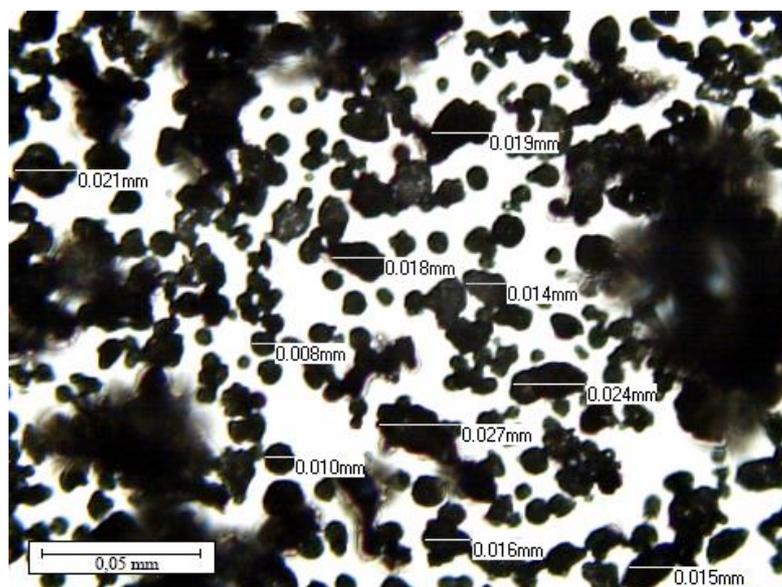


Рисунок 24 – Микрофотографии смесей аммиачной селитры с алюминием марки Alex

## 5.2 Чувствительность составов аммиачной селитры с использованием вторичного алюминия

Современные мировые тенденции состоят в использовании вторичного алюминия вместо первичных порошков алюминия. Данное решение обусловлено как экономической выгодой, так и улучшением экологической обстановки. Использование порошка, полученного путем переработки уже использованного алюминия, позитивно сказывается и в вопросе безопасности. При использовании промышленного алюминия неоднократно случались аварии, сопровождавшиеся материальными потерями и человеческими жертвами [214,215], в то время как при применении вторичного алюминия для производства алюмосодержащих гранулитов на территории стран Таможенного Союза не зафиксировано, что может быть вызвано уменьшением доли активного алюминия в используемых порошках: в составе первичного алюминия массовый процент активного вещества не ниже 98 %, для вторичного алюминия – от 75 до 95 %.

При этом нельзя исключать вероятности возникновения нежелательного срабатывания, для чего необходимо понимать уровень опасности к внешним механическим воздействиям, которым подвергаются составы при производстве и при зарядании. Технология производства гранулитов с использованием переработанного алюминия принципиально не отличается от технологии производства гостированных рецептур.

В работе исследовались три марки вторичного алюминия: АГП 80, АГП 250, АГП 450. Данные виды алюминиевых порошков производились механическим измельчением лома алюминиевой фольги и в пищевого алюминия, изготовленного по ГОСТ 745-2003. Производство проводилось по опыту зарубежных методик с учетом необходимости производства более безопасного продукта. Для образования защитного слоя и предотвращения разогрева частиц алюминия в атмосфере воздуха, производят пассивацию.

Полученные марки порошков имеют некоторое преимущество над марками первичного алюминия, так как частицы имеют более развитую структуру.

При рассмотрении влияния на чувствительность к удару гранулитов рассматривались три марки порошков: АГП 450, АГП 250 и АГП 80. Для рассмотрения чувствительности к удару был выбран состав гранулита АС-8. Чувствительность к удару определялась на основе частоты взрывов, поскольку этот параметр представлен в ГОСТ 21987-76 «Вещества взрывчатые промышленные. Гранулиты. Технические условия». Для гранулита, в котором использовался порошок марки АГП-450 частота составила 0 %, с маркой АГП-250 – 16 %, с маркой АГП-80 – 20 %. С учетом погрешности эксперимента можно говорить об одинаковой чувствительности для гранулитов АГП-250 и АГП-80. При этом параметр, установленный ГОСТ, составляет 0–12 %. Превышение относительно стандартного состава может быть вызвано более развитой структурой частиц алюминия, за счет чего происходит более активный разогрев частиц, что может привести к более интенсивному разрушению пассивированной оксидной пленки, за счет чего образующиеся кислородосодержащие радикалы лучше вступают в реакцию с образовавшимся активным алюминием. Результаты частоты взрывов для гранулитов с использованием вторичного алюминия показывают, что уровень опасности возникновения взрыва сопоставим с тем же составом, но с использованием первичного порошка алюминия.

Для проверки влияния пассивированной оксидной пленки проводилась активация алюминия растворением порошков в сантимолярном растворе серной кислоты. Полученные данные по сравнению с неактивированными порошками представлена в таблице 27:

Таблица 27 – Сравнение частоты взрывов алюминиевых порошков с различным характером

Характер алюминия	Частота гранулирования АС-8, %		
	АГП-450	АГП-250	АГП-80
Неактивированный	0	16	20
Активированный	0	20	20

Из данных, приведённых в таблице, видно, что активированные порошки показывают аналогичную частоту по сравнению с теми же марками с оксидной пленкой. Это может говорить о том, что пассивированная оксидная пленка практически полностью разрушается при разогреве частиц и контакт продуктов распада аммиачной селитры возникает с активным алюминием.

## 6. Чувствительность к удару мощных высокоэнергетических веществ

### 6.1 Чувствительность смесей окфола-3,5 с алюминием различной дисперсности

Полученные критические параметры инициирования представлены в таблицах 28-31 и на рисунках 25-28. Результаты по критическим параметрам чувствительности для отдельных смесей и соответствующие им прочностные кривые представлены в приложении 1.

Таблица 28 – Критические параметры инициирования смеси октоген/АСД-4

Содержание Al в смеси $\alpha_{Al}$ , масс. %	Критическая толщина $h_{кр}$ , мм	Критическое давление $P_{кр}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{ср}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,455	0,51	98
20	0,53	0,46	72
30	0,485	0,53	106
40	0,345	0,65	99
50	0,435	0,63	117
60	0,49	0,57	115
70	0,585	0,69	160
80	0,53	0,71	154
90	0,365	1,47	234

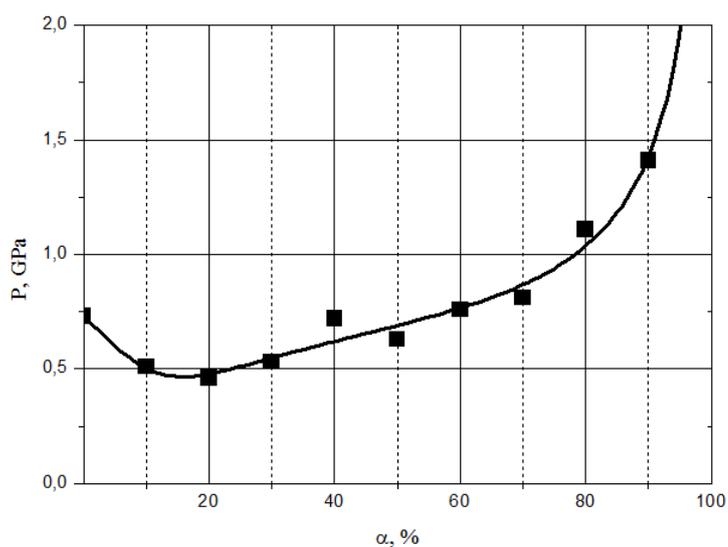


Рисунок 25 – Зависимость критического давления инициирования от количества алюминия в смеси октоген/АСД-4

Таблица 29 – Критические параметры инициирования смеси октоген/АСД-1

Содержание Al в смеси $\alpha_{Al}$ , масс. %	Критическая толщина $h_{кр}$ , мм	Критическое давление $P_{кр}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{ср}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,365	0,49	77
20	0,455	0,43	82
30	0,435	0,46	85
40	0,325	0,56	81
50	0,275	0,58	73
60	0,495	0,58	119
70	0,365	0,67	106
80	0,275	0,71	88
90	0,37	1,01	163

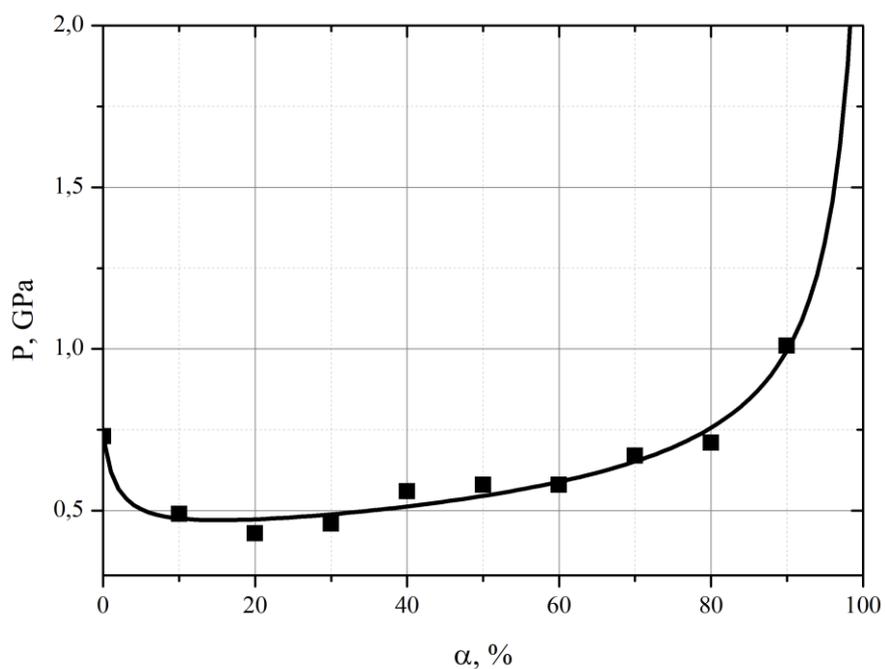


Рисунок 26 – Зависимость критического давления инициирования от количества алюминия в смеси октоген/АСД-1

Таблица 30 – Критические параметры инициирования смеси октоген/ПА-3

Содержание Al в смеси $\alpha_{Al}$ , масс. %	Критическая толщина $h_{кр}$ , мм	Критическое давление $P_{кр}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{ср}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,4	0,66	113
20	0,455	0,59	111
30	0,4	0,56	96
40	0,36	0,63	99
50	0,435	0,53	98
60	0,38	0,62	102
70	0,34	0,62	93
80	0,385	0,97	97
90	0,3	1,01	122

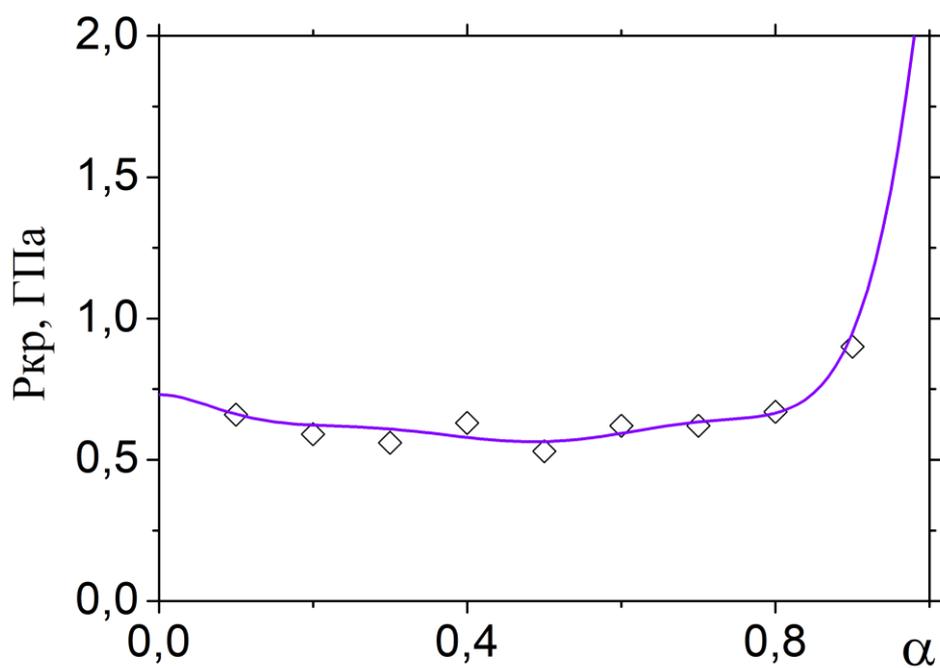


Рисунок 27 – Зависимость критического давления инициирования от количества алюминия в смеси октоген/ПА-3

Таблица 31 – Критические параметры инициирования смеси октоген/НРА

Содержание Al в смеси $\alpha_{Al}$ , масс. %	Критическая толщина $h_{кр}$ , мм	Критическое давление $P_{кр}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{ср}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,445	0,53	100
20	0,465	0,5	97
30	0,46	0,49	94
40	0,89	0,42	131
50	0,95	0,44	148
60	1,095	0,43	156
70	1,215	0,44	163
80	1,225	0,55	196

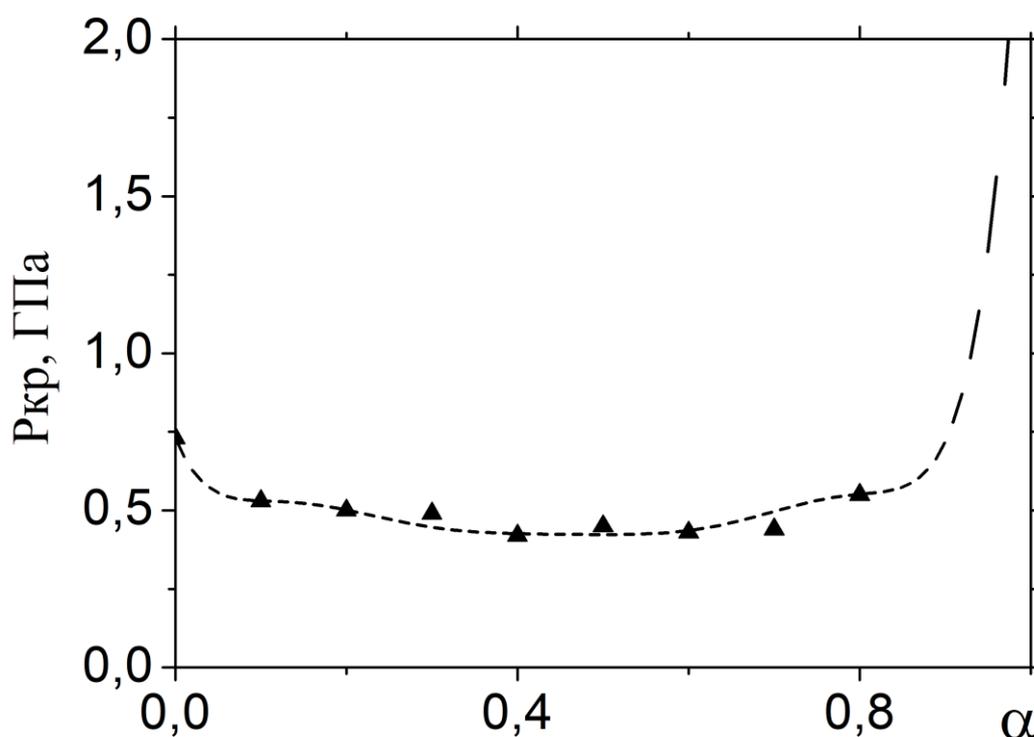


Рисунок – 28 Зависимость критического давления инициирования от количества алюминия в смеси октоген/НРА

На основе полученных данных была построена зависимость критического давления инициирования взрыва от количества алюминиевого порошка в смеси (рисунок 29)

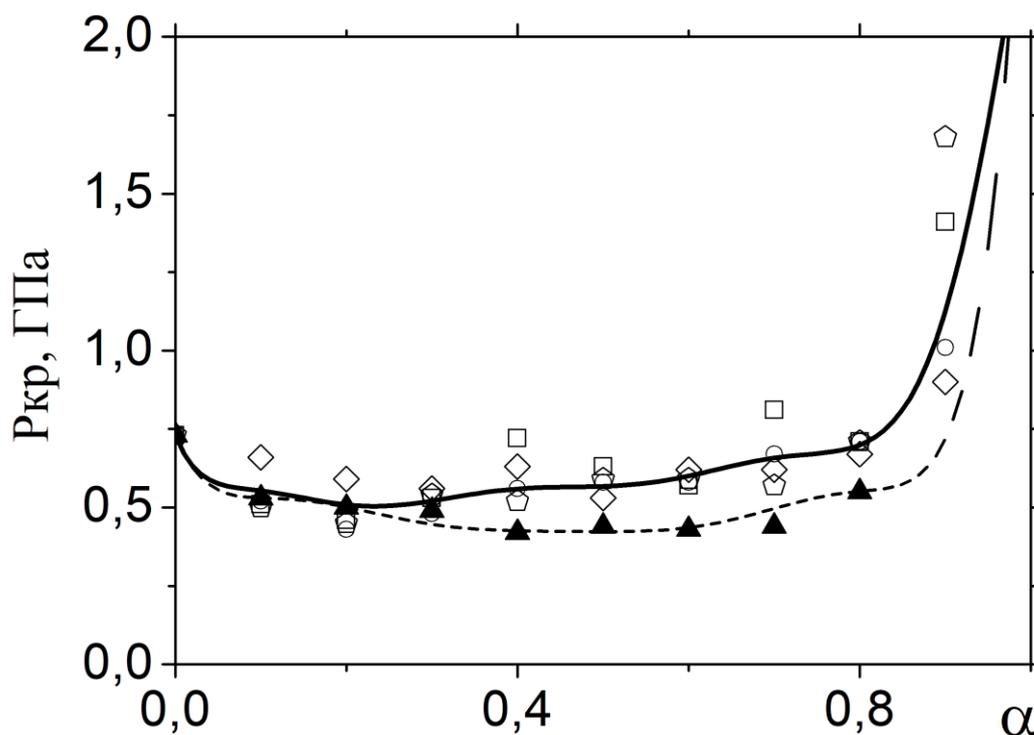


Рисунок 29 – параметры инициирования смесей октогена с алюминием различной дисперсности (▲ - 0,1 мкм; □ – 8 мкм; ○ – 15 мкм; ◇ - 160 мкм) и октогена с оксидом алюминия (△)

При сравнении полученных результатов можно говорить о том, что при небольших концентрациях алюминия в смесях ( $\alpha \leq 30\%$ ) критическое давление инициирования сопоставимо друг с другом с учетом ошибки эксперимента. При увеличении содержания алюминия заметно, что в смесях с микроразмерным алюминием данные практически совпадают и образуется минимум при массовом содержании 20-30% алюминия, в то время как в смесях октогена с НРА критическое давление инициирования меньше на 30% и четко выраженного минимума не наблюдается на протяжении всего диапазона концентраций веществ. Критическая толщина исследуемых смесей октогена с НРА при  $\alpha \geq 40\%$  резко возрастает, что не замечено при использовании микроразмерного алюминия. При этом при использовании в смесях микроразмерного алюминия критические параметры инициирования удовлетворительно описываются при помощи одной графической зависимости. (рисунок 30)

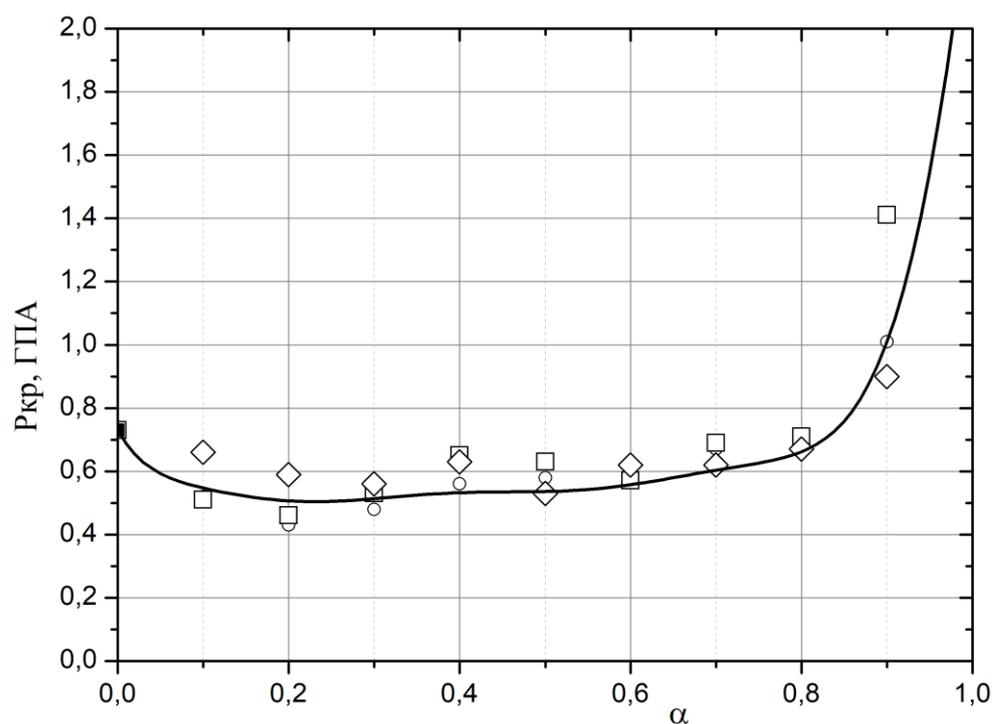


Рисунок 30 – Зависимость критического давления инициирования от количества микроразмерного алюминия

При массовых долях  $\alpha \leq 0,2$  величина критического давления при использовании алюминия марки ПА-3, размер частиц которого достигает 160 мкм, заметно превышает критическое давление на 30-35% по сравнению со смесями, где используются марки алюминия с меньшим размером частиц. Данная разница может быть вызвана как превышающим на порядок размером частиц, так и формой частиц. Остальные микроразмерные порошки металла относятся к марке «алюминий сферический дисперсный» (АСД-1 и АСД-4), форма частиц которых создается специально в виде небольших сфер, что отчетливо видно на микрофотографиях, в то время, когда частицы ПА-3 имеют произвольную форму, к которой нет каких-либо специальных требований согласно ГОСТ 6058-2022 [214]. Сферические, более гладкие и обтекаемые формы частиц алюминиевого порошка создают более обширную степень контакта алюминия с взрывчатым веществом по сравнению с хаотичными формами, что приводит к увеличению чувствительности. В дальнейшем

количество алюминия становится настолько велико, что данное различие нивелируется общим количеством частиц алюминия в смеси.

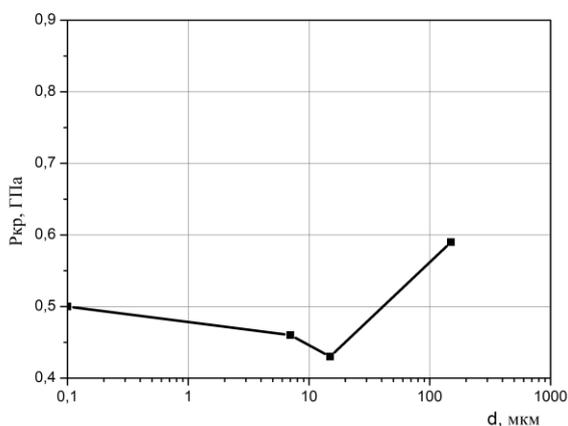


Рисунок 31 – Зависимость  $P_{кр}$  от размера частиц при  $\alpha = 0,2$

При рассмотрении зависимости критического давления инициирования от размера частиц алюминия (рисунок 31), можно заметить, что  $P_{кр}$  не сильно изменяется при изменении размера частиц с учетом погрешности эксперимента. Это можно объяснить тем, что основным механизмом инициирования является трение с износом, рассматриваемое в работе [160]. Суть данного механизма заключается в том, что мощность тепловыделения рассчитывается по формуле:

$$q_1 = \frac{\tau * V}{J * x}, \quad (10)$$

где  $V$  – скорость движения частицы,  $\tau$  – предел прочности частицы на сдвиг, численно равный  $\sigma/\sqrt{3}$ ,  $J$  – интенсивность изнашивания на пути  $x$  вдоль частицы. Анализируя данную зависимость, можно отметить, что на переднем краю частицы достигается максимально возможный разогрев частицы.

В то время как при сухом трении мощность разогрева вычисляется по формуле:

$$q_2 = \frac{\tau * V * x}{d}, \quad (11)$$

По которой очевидно, что наибольший разогрев достигается на заднем краю частицы.

Если бы ведущим механизмом инициирования являлось сухое трение, то размер частиц оказывал бы существенное влияние на критическое давление инициирования, что не наблюдается в данной работе. При трении с

износом данной зависимости не наблюдается, так как величина разогрева зависит только от формы передней кромки частицы. Также это может объяснить и отсутствие зависимости критических параметров инициирования от состава смеси, поскольку даже единственная частица при надлежащих условиях в потоке фрагментов разрушения заряда может стать причиной взрыва смеси

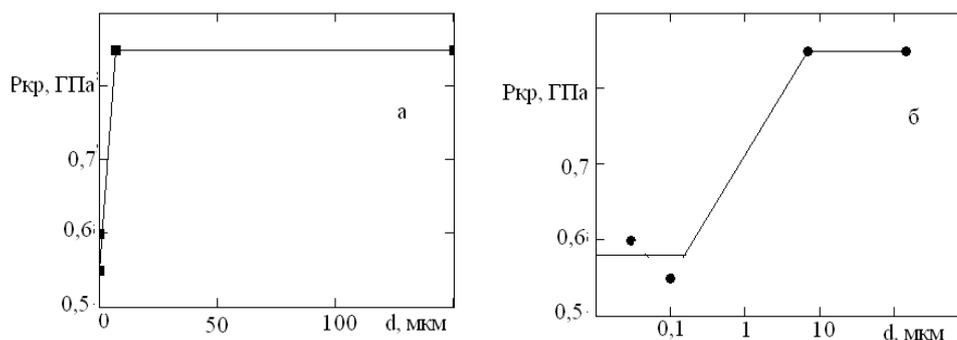


Рисунок 32 – Зависимости  $P_{кр}(d)$  в декартовых (а) и полулогарифмических (б) координатах

Данные полученные В. А. Теселкиным по чувствительности смесей октогена с алюминием различной дисперсность (0,03, 0,1, 7 и 150 мкм) представлены на рисунке 32.

При анализе полученной зависимости (рисунке 32 а) можно наблюдать резкий спад давления инициирования от 0,9 ГПа до 0,55 ГПа, который сложно объясним одним механизмом инициирования взрыва, предложенным ученым. Если перестроить данную зависимость в полулогарифмических координатах (рисунке 32 б), то наблюдается плавный переход от высокой значения  $P_{кр}$  к более низкому, что может служить доказательством двух механизмов инициирования смесей – фрикционного (микроразмерные частицы, высокие  $P_{кр}$ ) и механизма химического взаимодействия компонентов (наноразмерные частицы, низкие  $P_{кр}$ ). Граница между ними располагается приблизительно при  $d=1$  мкм. Вполне вероятно, что при  $d>1$  мкм настолько уменьшается поверхность контакта компонентов, что активное протекание реакций их взаимодействия в очагах взрыва становится неэффективным. Для фрикционного разогрева частиц, обменивающихся теплом с октогеном,

необходимы высокие скорости скольжения, которые могут быть достигнуты только при больших давлениях предварительного сжатия зарядов.

Полученные результаты по чувствительности смесей качественно согласуются с данными, полученными Теселкиным, однако количественно присутствуют расхождения. В работе [116] чувствительность смесей октогена с НРА практически в два раза превышает чувствительность базового компонента. Различия между полученными результатами объясняются тем, что в данной работе проводились копровые испытания, время инициирования при котором составляет порядка 20 мкс, в то время метод разрушающей оболочки, применяемый Теселкиным подразумевает более длительное время разрушения заряда, составляющее несколько десятков микросекунд. В указанное время входят стадии раздувания и раскрытия плексигласовой трубки (по длине окружности или вдоль образующей трубки) с последующим истечением вещества через трещины в оболочке. Причем режим протекания продуктов разрушения и взрыва ВВ через указанные отверстия представляется тем интенсивнее, чем более однородна в гидродинамическом отношении текучая среда, которой, в частности, обладает смесь с нанодисперсными частицами.

Для получения качественной определенности относительно механизма ударного возбуждения взрывной реакции в смесях октогена с алюминием проведено сравнение критических давлений инициирования смесей октогена с алюминием и с оксидами алюминия. Данные приведены на рисунке 31. Из сравнения представленных зависимостей  $P_{кр}(\alpha)$  видно, что давления инициирования смесей октогена с  $Al_2O_3$  ( $d \approx 30$  мкм) практически совпадают с данными по давлениям инициирования смесей с алюминием, что может наглядно свидетельствовать об однотипном механизме инициирования рассматриваемых смесей. Действительно, оксид алюминия не реагирует с продуктами распада октогена и взрыв этих смесей происходит только вследствие фрикционного разогрева частиц оксида, отдающих свое тепло окружающему их октогену во время разрушения заряда и радиального

движения образующихся фрагментов. Отсюда следует, что в смесях октогена с микронным алюминием химическая реакция взаимодействия алюминия с продуктами термораспада октогена не влияет на процесс возбуждения взрыва ударом и решающую роль в их инициировании играет фрикционный механизм взрыва.

## 6.2 Чувствительность смесей окфола-3,5 с оксидами переходных металлов

Результаты экспериментов с оксидами металлов представлены в таблицах 32-35 и рисунках 32-35

Таблица 32 – Критические параметры инициирования смесей окфола-3,5 с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Содержание $\text{Fe}_2\text{O}_3$ в смеси $\alpha_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ , масс.%	Критическая толщина $h_{\text{кр}}$ , мм	Критическое давление $P_{\text{кр}}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,715	0,46	125
20	0,76	0,50	143
30	0,79	0,49	143
40	0,825	0,55	188
50	1.165	0,63	208

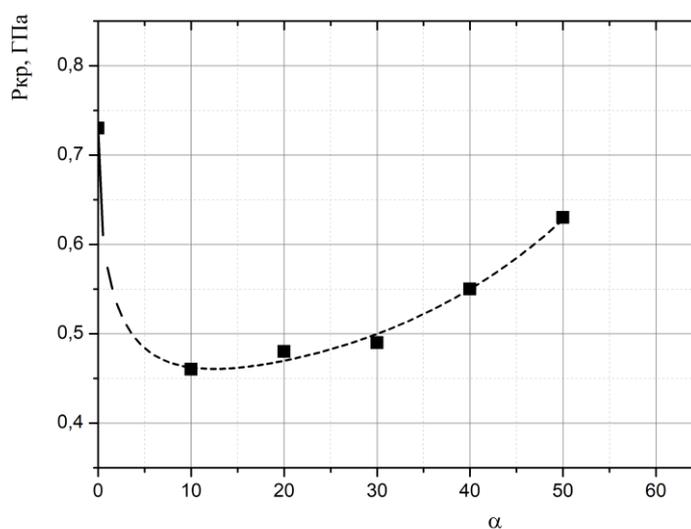


Рисунок 33 – Графическая зависимость критического давления инициирования от количества добавки

При анализе экспериментальных данных для смеси октоген /Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно заметить значительную сенсбилизацию базового ВВ при  $\alpha < 30\%$  концентрациях добавки. При увеличении содержания оксида в смеси наблюдается постепенный спад чувствительности. Предположительно, при дальнейшем повышении массовой концентрации металлического компонента будет наблюдаться флегматизация базового ВВ.

Таблица 33 – Критические параметры инициирования смесей окфола-3,5 с TiO<sub>2</sub>

Содержание TiO <sub>2</sub> в смеси $\alpha_{\text{TiO}_2}$ , масс.%	Критическая толщина $h_{\text{кр}}$ , мм	Критическое давление $P_{\text{кр}}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,36	0,69	108
20	0,49	0,69	140
30	0,725	0,51	140
40	1,035	0,55	193
50	0,965	0,55	176
60	1,035	0,63	193

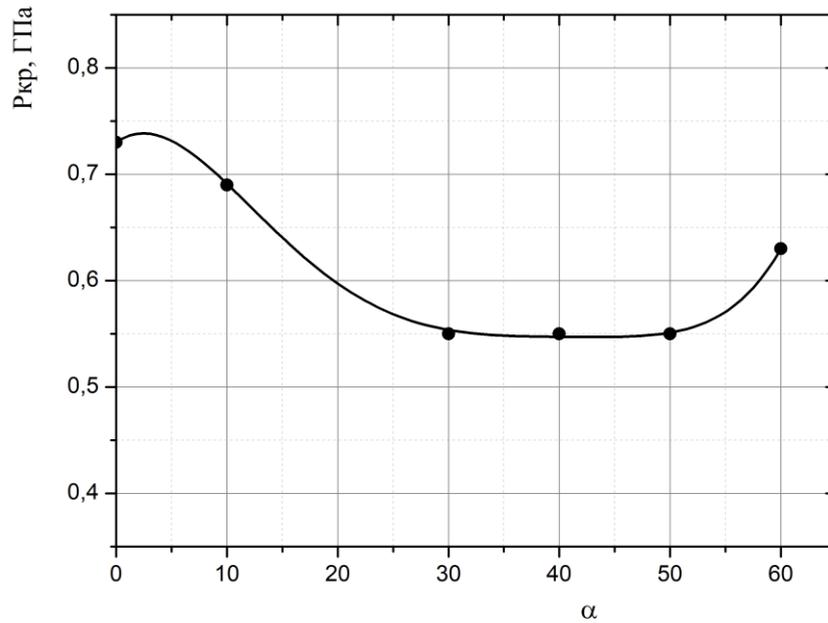


Рисунок 34 – Графическая зависимость критического давления инициирования от количества добавки

При рассмотрении смеси октоген/ $TiO_2$  замечено качественное отличие от двух других смесей. В области малых концентраций влияние диоксида на чувствительность практически не заметно. При дальнейшем увеличении массовой доли оксида титана в смеси наблюдается резкая сенсбилизация, в которой не обнаружен четкий минимум, также не определена концентрация, при которой будет наблюдаться снижение чувствительности смеси.

Увеличение чувствительности смеси связано с особенностью диоксида. По своей природе в нем содержится и образуется большое количество кислотных центров Льюиса и Бренстеда [216]. При увеличении добавки увеличивается и площадь образования центров, которые непосредственно соприкасаются с окфолом-3,5. Само ВВ подвергается активному разложению при контакте с кислотами.

Таблица 34 – Критические параметры инициирования смесей окфола-3,5 с  $V_2O_5$

Содержание $V_2O_5$ в смеси $\alpha_{VO_5}$ , масс.%	Критическая толщина $h_{кр}$ , мм	Критическое давление $P_{кр}$ , ГПа	Средняя прочность $\sigma_{ср}$ , МПа
0	0,525	0,73	121
10	0,52	0,52	110
20	0,465	0,51	100
30	0,77	0,56	160
40	0,715	0,56	140
50	0,965	0,54	180
60	0,705	0,76	208

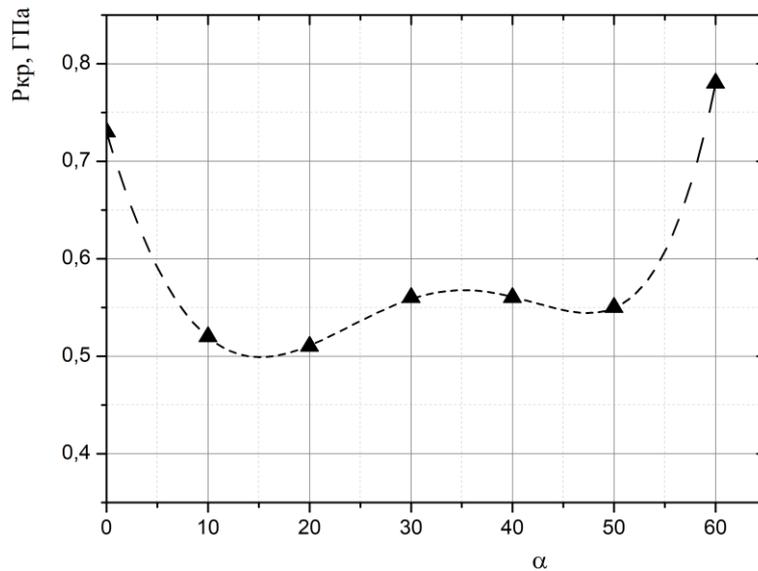


Рисунок 35 – Графическая зависимость критического давления инициирования от количества добавки

При рассмотрении смеси октоген/ $V_2O_5$  видна схожесть с влиянием оксида железа (III), однако количественные показатели незначительно

отличаются. Так минимум для смеси с пентоксидом не так четко выражен, как при  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и смещен в сторону увеличения концентрации добавки (в смеси с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  максимум при  $\alpha = 10\%$ , в смеси с  $\text{V}_2\text{O}_5$  –  $20\%$ ). При увеличении концентрации до 50 массовых процентов замечен резкий скачок показателя критического давления инициирования, который не замечен при оксиде железа. Уже начиная с данной доли добавка не оказывает сенсбилизирующего влияния на базовое ВВ.

Таблица 35 – Критические параметры инициирования смесей окфола-3,5 с  $\text{CuO}$

Содержание оксида меди (II) в смеси	Критическое давление инициирование $P_{кр}$	Критическая толщина заряда $h_{кр}$
0	0,73	
10	0,40	0,540
20	0,42	0,590
30	0,44	0,555
40	0,42	0,530
50	0,45	0,645

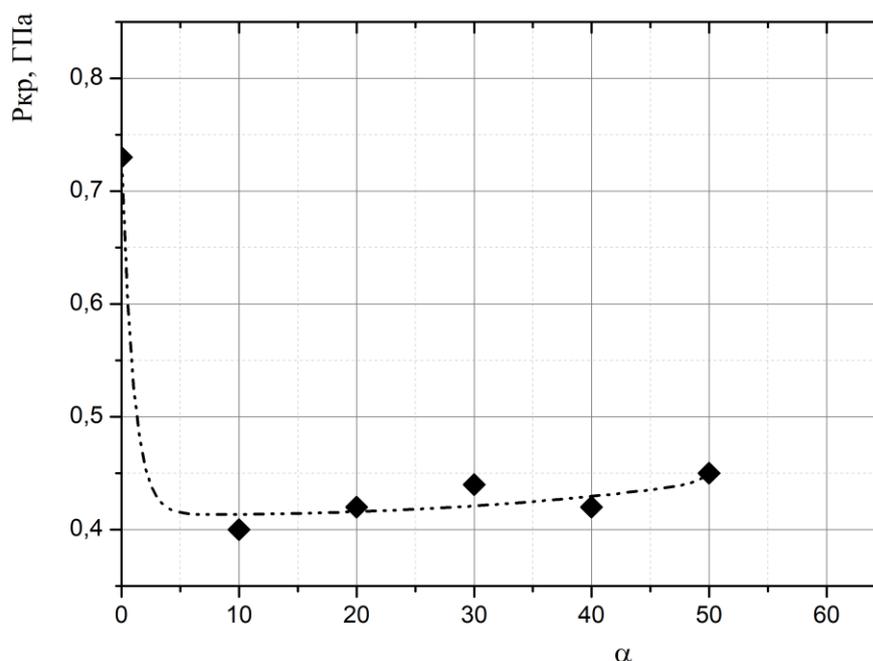


Рисунок 36 – Графическая зависимость критического давления инициирования от количества добавки

При добавлении оксида меди (II) наблюдается существенная сенсбилизация смеси. По значению критического давления исследуемые смеси можно сравнивать с высокочувствительными веществами, например с ТЭНом. При этом не обнаружен четкий минимум, что говорит о несущественном влиянии концентрации оксида меди на критические параметры инициирования

Металлы, оксиды которых исследовались в смеси с окфолом-3,5, принадлежат ряду переходных металлов. Как известно переходные металлы проявляют высокую каталитическую способность во время окислительно-восстановительных реакций, к которым можно отнести и процессы горения и взрыва. Наиболее активным в литературе признают металлы 8 группы, представителем которой является железо. Оксид железа III подробно изучен и широко используется в качестве катализатора горения для энергонасыщенных составов, однако по последним данным больший вклад на скорость горения оказывает оксид меди (II).

Для удобства сравнения чувствительности к удару двухкомпонентных составов сведения о критическом давлении инициирования представлены в таблице 36 и на рисунке 36

Таблица 36 – Критическое давление инициирования смесей октоген-3,5/оксид металла

Содержание оксида в смеси $\alpha$ , масс.%	Критическое давление инициирования смесей октоген+оксид металла, ГПа			
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	CuO
0	0,73	0,73	0,73	0,73
10	0,46	0,52	0,69	0,40
20	0,50	0,51	0,69	0,42
30	0,49	0,56	0,51	0,44
40	0,55	0,56	0,55	0,42
50	0,63	0,54	0,55	0,45
60	-	0,76	0,63	

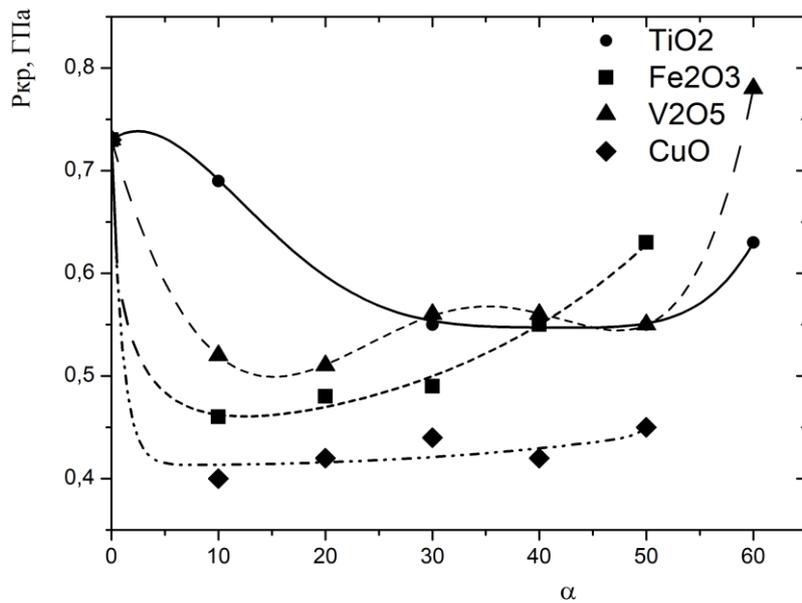


Рисунок 37 – Зависимость критического давления инициирования от содержания оксидов

При анализе заметно, что различия в чувствительности для всех оксидов металлов кроме окиси меди наблюдается только в области  $\alpha \leq 0,2$ . На данном отрезке наименее чувствительным является диоксид титана, а наиболее – оксид железа (III). При этом по законченности d-оболочки металлы располагаются в той же последовательности. При дальнейшем увеличении содержания добавки показатели чувствительности постепенно выравниваются. Причем у наиболее сенсibiliзирующего оксида железа (III) снижение чувствительности к удару наблюдается раньше остальных оксидов, в то время как диоксид титана, практически не оказывающий никакого воздействия на базовое ВВ при содержании 0-20% сохраняет сенсibiliзирующий эффект наиболее долго.

Оксид меди (II) в исследуемом диапазоне концентраций компонентов постоянно проявляет наибольшую чувствительность к механическому воздействию. При этом увеличение добавки не оказывает существенного влияния на параметры инициирования.

Из-за своей высокой чувствительности оксид меди (II) был выбран в качестве проверки различий между критическими давлениями октогена, и использованной в данной работе его флегматизированной модификации – окфола-3,5.

Данные о критических параметрах инициирования приведены в таблице 37 и рисунке 37

Таблица 37 – Критические давления инициирования смесей октогена и окфола-3,5 с оксидом меди (II)

Содержание оксида меди в смеси $\alpha$ , масс.%	Критическое давление инициирования смесей, ГПа	
	окфол-3,5 + CuO	октоген+CuO
0	0,73	0,59
2	0,35	0,33
5	0,37	0,37
10	0,40	0,37
20	0,42	0,38
30	0,44	0,37
40	0,42	0,38
50	0,45	0,39

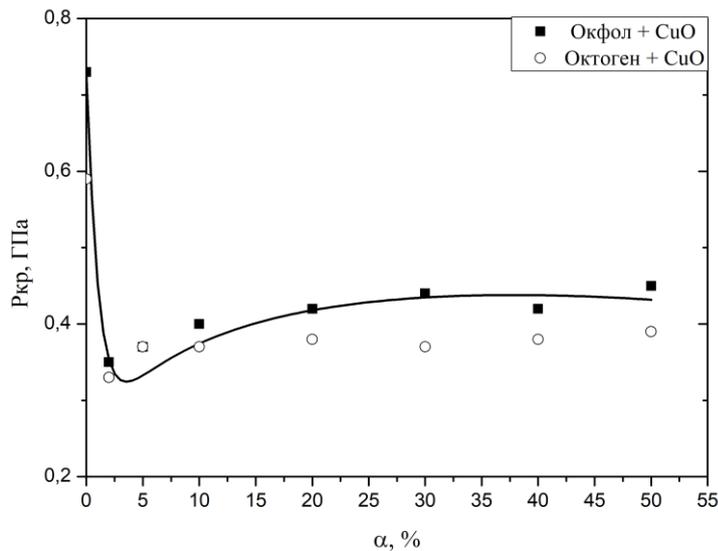


Рисунок 38 – Зависимость критического давления от содержания оксида меди (II) в смеси

Анализируя графические зависимости, заметно возникновение определенного минимума при незначительных добавках оксида (2%). Дальнейшее уменьшение чувствительности, начиная с 10% содержания оксида, довольно незначительно по сравнению с обнаруженным минимумом. При этом последующее увеличение доли добавки (до 50%), начиная с 10%, в смеси не наблюдается ни роста, ни падения чувствительности. Сам факт добавления оксида меди (II) к рассматриваемым взрывчатым веществам является существенным фактором, значительно сенсibiliзирующим вещества.

При сравнении полученных данных заметно, что критическое давления инициирования чистых веществ существенно отличаются между собой, что согласуется с литературными данными. В то время как при добавлении оксида меди с учетом погрешности копровых экспериментов разница в показателях чувствительности отсутствует. Это может быть вызвано тем, что жиросодержащие вещества, являющиеся флегматизирующей добавкой в окволе-3,5, под воздействием высоких температур, возникающих во время взрывной реакции и сгорания алюминия, освободившегося от защищавшей

его оксидной пленки, расплавляются и теряют свои флегматизирующие свойства. При этом выделяющейся теплоты при работе с индивидуальными веществами недостаточно, чтобы нивелировать работу флегматизирующей добавки.

### 6.3 Чувствительность смесей окфола-3,5 с углеродными добавками

Результаты экспериментов со смесями, в состав которых входят углеродные добавки представлены в таблице 38

Таблица 38 – Критическое давление смесей окфола-3,5 с углеродными добавками

Вещество	$P_{кр}$ , ГПа
Окфол-3,5	0,73
Окфол-3,5+ сажа 2%	0,51
Окфол-3,5+нанотрубки2%	0,56
Окфол-3,5 + графен 2%	0,54
Окфол-3,5 + сажа 5%	0,50
Окфол-3,5 +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10%+сажа 2%	0,43
Окфол-3,5 +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10%+сажа 5%	0,45
Окфол-3,5+нанотрубки(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 1%	0,57
Окфол-3,5+нанотрубки(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 2%	0,57
Окфол-3,5+нанотрубки(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 5%	0,52
Окфол-3,5 +CuO 10%+сажа 2%	0,49
Окфол-3,5+CuO 10%+сажа 5%	0,42
Окфол-3,5 +CuO 10%+ZnO 2%	0,55
Окфол-3,5 +CuO 10%+ZnO 5%	0,60
Окфол-3,5 + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10%+ нанотрубки(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 2%	0,54
Окфол-3,5 + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10%+ нанотрубки(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 5%	0,56
Окфол-3,5 + TiO <sub>2</sub> 10% + сажа 2%	0,63
Окфол-3,5 + TiO <sub>2</sub> 10% + сажа 5%	0,53
Окфол-3,5 + TiO <sub>2</sub> 10% + нанотрубки (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 2%	0,64
Окфол-3,5 + TiO <sub>2</sub> 10% + нанотрубки (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 5%	0,56
Окфол-3,5+нанотрубки (Mn-Ni) 1%	0,55
Окфол-3,5+нанотрубки (Mn-Ni) 2%	0,55
Окфол-3,5+нанотрубки (Mn-Ni) 5%	0,55
Окфол-3,5+нанотрубки (Mn-Cu) 1%	0,62
Окфол-3,5+нанотрубки (Mn-Cu) 2%	0,65
Окфол-3,5+нанотрубки (Mn-Cu) 5%	0,63

Поскольку определялись незначительное количество однотипных добавок, максимум 3 смеси, графические зависимости построить оказалось проблематично. Исходя из вышеизложенного, исследуемые смеси группировались и анализировались отдельно.

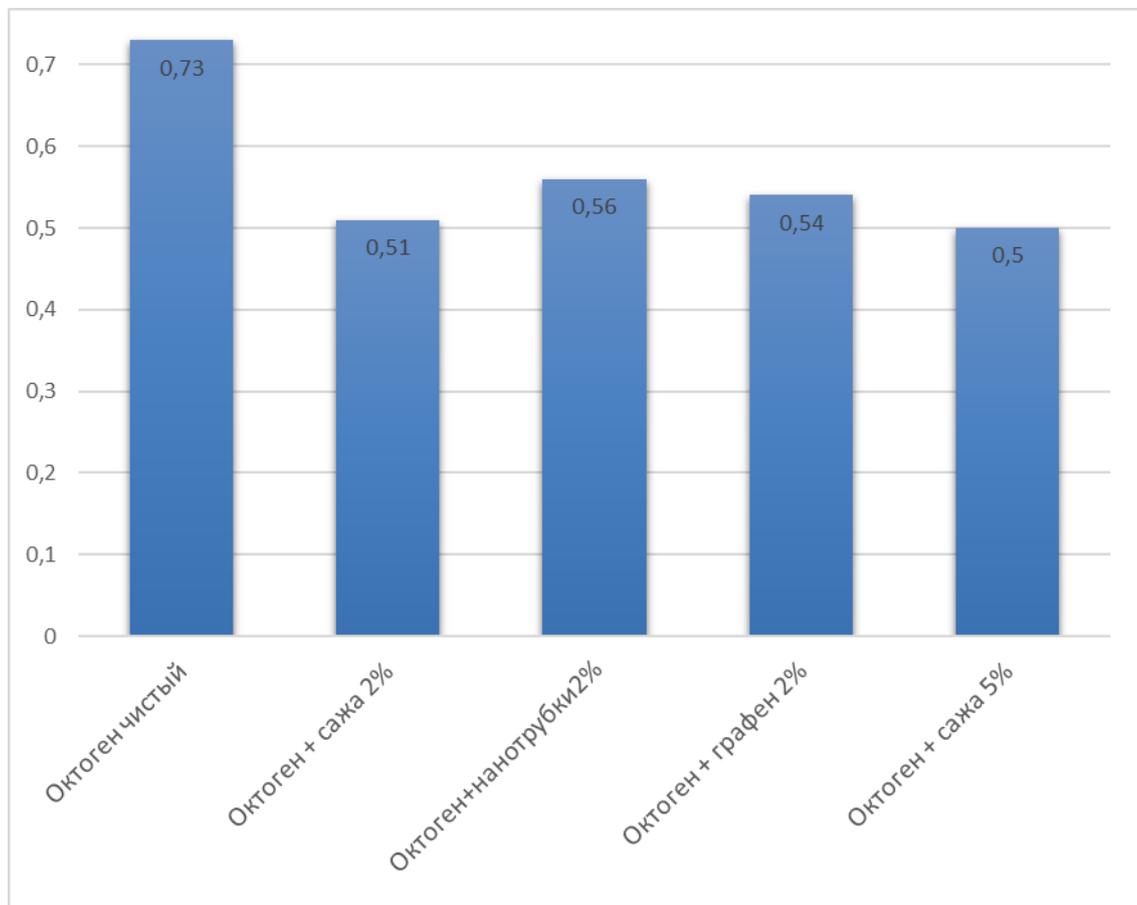


Рисунок 39 – Параметры критического давления смесей типа «окфол-3,5 углеродная добавка»

При рассмотрении бинарных смесей типа «окфол-3,5 – углеродная добавка» (рисунок 39) заметно, что с учетом погрешности эксперимента, критическое давление инициирования для каждой из 3 добавок идентично. При этом по своим физическим характеристикам аллотропные модификации углерода значительно отличаются, что не отображается на их сенсibiliзирующей способности. Данный факт позволяет свободно выбирать наиболее подходящую добавку исходя из требований к составам, не боясь сенсibiliзирующего эффекта. При увеличении добавки с 2% до 5% критическое давление инициирование не изменилось, следовательно, при

малых концентрациях зависимости давления от концентрации добавок не обнаружено. Сам факт увеличения чувствительности может быть вызван увеличением теплопередачи к взрывчатому веществу и образованию большого количества горячих точек на поверхности углеродной добавки.

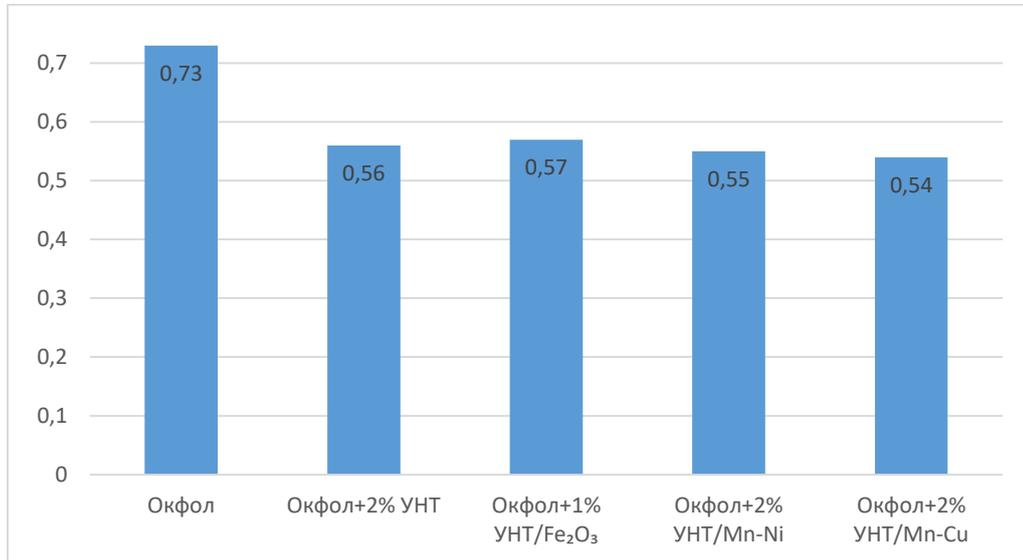


Рисунок 40 – Параметры критического давления смесей окфола-3,5 с модифицированными нанотрубками

Помимо «чистых» углеродных нанотрубок использовались модифицированный, на поверхность и в структуру которых специальным образом вводили модификаторы (оксид железа III, сплав Mn-Ni, сплав Mn-Cu) (рисунок 40). Внедрение таких составов в добавку не повлияло на параметры чувствительности при одинаковых концентрациях. При этом данные вещества вводились в аллотропную модификацию углерода в связи с тем, что они находят применение в качестве модификатора горения в составе ракетных топлив. Их возможное содержание в нанотрубках могло способствовать сенсбилизации, однако гипотеза не подтвердилась.

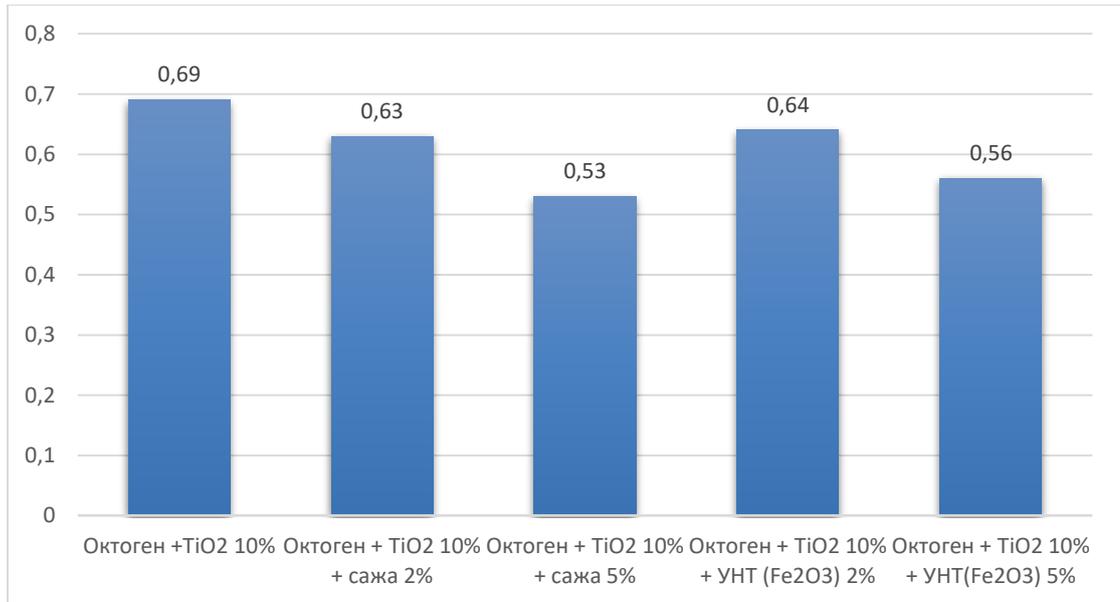


Рисунок 41 – Параметры критического давления смесей окфола-3,5 с диоксидом титана и углеродными добавками

Углеродные добавки в составе ракетных топлив служат для создания углеродного каркаса, на котором оседают частицы модификаторов горения, что приводит к усилению их каталитического эффекта. При взаимодействии со смесью окфола-3,5 и диоксида титана с углеродными добавками замечена незначительная сенсбилизация при 2 % массового содержания добавки. При этом принципиальной разницы между чистой углеродной добавкой или модифицированной не наблюдается. При дальнейшем увеличении содержания углеродного компонента критическое давление существенно снижается. (рисунок 41)

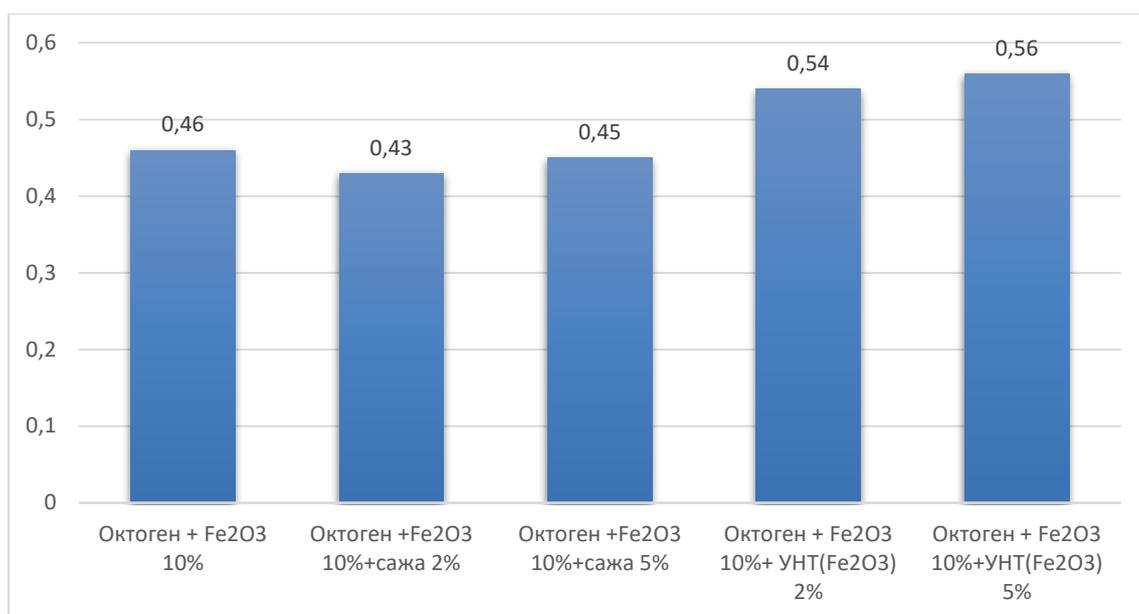


Рисунок 42 – Параметры критического давления смесей октола-3,5 с оксида железа (III) и углеродными добавками

При рассмотрении составов, в которые входят оксид железа (III), являющийся одним из наиболее распространенных модификаторов горения влияние сажи на чувствительность, не было обнаружено. При этом в случае с модифицированными нанотрубками, в состав которых входит тот же самый оксид заметна значительная флегматизация состава. С точки зрения химического механизма можно сказать, что добавка флегматизировала смесь из-за соединения активных центров, образованных молекулами оксида железа (III) на поверхностях УНТ и оксида. Физически же произошло слияние «горячих точек», уменьшение их количества, и, соответственно, стало меньше очагов возбуждения взрывной реакции. (Рисунок 42)

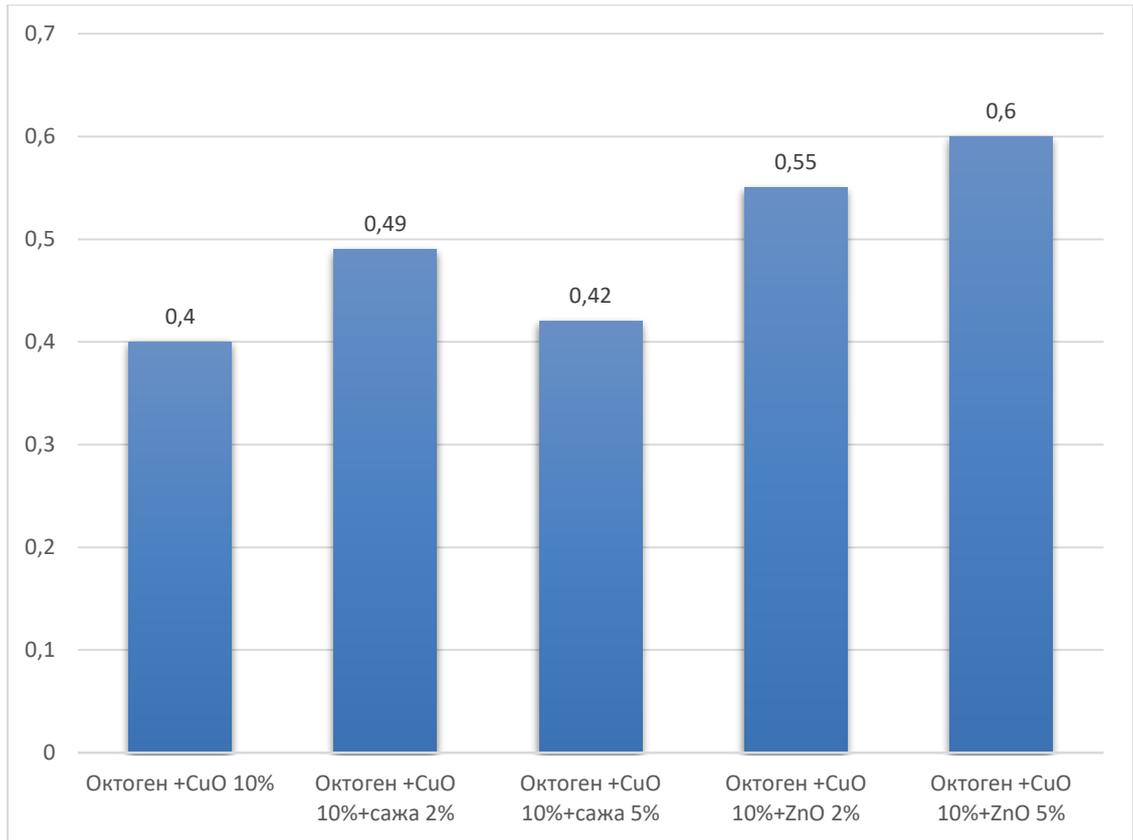


Рисунок 43 – Параметры критического давления смесей октола-3,5 с оксидом меди и углеродными добавками

В случае с составами, в которые входит оксид меди II, проявляющий наибольший сенсibiliзирующий эффект по сравнению с другими оксидами металлов, заметно что при добавлении 2% процентов сажи критическое давление инициирования увеличивается практически на 20%, в то время как при увеличении количества углеродной добавки до 5% данный спад чувствительности не наблюдается. (рисунок 43)

Помимо аллотропных модификаций углерода в качестве усилителя действия модификатора и своеобразного связующего применяют оксид цинка. При рассмотрении данного случая заметно существенное увеличение критического давления инициирования, увеличивающееся с увеличением концентрации добавки.

В целом при рассмотрении параметров чувствительности к удару в смесях с аллотропными модификациями углерода при добавлении оксидов металлов можно подметить, что критическое давление инициирования не

опускается ниже значения характеристики бинарных смесей. Углеродные добавки могут выступать как некая лимитирующая чувствительность к удару величина.

#### 6.4 Чувствительность к удару модельных составов твердых ракетных топлив

На сегодняшний день существует большое количество различных составов модельных топлив, которые отличаются друг от друга соотношением окислителя и высокоэнергетического вещества, выбора связующего, наличия различных модификаторов горения, призванных увеличить скорость горения составов. В погоне за увеличением мощности твердых ракетных топлив нельзя забывать и о безопасности, зависящей от большого количества факторов, в связи с неоднородностью свойств входящих в нее компонентов. В работе рассматриваются два состава: в качестве окислителя использовался перхлорат аммония (40 %), высокоэнергетическим веществом выбран окфол-3,5 (20 %), связующей добавкой – эпоксидная смола ЭД-20 (20 %), для усиления каталитического эффекта использовалась сажа (1 %) (рисунок 44). Различие составов заключалось в энергетической добавке: в первом варианте в состав вводилось 19 % алюминиевого порошка, во втором 6 % алюминия заменялись на аналогичное количество оксида меди (II) (рисунок 45).

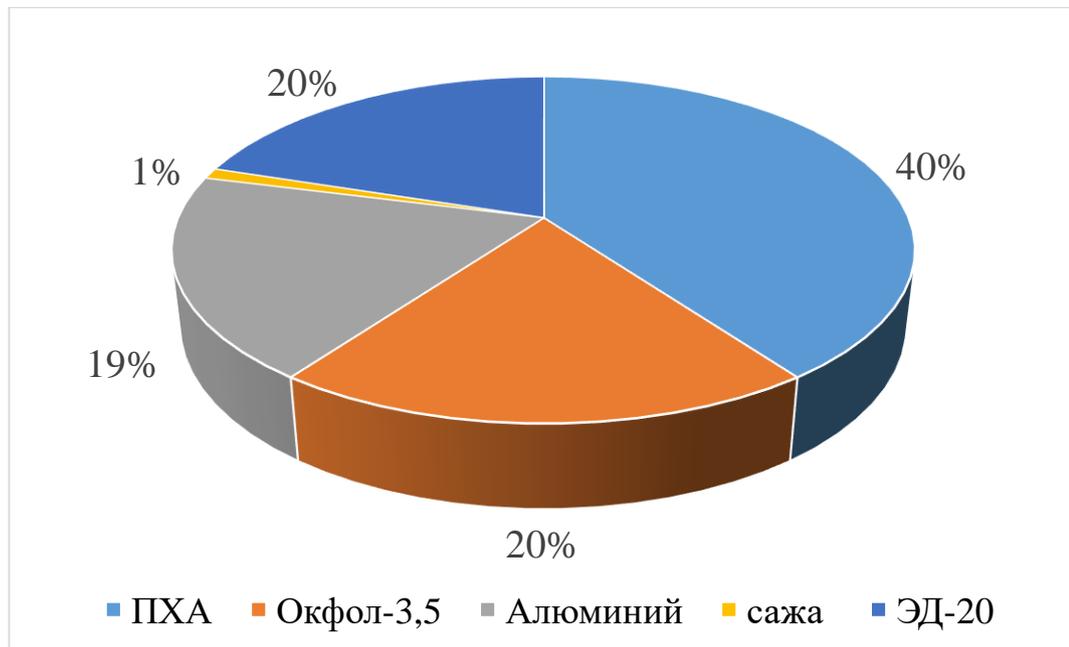


Рисунок 44 – Состав модельного ракетного топлива без оксида металла

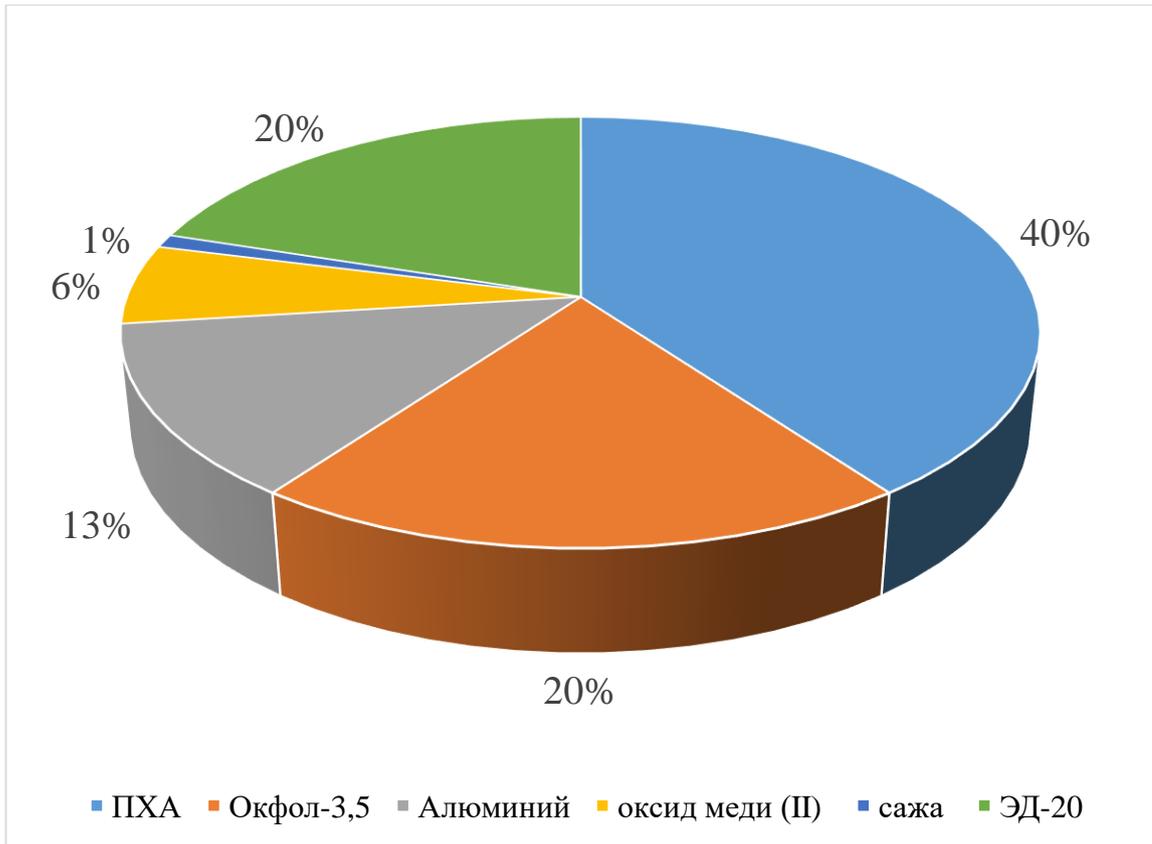


Рисунок 45 – Состав модельного ракетного топлива с добавлением оксида меди (II)

Добавление оксида меди (II) обусловлено тем фактом, что данный оксид дает наибольшую прибавку к скорости горения состава по сравнению с другими рассматриваемыми оксидами. В тоже время модификатор горения оказывает наибольший сенсбилизирующий эффект при взаимодействии с окфолом-3,5. Помимо исследований на чувствительности модельных составов, рассматривались и комбинации перхлората аммония с окфолом-3,5 и их взаимодействие с выбранным связующим (эпоксидная смола ЭД-20). Результаты представлены на рисунке 46.

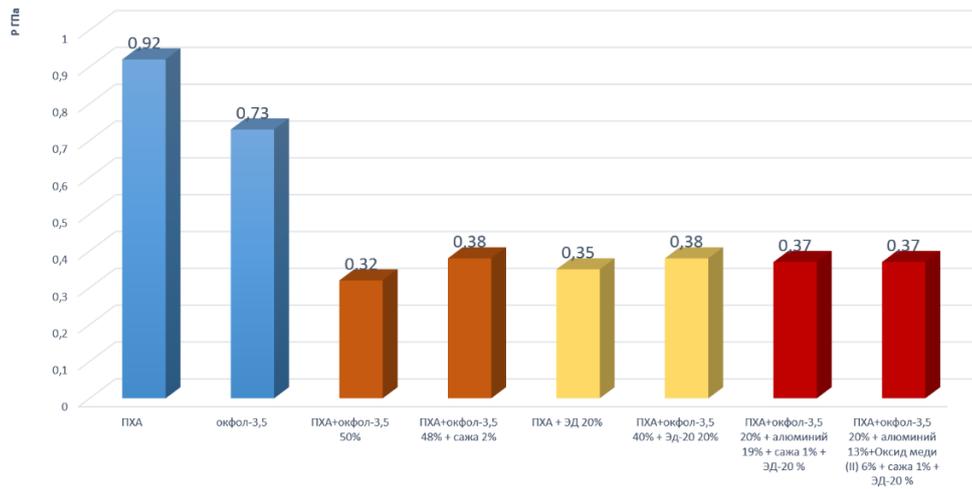


Рисунок 46 – Критическое давление инициирования составов модельного ракетного топлива

При смешении окислителя с высокоэнергетическим веществом существенно увеличивает чувствительность обоих компонентов. По значениям критического давления эти смеси находятся вблизи со значениями свойственными инициирующим веществам. При этом добавление углеродной добавки не влияет на чувствительность системы. При рассмотрении ситуации с добавлением эпоксидной смолы к перхлорату аммония, также наблюдается существенную сенсбилизацию состава, которая не изменяется с добавлением окфола-3,5. Энергетические добавки также не оказывают никакого сенсбилизующего эффекта на предложенный модельный состав ракетного топлива. В данном случае основной сенсбилизующий эффект оказывает наличие смолы в качестве связующего, что может быть обусловлено пониженной механической прочностью состава по сравнению с каждым компонентом по отдельности.

## Выводы

1. Проведено экспериментальное сравнение методик ГОСТ 4545-88 и метода критического давления для окфола-3,5, тротила и аммиачной селитры. Выявлена сходимость критического давления инициирования и давления, возникающего при ударе с высоты нижнего предела чувствительности веществ.
2. Наноразмерные частицы алюминия в смесях с высокоэнергетическими материалами оказывают больший сенсibiliзирующий эффект по сравнению с микроразмерными частицами.
3. Применение пористой аммиачной селитры по сравнению с гранулированной в смесях с алюминием существенно сенсibiliзирует состав. Частота взрывов возрастает с 8% до 44%.
4. Чувствительность к удару высокоэнергетических веществ на примере окфола-3,5 не зависит от аллотропной модификации углеродной добавки. Их добавление снижает критическое давление инициирования на  $0,2 \pm 0,02$  ГПа.
5. Для бинарных систем с добавлением оксидов  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  наблюдается сенсibiliзация при содержании добавок от 10 до 40%. В свою очередь для  $\text{TiO}_2$  увеличение чувствительности начинается с 20%. Наиболее сенсibiliзирует окфол-3,5 оксид меди (II).
6. Установлено на примере смесей октогена с оксидом меди и окфола-3,5 с данным оксидом отсутствие влияния флегматизатора на чувствительность к удару при добавлении топливных добавок.

### Список литературы

1. Макаров С.В., Макарова А.С. История применения селитры с древнейших времен до наших дней / С.В. Макаров, А.С. Макарова, В.А. Кузнецов, Е.И. Кудрявцева // *Studia Humanitatis*. - 2016. - №2.
2. Келли Д. Порох. От алхимии до артиллерии: История вещества, которое изменило мир / Д. Келли, пер. с англ. А. Турова // М.: КоЛибри - 2005. - 340 с.
3. Штрубе В. Пути развития химии: в 2-х т. / Д.Н. Трифионов, В.А. Крицман; пер. с нем. В.А. Крицмана, А.Ш. Гладкой// М.: Мир - 1984. - Т. 1. - 239 с
4. Красногоров В.С. Подражающие молниям / В.С. Красногоров // М.: Знание - 1977. – К78 - 192 с.
5. Михайлов Ю.М., Колганов Е.В., Сосни В.А. Безопасность аммиачной селитры и ее применение в промышленных взрывчатых веществах / Ю.М. Михайлов, Е.В. Колганов, В.А. Сосни// Дзержинск: Партнер-плюс - 2009. - 304 с.
6. Чернышев А.К., Левин Б.В., Конвисар Л.В. Аммиачная селитра и удобрения на ее основе/ А.К. Чернышев, Б.В. Левин // М., - 2003. - 102 с.
7. Gonchar, A. A. Tragedy to Oppau / A. A. Gonchar, V. V. Korotkov, O. M. Alimov // Военный сборник. – 2017. – No. 5(1). – P. 4-10. – DOI 10.13187/vs.2017.1.4. – EDN ZMIXLF.
8. Кодиров Б. Х., Хамрокулов З. А.. крупнейшие пожары и взрывы аммиачной селитры, произошедшие в истории человечества. Экспериментал таджикотлар,- 2023 - 1(1), 7–11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7556964>
9. Литовка О. Б., Демьянова Ю. И., Козак Г. Д., Старшинов А. В. Анализ аварий при транспортировке аммиачной селитры водным транспортом / О.Б. Литовка, Ю.И. Демьянова// Успехи в химии и химической технологии – 2009. - №4 (97).
10. Маршалл В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл // М.: Изд - во. «Мир» - 1989 – 672 с.

- 11.Бесчастнов М.В. Промышленные взрыва. Оценка и предупреждение / М.В. Бесчастнов// М.: Химия - 1991. - 432 с.
- 12.Гарнов В.В., Горюнов Б. Г., Александров В. В., Адушкин В. В. Аварийный взрыв селитры в Тулузе/ В. В. Гарнов, Б. Г. Горюнов, В. В. Александров, В. В. Адушкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S8. – С. 239-245. – EDN KYCSMX.
- 13.Sivaraman S.; Varadharajan S.; (2021). Investigative consequence analysis: A case study research of beirut explosion accident . Journal of Loss Prevention in the Process Industries, (), –. doi:10.1016/j.jlp.2020.104387
- 14.Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: официальный сайт. – Москва. – обновляется в течение суток. – URL: <https://www.gosnadzor.ru/> (дата обращения: 09.05.2024)
- 15.Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ/ М.Б. Генералов // Учеб. Пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига» - 2004. – 397 с.
- 16.Боуден Ф., Иоффе А. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах / Ф. Боуден, А. Иоффе // М.: Инлитиздат - 1955. - 120 с.
- 17.Багал Л.И. Взрывчатые вещества/Л.И. Багал, Б.И. Гидаспов // М.: Изд.АН СССР - 1975. - 171 с.
- 18.Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.Н. Физика взрыва/ Ф.А. Баум, К.П. Станюкович // М.: Фигматгиз – 1959.
- 19.Холево Н.А. «Физика взрыва» / Н.А. Холево // №3 М. АН ССР – 1955.
- 20.Холево Н.А. Труды Казанского химико-технологического института/ Н.А. Холево //№10 – 1946. – 91 с.
- 21.Андреев К.К. «Теория взрывчатых веществ» / К.К. Андреев //М., Оборонгив – 1963. - с. 37
- 22.Андреев К.К. «Теория взрывчатых веществ» / К.К. Андреев //М., Оборонгив - 1963. - с. 89

23. Андреев К.К., Теребилина Ю.А. «Теория взрывчатых веществ» / К.К. Андреев, Ю.А. Теребилина // М., Оборонгив – 1963. - с. 53
24. Kisliakovski G.B., Cunnors R. Science in World War II / G.B. Kisliakovski, R. Cunnors // v. Chemistry – 1946.
25. Roenen H., Ide K.M., Haupt W. Explosivstoffe / H. Roenen, K.M. Ide, W. Haupt // №8 - 1958. – 178 p.
26. Рябинин Ю.Н. ЖФК – 20 – 1946. – 1363 с.
27. Рябинин Ю.Н., ДАН СССР - 58 – 1947. – 245 с.
28. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. Бриджмен // Изд. иностранной литературы, М. - 1955. – 444 с.
29. Мержанов А. Г., Абрамов В. Г. Тепловой взрыв взрывчатых веществ и порохов / А. Г Мержанов, В. Г. Абрамов – Черноголовка - ИХФ АН СССР – 1979.
30. Баранов Е. Г. Оберемок О. Н. Семенюк Е. А./ О роли поверхностной энергии в механизме разогрева взрывчатых веществ при ударных воздействиях // Е. Г. Баранов, О. Н. Оберемок, Е. А. Семенюк - Физика горения и взрыва – 1981. – т. 17 - № 4
31. Харитон Ю. Б., Ратнер С. Б. Исследование гетерогенных систем / Ю. Б. Харитон, С. Б. Ратнер // Журн. физ. химии.— 1946. — Т. 20, вып. 2. —С. 221–222
32. Дубовик А. В. Боболев В. К. Чувствительность жидких взрывчатых веществ к удару / А. В. Дубовик, В. К Боболев - М., Наука – 1978.
33. Дубовик А. В., Лисанов М. В. Тепловая неустойчивость детонации и воспламенения зарядов реакционноспособных веществ при ударе / А. В. Дубовик, М. В. Лисанов // В кн: Детонация и ударные волны – Черноголовка - ИХФ АН СССР – 1986.
34. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Инициирование твердых ВВ ударом / Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев // М.: Наука – 1968. - 176 с.

35. Кондриков Б.Н. и. общие закономерности инициирования взрыва при определении чувствительности вв //Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31. – №. 2.
36. Zeman S. Sensitivities of High Energy Compounds in: High Energy Density Compounds, Structure & Bonding / S. Zeman, Ed.: T. M. Klapçtke // Vol. 125 - Springer, Heidelberg, Germany - 2007. - p. 195– 271.
37. Zeman S. Study of the Initiation Reactivity of Energetic Materials, Chapter 8 in: Energetics Science and Technology in Central Europe / S. Zeman, Eds.: R. W. Armstrong, J. M. Short, R. A. Kavetsky, D. K. Anand // CECDS, University of Maryland, College Park – 2012. - p. 131– 167
38. Zeman S. A Study of Chemical Micromechanism of the Organic Polynitro Compounds Initiation, Chapter 2 in: Theoretical and Computational Chemistry, Energetic Materials / S. Zeman, Eds.: P. Politzer, J. S. Murray// Vol. 13 - Part 2, Detonation, Combustion, Elsevier B. V – Amsterdam – 2003. - p. 25– 52.
39. Zeman S. New Aspects of Impact Reactivity of Polynitro Compounds. Part IV. Allocation of Polynitro Compounds on the Basis of Their Impact Sensitivities, Propellants Explos / S. Zeman // Pyrotech – 2003. - p. 28, 308– 313
40. Jungova M., Zeman S. Yan Q.-L. Recent Advances in the Study of the Initiation of Nitramines by Impact Using Their <sup>15</sup>N NMR Chemical Shift / M. Jungova, S. Zeman, Q.-L. Yan // Cent. Eur. J. Energ. Mater. – 2014. - p. 11, 383–394.
41. Storm C. B., Stine J. R., Kramer J. F. Sensitivity Relationships in Energetic Materials, in: Chemistry and Physics of Energetic Materials / C. B. Storm, J. R. Stine, J. F. Kramer, Ed.: S. N. Bulusu // Kluwer Academic Publishers – Dordrecht – 1990. - p. 605– 639
42. Kamlet M. J. The Relationship of Impact Sensitivity with Structure of Polynitroaliphatic Organic Explosives/ M. J. Kamlet// in: 6th Symposium

- (International) on Detonation - Coronado, CA, USA, - August 24–27, 1976.  
- US Govt. Report ADA059120.
43. Kamlet M. J., Adolph H. G. The Relationship of Impact Sensitivity with Structure of Organic High Explosives. Part II. Polynitroaromatic Explosives, Propellants Explos / M. J. Kamlet, H. G. Adolph // 1979. - p. 4, 30–34
44. Bliss D. E., Christian S. L., Wilson W. S. Impact Sensitivity of Polynitroaromatics / D. E. Bliss, S. L. Christian, W. S. Wilson // J. Energ. Mater – 1991. - p. 9, 319–345.
45. Andreev K. K., Belyaev A. F. Teoriya vzryvchatykh veschestv (Theory of Explosives) / K. K. Andreev, A. F. Belyaev // Oborongiz, Moscow – 1960. - Transl. as U. S. Govt. Rep. - AD-643597, NTIS, Springfield, IL – 1966.
46. Jungova M., Zeman S., A. Husarova A. New Aspect of Friction Sensitivity of Nitramines (in Persian) / M. Jungova, S. Zeman, A. Husarova // J. Energ. Mater. (Tehran) – 2012. - p. 14, 13–18; ISSN 3629 1735.
47. Keshavarz M. H., Shokrolahi A., Esmailpoor K. Recent Development in Predicting Impact and Shock Sensitivities of Energetic Materials / M. H. Keshavarz, A. Shokrolahi, K. Esmailpoor // Chin. J. Energ. Mater, (HanNeng CaiLiao) – 2008. - p. 16, 113–120.
48. Keshavarz M. H. Simple Relationship for Predicting Impact Sensitivity of Nitroaromatics, Nitramines, and Nitroaliphatic / M. H. Keshavarz // Propellants Explos. Pyrotech - 2010. - p. 35, 175–181.
49. Keshavarz M. H. A New General Correlation for Predicting Impact Sensitivity of Energetic Compounds / M. H. Keshavarz // Propellants Explos. Pyrotech - 2013.- p. 38, 754–760
50. Keshavarz M. H., Motamedoshariati H., Moghayadnia R., Ghanbarzadeh M. Prediction of Sensitivity of Energetic Compounds with a New Computer Code/ M. H. Keshavarz, H. Motamedoshariati, R. Moghayadnia, M. Ghanbarzadeh // Propellants Explos. Pyrotech – 2014. - p. 39, 95–101.

51. Lai W.-P., Lian P., Wang B.-Z., Ge Z.-X. New Correlations for Predicting Impact Sensitivities of Nitro Energetic Compounds / W.-P. Lai, P. Lian, B.-Z. Wang, Z.-X. Ge // *J. Energ. Mater.* – 2010. - p. 28, 45–76.
52. Wang R., Jiang J., Pan Y., Cao H., Cui Y. Prediction of Impact Sensitivity of Nitro Energetic Compounds by Neural Network Based on Electrotopological-State Indices / R. Wang, J. Jiang, Y. Pan, H. Cao, Y. Cui // *J. Hazard. Mater.* – 2009. - p. 166, 155–186.
53. Xu J., Zhu L., Fang D., Wang L., Xiao S., Liu L., Xu W. QSPR Studies of Impact Sensitivity of Nitro Energetic Compounds Using Three-Dimensional Descriptors / J. Xu, L. Zhu, D. Fang, L. Wang, S. Xiao, L. Liu, W. Xu // *J. Mol. Graphic Model.* – 2012. - p. 36, 10–19
54. Politzer P., Murray J. Sensitivity Correlation, in: *Theoretical and Computational Chemistry, Energetic Materials* / P. Politzer, J. S. Murray // Vol. 13 - Part 2, Detonation, Combustion, Elsevier B. V. – Amsterdam – 2003. - p. 5 –23.
55. Rice B. M., Byrd E. F., Mattson W. D. Computational Aspects of Nitrogen-Rich HEDMs, in: *High Energy Density Materials, Series: Structure & Bonding* / B. M. Rice, E. F. Byrd, W. D. Mattson, T. M. Klapçtke - Vol. 125 - Springer, Heidelberg, Germany – 2007. - p. 153– 194.
56. Chen Z.-X., Xiao H.-M., Quantum Chemistry Criteria for Impact Sensitivity / Z.-X. Chen, H.-M. Xiao // *Propellants Explos. Pyrotech.* – 2014. - p. 39, 487–495
57. Yang Q.-L., Zeman S. Theoretical Evaluation of Sensitivity and Thermal Stability for High Explosives Based on Quantum Chemistry Method: A Brief Review / Q.-L. Yang, S, Zeman // *J. Quantum Chem.* – 2013. - p. 113, 1049–1061.
58. Murray J. S., Politzer P. The Electrostatic Potential: An Overview, *WIREs Comput* / J. S. Murray, P. Politzer // *Mol. Sci.* – 2011 - p. 1, 153–163
59. Q. Cao, Dinitroamino Benzene Derivatives: A Class New Potential High Energy Density Compounds, *J. Mol. Model.* 2013, p. 19, 2205–2210

60. Pospisil M., Vavra P., Concha M. C., Murray J. S., Politzer P. A Possible Crystal Volume Factor in the Impact Sensitivities of some Energetic Compounds / M. Pospisil, P. Vavra, M. C. Concha, J. S. Murray, P. Politzer // *J. Mol. Model.* – 2010. - p. 16, 895–901
61. Pospisil M., Vavra P., Concha M. C., Murray J. S., Politzer P. Sensitivity and the Available Free Space per Molecule in the Unit Cell / M. Pospisil, P. Vavra, M. C. Concha, J. S. Murray, P. Politzer // *J. Mol. Model.* – 2011. - p. 17, 2569–2574.
62. Zhang X., Gong X. A Simple, Fast and Convenient New Method for Predicting the Stability of Nitro Compounds / X. Zhang, X. Gong, // *J. Comput. Aided Mol. Des.* – 2015. - p. 29, 471–483
63. Atalar T., Jungova M., Zeman S. A New View of Relationships of the N-N Bond Dissociation Energies of Cyclic Nitramines. Part II. Relationships with Impact Sensitivity / T. Atalar, M. Jungova, S. Zeman // *J. Energ. Mater.* – 2009. - p. 27, 200–216.
64. Murray J. S., Concha M. C., Politzer P. Links Between Surface Electrostatic Potentials of Energetic Molecules, Impact Sensitivities and C-NO<sub>2</sub>/N-NO<sub>2</sub> Bond Dissociation Energies / J. S. Murray, M. C. Concha, P. Politzer // *Mol. Phys.* – 2009. - p. 107, 89–97.
65. Politzer P., Murray J. S. Impact Sensitivity and Crystal Lattice Compressibility-Free Space / P. Politzer, J. S. Murray // *J. Mol. Model.* – 2014. - p. 20, 2223.
66. Politzer P., Murray J. S. Detonation Performance and Sensitivity: A Quest for Balance, in: *Advances in Quantum Chemistry, Energetic Materials, Book Series: Advances in Quantum Chemistry* / P. Politzer, J. S. Murray, J. R. Sabin // Vol. 69 - Academic Press, Burlington – 2014. - p. 1–30.
67. Politzer P., Murray J. S. Some Molecular-Crystalline Factors that affect the Sensitivities of Energetic Materials: Molecular Surface Electrostatic Potentials, Lattice Free Space and Maximum Heat of Detonation per Unit Volume / P. Politzer, J. S. Murray // *J. Mol. Model.* – 2015. - p. 21, 1–11.

68. Politzer P., Murray J. S. Some Perspectives on Sensitivity to Initiation of Detonation, in: Green Energetic Materials/ P. Politzer, J. S. Murray, T. Brinck // J. Wiley & Sons Ltd., Chichester – 2014. - p. 45– 62.
69. Politzer P., Murray J. S. The Role of Product Composition in Determining Detonation Velocity and Detonation Pressure/ P. Politzer, J. S. Murray // Cent. Eur. J. Energ. Mater. - 2014. - p. 11, 459–474
70. Kuklja M. M. Quantum-Chemical Modeling of Energetic Materials: Chemical Reactions Triggered by Defects, Deformations, and Electronic Excitations, in: Advances in Quantum Chemistry, Energetic Materials, Book Series: Advances in Quantum Chemistry / M. M. Kuklja, J. R. Sabin // Vol. 69 - Academic Press, Burlington – 2014. - p. 71–145
71. Ma Y., Zhang A., Xue X., Jiang D., Zhu Y., Zhang C. Crystal Packing of Low Sensitivity and High Energy Explosives / Y. Ma, A. Zhang, X. Xue, D. Jiang, Y. Zhu, C. Zhang // Cryst. Growth Des. - 2014. - p. 14, 4703–4713.
72. Zhu W., Xiao H. First-Principle Band Gap Criterion for Impact Sensitivity of Energetic Crystals: A Review / W. Zhu, H. Xiao// Struct. Chem – 2010. - p. 21, 657–665
73. Zhang C. Review of the Establishment of Nitro Charge Method and its Application / C. Zhang // J. Hazard. Mater - 2009. - p. 161, 21– 28.
74. Zeman S., Friedl Z., Rohac M., Molecular Structure Aspect of Initiation of Some Highly Thermostable Polynitro Arenes / S. Zeman, Z. Friedl, M. Rohac // Thermochim. Acta – 2006. - p. 451, 105–114
75. Zeman S., Jungov M., Yan Q.-L., Impact Sensitivity in Respect to the Crystal Lattice Free Volume and the Characteristics of Plasticity of Some Nitramine Explosives / S. Zeman, M. Jungov, Q.-L. Yan // Chin. J. Energ. Mater – 2015. - p. 23, 1185–1191.
76. Mathieu D., Toward a Physically Based Quantitative Modeling of Impact Sensitivities / D. Mathieu // J. Phys. Chem. A – 2013. – p. 117, 2253–2259.

77. Mathieu D., Alaime T., Predicting Impact Sensitivities of Nitro Compounds on the Basis of a Semi-Empirical Rate Constant / D. Mathieu, T. Alamie // J. Phys. Chem. A – 2014. – p. 118, 9720–9726.
78. Mathieu D., Alaime T., Impact Sensitivities of Energetic Materials: Exploring the Limitations of a Model Based only on Structural Formulas / D. Mathieu, T. Alamie // J. Mol. Graphics Model – 2015. – p. 62, 81–86
79. А.В.Дубовик. Чувствительность твердых взрывчатых систем к удару. М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2011. -276 с.
80. Дубовик, А. В. Корректировка стандартных методов испытаний взрывчатых веществ на чувствительность к удару / А. В. Дубовик // Химическая физика. – 2023. – Т. 42, № 3. – С. 11-15. – DOI 10.31857/S0207401X23030056. – EDN LXXDPL.
81. Дубовик, А. В. Чувствительность к удару смесей октогена с оксидом железа / А. В. Дубовик, Р. В. Понафидин // Горение и взрыв. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 100-105. – DOI 10.30826/CE18110411. – EDN YZNTLF.
82. Чувствительность энергетических материалов к удару: оценка величины энергии, передающейся образцу / К. А. Моногаров, Н. В. Муравьев, Д. Б. Мееров [и др.] // Горение и взрыв. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 103-111. – DOI 10.30826/CE23160210. – EDN OAYEPD.
83. Чувствительность энергетических материалов к удару: энергия, передаваемая образцу и поглощаемая им при испытании / Д. Б. Мееров, К. А. Моногаров, Н. В. Муравьев [и др.] // Тезисы XVII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву : Тезисы докладов, Суздаль, 16–20 сентября 2024 года. – Черноголовка: Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 2024. – С. 227-228. – EDN SCHNXR.
84. Белик А.В. Расчет чувствительности органических веществ к удару/А.В. Белик, В.А. Потемкин, С.Н. Слука // ФГВ. - 1999. - №5. - С.107-112.
85. Белик А.В. Взаимосвязь между геометрическим строением молекул взрывчатых веществ и чувствительностью к удару / А.В. Белик, В.А.

- Потемкин, Н.С. Зефирова // Докл. АН СССР. - 1989. - Т.308. - №4. - С. 882-886.
86. Бадретдинова Л.Х., Анисимов А.Н., Хадиева Д.А., Базотов В.Я. Квантово-химические модели прогнозирования чувствительности к удару полинитросоединений // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №7.
87. Бадретдинова Л. Х., Анисимов А. Н., Гильманов Р. З., Базотов В. Я. Анализ чувствительности к удару нитропиридинов и их бензольных аналогов с помощью метода AM1 // Вестник Казанского технологического университета. 2012. №6.
88. Бадретдинова Л.Х., Анисимов А.Н., Хадиева Д.А., Базотов В.Я. Прогноз параметров чувствительности энергонасыщенных веществ с использованием кластерных моделей // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №8.
89. Бадретдинова Л. Х., Анисимов А. Н., Хадиева Д. А., Базотов В. Я. Анализ применимости квантово-химических моделей прогнозирования чувствительности энергетических материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №21.
90. Амосов А. П. // Тепловая теория самовоспламенения, Куйбышев, КуАИ, 1982
91. "Химическая энциклопедия" // т.3 М.: Советская энциклопедия, 1992 стр. 369
92. Патент на полезную модель № 200154 U1 Российская Федерация, МПК F42C 1/06. Шашка-детонатор литая для промышленного применения : № 2020101178 : заявл. 10.01.2020 : опубл. 08.10.2020 / З. А. Жамилова, М. В. Крючков, В. В. Головин [и др.] ; заявитель Федеральное казенное предприятие "Завод имени Я.М. Свердлова". – EDN EDKANF.
93. Иванов Н. Б., Суркова И. Ю., Евсеева Т. П. Оптимизация рецептур и технологических параметров формования детонирующих шнуров // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №9.

94. Патент № 2589156 С1 Российская Федерация, МПК С06С 5/04, F42В 1/04. Термостойкий детонирующий шнур : № 2015107020/05 : заявл. 02.03.2015 : опубл. 10.07.2016 / И. А. Кузнецова, В. В. Колтунов, И. М. Сидоров [и др.] ; заявитель Федеральное казенное предприятие "Научно-исследовательский институт "Геодезия" (ФКП "НИИ "Геодезия"). – EDN ZETSRF.
95. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ / Е. Ю. Орлова. — Л.: «Химия», 1973.
96. Public Health Services Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, 1998, 143 p.
97. Н.В.Лазарев, И.Д.Гадаскина. Вредные вещества в промышленности. Том 3. Неорганические и элементоорганические соединения. Л., «Химия», 1997.
98. Гогоуля, М. Ф. Взрывчатые и детонационные свойства смесевых взрывчатых веществ в зависимости от размеров частиц добавки / М. Ф. Гогоуля, М. А. Бражников // Горение и взрыв. – 2009. – № 2. – С. 137-140. – EDN SSZNJB.
99. Mench M. M., Kuo K. K., Yeh C. L., Lu Y. C. Comparison of Thermal Behavior of Regular and Ultra-fine Aluminum Powders (Alex) Made from Plasma Explosion Process // Comb. Sci. and Tech. - 1998. - Vol. 135. - P. 269-292.
100. Brousseau P. Cliff M. The Effect of Ultrafine Aluminium Powder on the Detonation Properties of Various Explosives // The 32th International Annual Conference of ICT, 3 - 6 July. - Karlsruhe, Germany, 2001
101. Бирюков Ю. А., Бузник В. М., Дунаевские Г. Е. // Ультрадисперсные наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / под ред. акад. В.М. Бузника. - Томск: Изд-во НТЛ, 2009. - 192 с.
102. Кузьмин, П.Г. Физические процессы, определяющие свойства наночастиц, полученных при лазерной облучении твердых тел в жидкости:

- : дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 / Кузьмин Петр Геннадьевич. - М. - 2015. - 144 с.
103. Goldstein S., Johnson J. N. Aquarium tests on aluminized ANFO // 7th Symp. (Intern.) on Detonation, Annapolis. 1981. P. 1016–1023.
104. Гоголя М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю. и др. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.
105. Имховик Н. А., Соловьев В. С. Окисление дисперсного алюминия в продуктах детонации конденсированных ВВ // Proc. 21th Intern. Pyrotechnics Sem. M.: IChP RAS, 1995. P. 316–331.
106. Гришкин А. М., Дубнов Л. В., Давыдов В. Ю. и др. Влияние добавок порошкообразного алюминия на параметры детонации мощных ВВ // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 115–117.
107. Brousseau P., Dorsett H. E., Cliff M. D., Anderson C. J. Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder // 12th Symp. (Intern.) on Detonation, San Diego, California, 2002; ONR 333-05-2. P. 11–21.
108. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. Расчет параметров детонационной волны смесей взрывчатых веществ с инертными добавками // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 2. С. 182–186.
109. Анискин А. И. Детонация взрывчатых веществ с алюминием // Детонация и ударные волны. Черноголовка, 1986. С. 26–32.
110. Finger M., Hornig H. C., Lee E. L., Kury J. W. Metal acceleration by composite explosives // 5th Symp. (Intern.) on Detonation. 1970. P. 137–152.
111. Bjarnholt G. Effect of aluminum and lithium flouride admixtures on metal acceleration ability of com B // 6th Symp. (Intern.) on Detonation. 1976. P. 510–520.

112. Miller P. J., Bedford C. D., Davis J. J. Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives // *Ibid.* P. 214–220.
113. Hobbs M. L., Baer M. R. Calibrating the BKW-EOS with a large product species data base and measured C–J properties // 10th Symp. (Intern.) on Detonation, Boston. ONR 33395-12. 1993. P. 409.
114. Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., Baudin G. Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurements) // Proc. 11th Symp. (Intern.) on Detonation. 1998. P. 979–988.
115. Cowperthwaite M. Nonideal detonation in a composite CHNO explosive containing aluminum // *Ibid.* P. 656–664.
116. Теселкин В.А. // Влияние размера частиц компонентов на механическую чувствительность металлизированных взрывчатых веществ // *Хим. Физика* \ 2008, Т. № 8, С. 43-52.
117. Теселкин В. А. механическое инициирование взрыва смесей взрывчатых веществ с наноразмерными энергоемкими добавками // *Горение и взрыв.* – 2011. – №. 4. – С. 319-323.
118. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Долгов В. И. и др. // *Горение и взрыв. Материалы IV всесоюз. симп. по горению и взрыву.* М.: Наука, 1977. С. 485.
119. Щетинин В. Г. // *Физика горения и взрыва.* 1999 Т. 35 № 5. С. 116
120. Теселкин, В. А. Роль пассивирующего покрытия наночастиц алюминия при механическом инициировании взрыва металлизированных взрывчатых веществ / В. А. Теселкин // *Горение и взрыв.* – 2008. – № 1. – С. 24-28. – EDN SWJWMV.
121. Гилев С. Д., Анисичкин В, Ф. // Исследование взаимодействия алюминия с продуктами детонации // *Физика горения и взрыва*, 2006 т. 42 №1 С. 120-129.
122. Тамбиев П. Г., Петров Е. А., Удовиченко В. П. О полноте химических реакций и свойствах конденсированных продуктов взрыва алюминизированных промышленных взрывчатых веществ // *Вестник*

- научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – №. 2. – С. 171-174.
123. Денисаев, А. А. Инициирование реакции в тонкопленочных многослойных образцах алюминий-фторопласт при ударе на копре / А. А. Денисаев, А. С. Штейнберг, А. А. Берлин // Химическая физика. – 2008. – Т. 27, № 6. – С. 85-93. – EDN INMJQB.
124. Давыдов В. Ю., Гришкин А. М., Феодоритов И. И. Экспериментально-теоретическое исследование окисления алюминия в детонационной волне // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 124–128.
125. Дремин А. Н., Похил П. Ф., Арифов М. И. Влияние алюминия на параметры детонации тротила // Докл. АН СССР. 1960. Т. 131, № 5. С. 1140–1142.
126. Давыдов В. Ю., Губин А. С. // Закономерности скорости детонации и метательной способности металлизированных взрывчатых веществ от плотности заряда и содержания добавки // Физика горения и взрыва, 2014 Т. 50, № 5, С. 123-133.
127. Цвигунов А. Н., Аполенис А. В., Анников В. Э., Райкова В. М. // Синтез алюминатов железа и новой модификации оксида алюминия при ударе взрывчатых веществ // Стекло и керамика 2007 №12, С. 15-22.
128. Чернышов А.К., Левин Б.В., Туголуков А.В., Огарков А.А., Ильин В.А. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение. М.: ЗАО «ИНФОХИМ», 2009. 544 с
129. Патент № 2421398 С2 Российская Федерация, МПК С01С 1/18, С05G 3/10. Способ получения антислеживающегося нитрата аммония (аммиачной селитры) : № 2009125988/05 : заявл. 06.07.2009 : опубл. 20.06.2011 / Ю. М. Михайлов, Р. Ф. Гатина, А. И. Хацринов [и др.] ; заявитель Федеральное казённое предприятие "Государственный научно-исследовательский институт химических продуктов" (ФКП "ГосНИИХП"). – EDN ХОУQЕС.

130. Авторское свидетельство № 1474155 А1 СССР, МПК С05С 1/02. Способ уменьшения слеживаемости азотсодержащих удобрений : № 4154265 : заявл. 02.12.1986 : опубл. 23.04.1989 / Н. П. Крутько, Ф. Ф. Можейко, В. В. Ходневский [и др.] ; заявитель институт общей и неорганической химии ан бср, гродненское производственное объединение "азот" им.с.о.притыцкого. – edn mdcqsh.
131. Патент № 2304021 С2 Российская Федерация, МПК В01J 2/30, С05С 1/02, С05G 3/00. композиция для предотвращения слеживаемости минерального удобрения : № 2005111741/15 : заявл. 21.04.2005 : опубл. 10.08.2007 / А. Н. Крюков, С. А. Зиненко, И. Н. Гришина, С. И. Елкин. – EDN NHSGYF.
132. Межгосударственный стандарт ГОСТ 2-2013 "Селитра аммиачная. Технические условия" (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2013 г. N 2158-ст)
133. Патент № 2021235 С1 Российская Федерация, МПК С05С 1/02. способ получения пористой аммиачной селитры : № 4933600/26 : заявл. 11.01.1991 : опубл. 15.10.1994 / А. И. Сухорученков, Б. Н. Кутузов, В. В. Карпов [и др.] ; заявитель Московский горный институт, Научно-производственное кооперативно-государственное объединение "Научпромстрой". – EDN IZKXOL.
134. Патент № 2599170 С2 Российская Федерация, МПК С05С 1/00, С05G 5/00. способ получения гранулированной пористой аммиачной селитры : № 2015107676/13 : заявл. 05.03.2015 : опубл. 10.10.2016 / Ю. А. Таран, Р. В. Морозов, А. Л. Таран [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский технологический университет". – EDN YIDLQA.
135. Патент № 2241668 С1 Российская Федерация, МПК С01С 1/18. способ получения пористой гранулированной аммиачной селитры : №

- 2004101006/15 : заявл. 12.01.2004 : опубл. 10.12.2004 / А. И. Суханов, С. Д. Черемисинов, Ю. А. Мелихов [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Азот". – EDN WQNWWG.
136. Патент № 2261842 С1 Российская Федерация, МПК С01С 1/18, С06В 21/00, С06В 31/28. Способ получения пористой гранулированной аммиачной селитры : № 2004125243/02 : заявл. 19.08.2004 : опубл. 10.10.2005 / В. Н. Невская, Е. А. Маклашина, В. А. Милованов [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Акрон". – EDN TVQXVC.
137. Патент № RU 2565283 С1. Способ получения пористой гранулированной аммиачной селитры // Таран А.В., Таран Ю.А., Таран А.Л. // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова", заявл. 20.05.2014, опубл. 20.10.2015.
138. Патент № RU 2230028 С1. Способ получения пористой гранулированной аммиачной селитры // Петруляк М.А., Суханов А.И., Бердичевский Н.И. и др. // Открытое акционерное общество "Азот", заявл. 10.02.2003, опубл. 10.06.2004.
139. Таран, А.Л., Кучинский, В.Е., Кузина, Д.А. Теория и практика процесса гранулирования пористой аммиачной селитры в башнях // Успехи в химии и химической технологии. Том XXIII. 2009. № 7.
140. Гусаренко, А. А. способы получения пористой аммиачной селитры / А. А. Гусаренко, Н. А. Золотухина // Россия молодая : сборник материалов xii всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 21–24 апреля 2020 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. – С. 74208.1-74208.4. – EDN OLCDJV.
141. Набиев Абдурахим Абдухамидович, Намазов Шафоат Саттарович, Сейтназаров Атаназар Рейпназарович, Реймов Ахмед

- Мамбеткаримович, Беглов Борис Михайлович, Айымбетов Максет Жолыбаевич Известково-аммиачная селитра и её применение в сельскохозяйственном производстве // *Universum: технические науки*. 2017. №6 (39).
142. Михайлов Ю.М., Колганов Е.В., Соснин В. А. Безопасность аммиачной селитры и ее применение в промышленных взрывчатых веществах. – Дзержинск, ООО «Партнер-плюс», 2008 – 304 с.
143. ГОСТ 21984-76 Вещества взрывчатые промышленные. Аммонит N 6ЖВ и аммонал водоустойчивые. Технические условия Дата актуализации: 01.01.2021
144. ГОСТ 21987-76 Вещества взрывчатые промышленные. Гранулиты. Технические условия Дата актуализации: 01.01.2021
145. ГОСТ 21985-76 Вещества взрывчатые промышленные. Аммонал скальный № 1. Технические условия Дата актуализации: 01.01.2024
146. П.М.Моисеенко, Yu Tongchang. Explosive properties of ammonium perchlorate, ammonium nitrate and their mixtures with aluminum powder [J]. *Explosive Equipment*, 1982 (02): 47-49.
147. Державец А. С., Галушко Ф. И. Аммиачная селитра для взрывчатых материалов // *Горная промышленность*. – 2018. – №. 6 (142). – С. 48-49.
148. Соснин, В. А. Экспериментальные исследования аммиачной селитры на взрывопожаробезопасность / В. А. Соснин, Ю. Г. Печенев // *Взрывное дело*. – 2024. – № 142-99. – С. 134-168. – EDN YGMOOI.
149. Чувствительность к механическим и тепловым воздействиям смесей аммиачной селитры с горючими углеводородными компонентами / Н. И. Акинин, А. Я. Васин, А. В. Дубовик и др. // *Кокс и химия*. — 2018. — № 10. — С. 40–44.
150. Викторов С. Д. и др. Влияние микроструктуры гранул нитрата аммония на детонационную способность смесевых взрывчатых веществ

- на его основе // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52. – №. 6. – С. 119-124.
151. Белин, В. А. Влияние качества взрывчатых веществ и средств инициирования на эффективность дробления горной массы взрывом / В. А. Белин, М. Г. Горбонос, В. Е. Митков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S1. – С. 72-80. – EDN WDZVGR.
152. Франтов А.Е., Белоусов Ф.С. Исследование некоторых свойств твердых горючих компонентов для простейших взрывчатых веществ // Инженерная физика. – 2019. – №. 11. – С. 51-57.
153. Старшинов А.В. и др. Влияние структуры частиц аммиачной селитры на детонационную способность смесевых взрывчатых веществ // Горная промышленность. – 2017. – №. 5 (135). – С. 69-73.
154. Опыт эффективного применения смесевых ВВ на аммиачной селитре различных марок / В. А. Белин, И. Ф. Жариков, А. Е. Франтов [и др.] // Взрывное дело. – 2020. – № 129-86. – С. 147-164. – EDN AYFJQM
155. Викторов С. Д. Разработка и применение простейших взрывчатых веществ. М.: ИПКОН РАН, 1996. 156 с.
156. Светлов Б. Я., Яременко Н. Е. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М.: Недра, 1966. 330 с.
157. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988. 358 с.
158. Светлов Б. Я., Солнцева Р. Н. О химической стабильности алюминия в составе промышленных взрывчатых веществ // Взрывное дело. 1953. № 52/9. С. 67–80.
159. . Апин А. Я. Роль наполнителей при детонации взрывчатых веществ и порохов // Физика взрыва. 1953. № 2. С.150–166.
160. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980. 453 с.

161. Власова Е. А., Козырев С. А. Исследование физико-химических характеристик многокомпонентных взрывчатых составов // Взрывное дело. 2023. № 141/98. С. 20–32.
162. Старшинов А. В., Фадеев В. Ю., Богданов Н. М. Влияние физического состояния исходных компонентов на эффективность применения смесевых взрывчатых веществ // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород: сб. тр. междунар. конф. (г. Москва, 7–11 сент., 1998 г.). М.: ИПКОН, 1999. С. 244–250.
163. Козырев С. А., Едигарев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В. Комплексный метод оценки взрывчатых и газовых характеристик промышленных ВВ // Записки Горного института. 2007. Т. 171. С. 195–202.
164. Кукиб Б. Н., Панкова Е. В., Афанасенков А. Н., Потулов В. Ю., Шведов К. К. Расчетный экспресс-метод предварительной оценки энергетических характеристик, параметров детонации, относительной работоспособности и экономической эффективности промышленных взрывчатых веществ // Методы испытаний низкочувствительных ВВ: метод. рек. Черноголовка: Отд. ин-та хим. физики АН СССР, 1991. С. 90–108.
165. Моисеенко П. М. Некоторые взрывчатые характеристики смесей перхлората аммония и аммиачной селитры с алюминиевой пудрой // Взрывное дело. 1975. № 75/32. С. 135–140.
166. Махов В. Н. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 2. С. 96–105.
167. Тамбиев Г. И., Ольшанский Е. Н., Никитин О. Г. Вопросы развития механизации, взрывных работ на рудниках // Взрывное дело. 2008. № 56. С. 235–245.
168. Козырев С. А., Соколов А. В., Власова Е. А., Звонарь А. Ю., Пугачев С. С. Оценка эффективности действия алюминизированных

- взрывчатых веществ // Развитие идей Н. В. Мельникова в области комплексного освоения недр. Международное совещание к 100-летию со дня рождения акад. Н. В. Мельникова / составитель: А. Г. Красивин. УРАН ИПКОН РАН. М., 2009. С. 122–125.
169. Мозговой В. Г. и др. О развитии производства безопасных и эффективных взрывчатых веществ для подземных горных работ // Горный журнал. – 2008. – №. 6. – С. 65.
170. Викторов С. Д., Кутузов Б. Н., Фадеев В. Ю. Совершенствование ассортимента российских промышленных взрывчатых материалов для подземных рудников России // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – №. 4. – С. 28-34.
171. Тамбиев, П. Г. Совершенствование гранулированных вв для подземных горных работ / П. Г. Тамбиев, А. Э. Франк, Е. А. Петров // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 22–24 мая 2013 года / Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет". – Бийск: Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова", 2013. – С. 125-129. – EDN STURIN.
172. Кутузов, Б. Н. Некоторые проблемы и их решение при использовании смесевых взрывчатых веществ на горных предприятиях Монголии / Б. Н. Кутузов, А. В. Старшинов, Ж. Жамьян // Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 80-84. – DOI 10.17580/gzh.2017.01.18. – EDN ХУЕОКТ.

173. Кутузов Б. Н., Фадеев В. Ю., Игошев А. В. О необходимости единой методики оценки электропроводности зарядных трубопроводов //Безопасность труда в пром-сти. – 2013. – №. 5. – С. 42-47.
174. Кутузов Б. Н. Анализ обстоятельств и причин аварии при подготовке массового взрыва на подземном руднике «Расвумчорр» ОАО «Апатит» // Горный журнал. 2009. № 5. С. 94–96
175. Тихонов В. А. и др. Особенности ведения взрывных работ при освоении минеральных ресурсов северных и арктических районов России //Горная промышленность. – 2021. – №. 2. – С. 102-106.
176. Дубовик А. В. Исследование чувствительности к удару смесей аммиачной селитры с алюминием АСД-4 //Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13. – №. 3. – С. 125-128.
177. Жуков Б.П. Горение порохов// Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы/ Под ред. Б.П. Жукова. М.: Янус-К, 1999. С.149-159.
178. Жуков Б.П. Порох как уникальный вид энергии// Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы/ Под ред. Б.П. Жукова. М.: Янус-К, 1999. С.389-398.
179. Денисюк А.П. Пороха// Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы/ Под ред. Б.П. Жукова. М.: Янус-К, 1999. С.398- 404.
180. Schumbert Hilttar. Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry: У.22. Propellants VCH Publishers, 1993. P. 185-209.
181. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.
182. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Машиностроение, 1972. 207с.
183. Гиндич В.И. Технология пироксилиновых порохов: Т.2. Производство порохов. Казань: Тат. газ.-журн. изд-во , 1995. 400 с.

184. Urbariski T. Composite propellants for rockets// Chemistry and Technology of Explosives: V.3. Warszawa: Pergamon Press, 1967. P.365-394.
185. Фиошина М. А., Русин Д. Л. Основы химии и технологии порохов и твердых ракетных топлив //Д.И. Менделеева. М. – 2001.
186. Денисюк А.П., Шабалин В.С., Шепелев Ю.Г. Закономерности горения систем, состоящих из октогена и связующего, способного к самостоятельному горению // Физика горения и взрыва, 1998, Т.34, №5, с.59-69
187. Гулаков М.Ю., Шишков В.О., Денисюк А.П. Влияние октогена и металлического горючего на эффективность действия катализаторов на горение топлива на основе нитрата аммония // Успехи в химии и химической технологии, 2021, Т.35, №10(245), с.22-24
188. Cohen N.S., Price C.F. Combustion of nitramine propellants // J. Spacecraft Rockets, 12 (10), 1975, pp. 608-612 DOI: 10.1134/S0010508212020062
189. Naya T., Kohga M. Influences of particle size and content of HMX on burning characteristics of HMX-based propellant // Aerospace Science and Technology, 27, 2013, pp. 209-215 DOI:10.1016/J.AST.2012.08.012
190. Денисюк А.П., Демидова Л.А. Особенности влияния некоторых катализаторов на горение баллистических порохов // Физика горения и взрыва. – 2004. - Т.40. - №3. - С.69-76.
191. Денисюк А. П. и др. Влияние гексогена и октогена на эффективность действия катализаторов горения баллистических порохов //Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – №. 2. – С. 77-83.
192. Сизов В.А., Денисюк А.П., Нгуен Зюи Туан, Шведова А.В. Влияние углеродных нанотрубок на скорость горения энергонасыщенных материалов // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение»: материалы II Международной научно-практической конференции: 15-17 ноября 2017. с. 155-157.

193. Влияние углеродных нанотрубок на закономерности катализа горения пороха / А.П. Денисюк, Ю.М. Милёхин, Л.А. Демидова, В.А. Сизов // Доклады Академии наук. – 2018. - Том 483. - №6. - с. 628-630.
194. Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes / S. Berber, Y.-K. Kwon, D. Tománek // Physical Review Letters, 2000, Vol.84, Issue 20, pp.4613-4616.
195. Синдицкий В.П., Чёрный А.Н., Марченков Д.А. Механизм катализа горения производными ферроцена. 2. Горение топлив на основе перхлората аммония с производными ферроцена // Физика горения и взрыва, 2014, Т.50, №2, с. 40-50
196. Handley J. C., Strahle W. C. Behavior of several catalysts in the combustion of solid propellant sandwiches //AIAA Journal. – 1975. – Т. 13. – №. 1. – С. 5-6.
197. Муравьев Н. В., Пивкина А. Н., Стрелецкий А. Н. [и др.] Влияние диоксида титана на термическое разложение октогена // Горение и взрыв. – 2013. – № 6. – С. 195-200
198. Pang W. et al. Effects of different nano-sized metal oxide catalysts on the properties of composite solid propellants //Combustion Science and Technology. – 2016. – Т. 188. – №. 3. – С. 315-328.
199. V. A. Arkhipov, S. S. Bondarchuk, A. G. Korotkikh, V. T. Kuznetsov, A. A. Gromov, S. A. Volkov, L. N. Revyagin, Influence of Aluminum Particle Size on Ignition and Nonstationary Combustion of Heterogeneous Condensed Systems, Combust. Explos. Shock Waves 2012, 48, 625–635.
200. J. Zhi, S. F. Li, F. Q. Zhao, Z. R. Liu, C. M. Yin, Y. Luo, S. W. Li, Research on the Combustion Properties of Propellants with Low Content of Nano Metal Powders, Propellants Explos. Pyrotech. 2006, 31, 139–147.
201. N. Zhigach, I. O. Leipunskii, A. N. Pivkina, N. V. Muravyev, K. A. Monogarov, M. L. Kuskov, E. S. Afanasenkova, N. G. Berezkina, P. A. Pshechenkov, A. A. Bragin, Aluminum/HMX Nanocomposites: Synthesis.

- Microstructure and Combustion, *Combust. Explos. Shock Waves* 2015, 51, 100–106
202. Z. Jiang, S.-F. Li, F.-Q. Zhao, P. Chen, C.-M. Yin, S.-W. Li, Effect of nano metal powder on the thermal decomposition characteristics of HMX, *J. Propul. Technol.* 2002, 23, 258–261
203. A. Gromov, Y. Strokova, A. Kabardin, A. Vorozhtsov, U. Teipel, Experimental Study of the Effect of Metal Nanopowders on the Decomposition of HMX, AP and AN, *Propellants Explos. Pyrotech.* 2009, 34, 506–512.
204. J. Zhi, S. F. Li, F. Q. Zhao, Z. R. Liu, C. M. Yin, Y. Luo, S. W. Li, Research on the Combustion Properties of Propellants with Low Content of Nano Metal Powders, *Propellants Explos. Pyrotech.* 2006, 31, 139–147
205. J.-M. Gao, L. Wang, H.-J. Yu, A.-G. Xiao, W.-B. Ding, Recent research progress in burning rate catalysts, *Propellants Explos. Pyrotech.* 2011, 35, 404–409.
206. M. E. Fuller, C. E. Schaefer, J. M. Lowey, Degradation of explosives-related compounds using nickel catalysts, *Chemosphere* 2007, 67, 419–427
207. Q.-L. Yan, F.-Q. Zhao, K. K. Kuo, X.-H. Zhang, S. Zeman, L. T. De Luca, Catalytic effects of nano additives on decomposition and combustion of RDX-, HMX-, and AP-based energetic compositions, *Prog. Energy Combust. Sci.* 2016, 57, 75–136.
208. X.-P. Fan, X. Wang, Z.-R. Liu, H.-M. Tan, Catalysis of nano Cu powder on the thermal decomposition of HMX and RDX, *Energ. Mater.* 2005, 13, 284–287.
209. M. Kohga, Thermal Decomposition Behaviors and Burning Characteristics of Ammonium Nitrate/Polytetrahydrofuran/ Glycerin-based Composite Propellants Supplemented with MnO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Propellants Explos. Pyrotech.* 2017, 42, 665– 670
210. Gromov A. A. et al. Characterization of Aluminum Powders: III. Non-Isothermal Oxidation and Combustion of Modern Aluminized Solid

- Propellants with Nanometals and Nanooxides //Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2020. – Т. 45. – №. 5. – С. 730-740.
211. Pang W. Q. et al. Effects of Different Nano-Metric Particles on the Properties of Composite Solid Propellants //Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2014. – Т. 39. – №. 3. – С. 329-336.
212. Теселкин В. А., Маршаков В. Н. Исследование чувствительности к удару бинарных композиций измельченных твердых ракетных топлив с углем //Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34. – №. 4. – С. 113-116.
213. ГОСТ 4545-88 Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения характеристик чувствительности к удару
214. ГОСТ 6058-2022 Порошок алюминиевый. Технические условия  
Дата актуализации: 01.01.2024
215. Гурский Б.Э., Чичинадзе А.В. Тепловая задача трения // Современная трибология: Итоги и перспективы / Отв. ред. К.В. Фролов.- М.: Издательство ЛКИ, 2008.- С. 297- 366.
216. Kibombo, H. S. Versatility of heterogeneous photocatalysis: Synthetic methodologies epitomizing the role of silica support in TiO<sub>2</sub> based mixed oxides / H. S. Kibombo, R. Peng, S. Rasalingam, R. T. Koodali // Catalysis Science and Technology. – 2012. – V.2. – P. 1737–1766.

## Приложение 1.

Результаты испытаний чувствительности смесей аммиачной селитры с  
алюминием

Смесь Аммиачная селитра - НРА

Таблица 39 – Результаты экспериментов с чистой аммиачной селитрой

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P <sub>эксп</sub> , ГПа	σ, ГПа	σ <sub>ср</sub> , ГПа	Взрыв/отказ
10	23,58	23,65	0,07	67,97	2,066	0,073	0,061	0
20	24,17	24,3	0,13	28,13	0,855	0,054		0
30	23,15	23,4	0,25	11,25	0,342	0,039		0
40	24,09	24,35	0,26	12,19	0,370	0,044		0
50	24,18	24,53	0,35	15,47	0,470	0,072		0
60	23,9	24,35	0,45	9,38	0,285	0,054		0
70	24,03	24,54	0,51	12,19	0,370	0,078		0
80	23,93	24,63	0,7	7,5	0,228	0,061		0
90	23,79	24,57	0,78	8,91	0,271	0,078		0
100	23,99	24,85	0,86	6,09	0,185	0,057		0

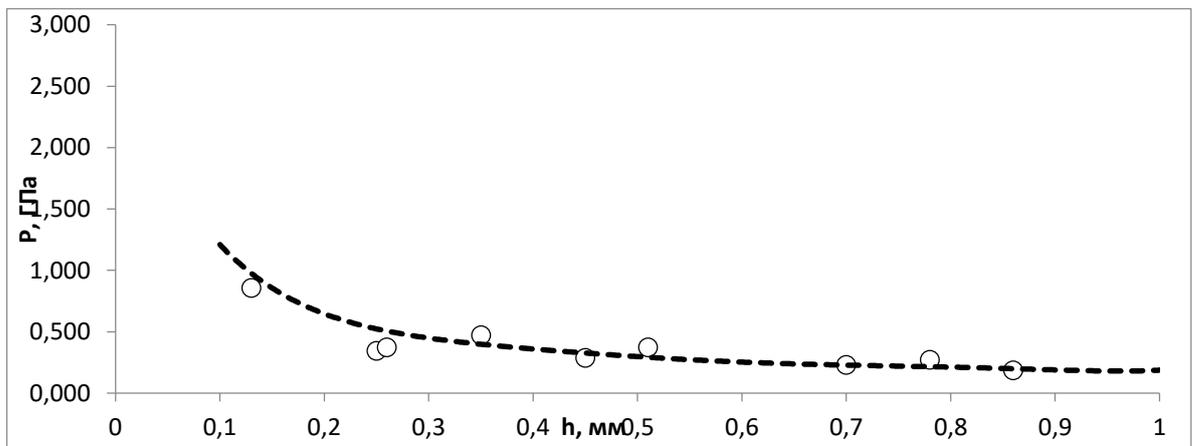


Рисунок 47 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от  
толщин изготавливаемого заряда аммиачной селитры

Таблица 40 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 90/10

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,05	24,08	0,03	65,63	2,158	0,033	0,070	0
20	24,17	24,24	0,07	20,16	0,663	0,023		0
30	23,15	23,35	0,2	13,13	0,432	0,041		0
40	24,09	24,32	0,23	15	0,493	0,053		0
50	24,18	24,55	0,37	10,78	0,355	0,057		0
60	23,9	24,29	0,39	10,78	0,355	0,060		0
70	24,03	24,55	0,52	11,72	0,385	0,082		0
80	23,93	24,61	0,68	10,31	0,339	0,089		0
90	23,79	24,51	0,72	12,19	0,401	0,109		0
100	23,99	24,85	0,86	11,72	0,385	0,119		0

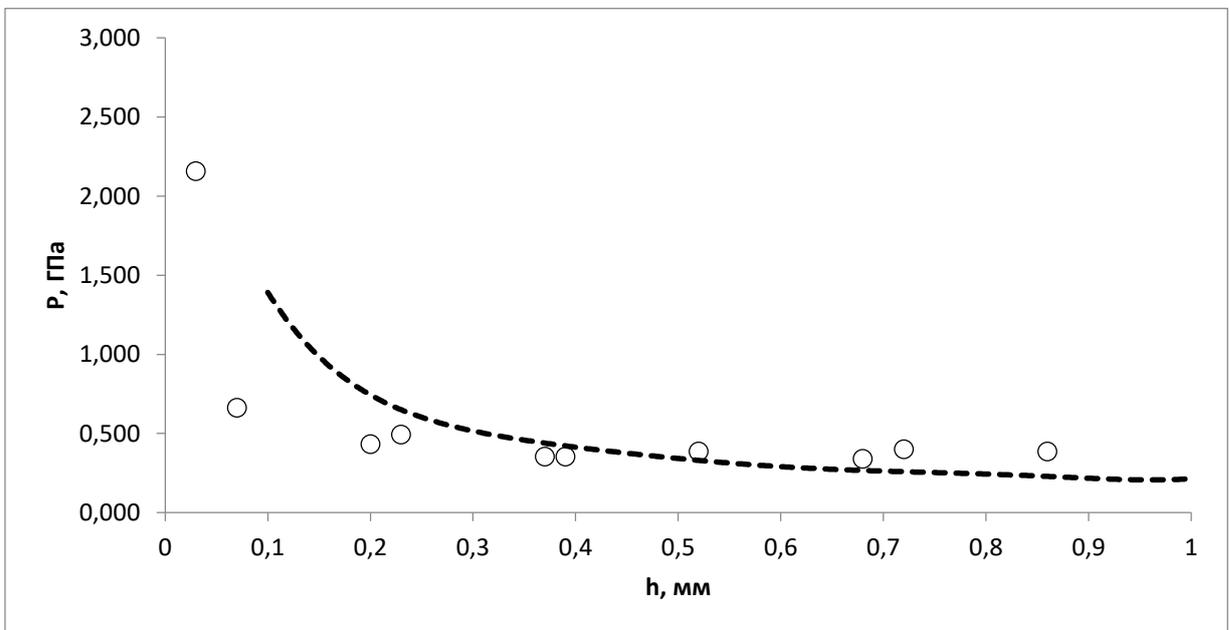


Рисунок 48 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 90/10

Таблица 41 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 90/10  
(уточнение эксперимента)

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,04	24,06	0,02	86,72	2,076	0,021	0,048	0
20	24,17	24,22	0,05	83,1	1,989	0,050		0
30	23,15	23,26	0,11	19,22	0,460	0,025		0
40	24,09	24,25	0,16	23,44	0,561	0,043		0
50	24,18	24,48	0,3	15	0,359	0,048		0
60	23,85	24,15	0,3	15	0,359	0,048		0
70	24,18	24,63	0,45	16,41	0,393	0,074		0
80	23,93	24,6	0,67	11,24	0,269	0,069		0
90	24,02	24,53	0,51	9,84	0,236	0,049		0
100	24,23	24,93	0,7	8,44	0,202	0,054		0

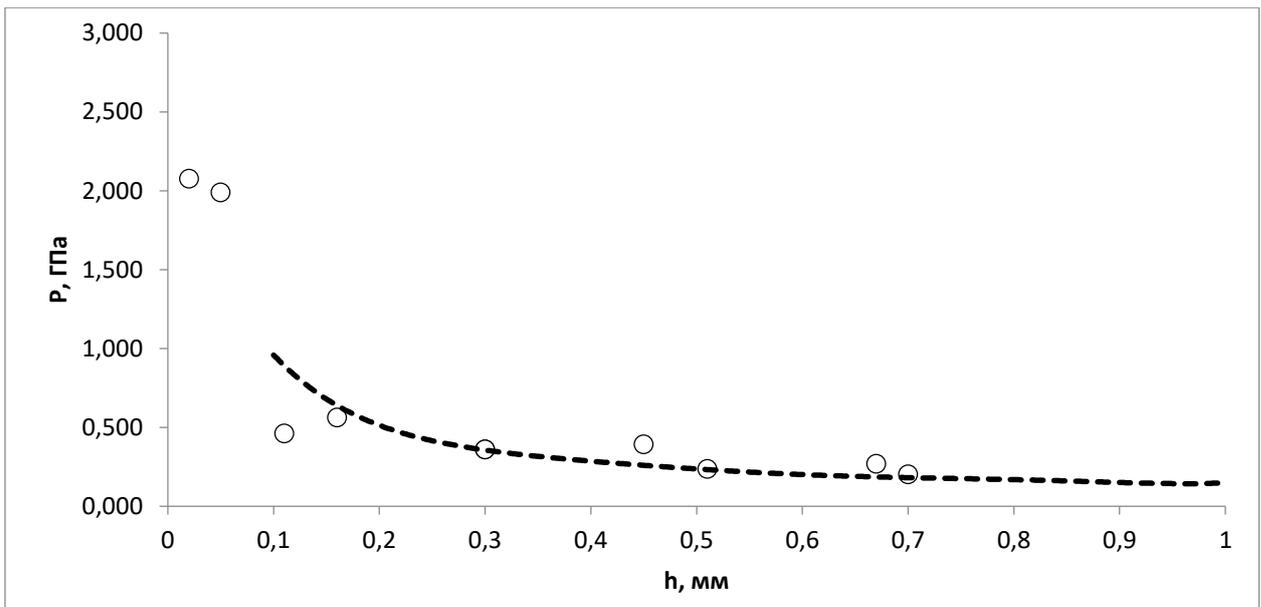


Рисунок 49 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 90/10 (вторая серия)

Таблица 42 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 85/15

МГ	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	Р эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,04	24,06	0,02	89,06	2,271	0,023	0,059	0
10	24,04	24,06	0,02	90,94	2,319	0,024		0
20	24,17	24,22	0,05	86,25	2,199	0,056		0
20	24,17	24,23	0,06	62,81	1,602	0,048		0
30	23,15	23,26	0,11	22,5	0,574	0,031		0
30	23,15	23,25	0,1	26,72	0,681	0,034		0
40	24,09	24,25	0,16	20,16	0,514	0,039		0
40	24,09	24,28	0,19	16,41	0,418	0,038		0
50	24,18	24,48	0,3	18,28	0,466	0,063		0
60	24,01	24,42	0,41	10,78	0,275	0,048		0
70	24,03	24,51	0,48	14,53	0,371	0,074		0
80	23,93	24,6	0,67	12,19	0,311	0,080		0
90	23,79	24,55	0,76	13,59	0,347	0,098		0
100	23,99	24,85	0,86	13,13	0,335	0,103		0

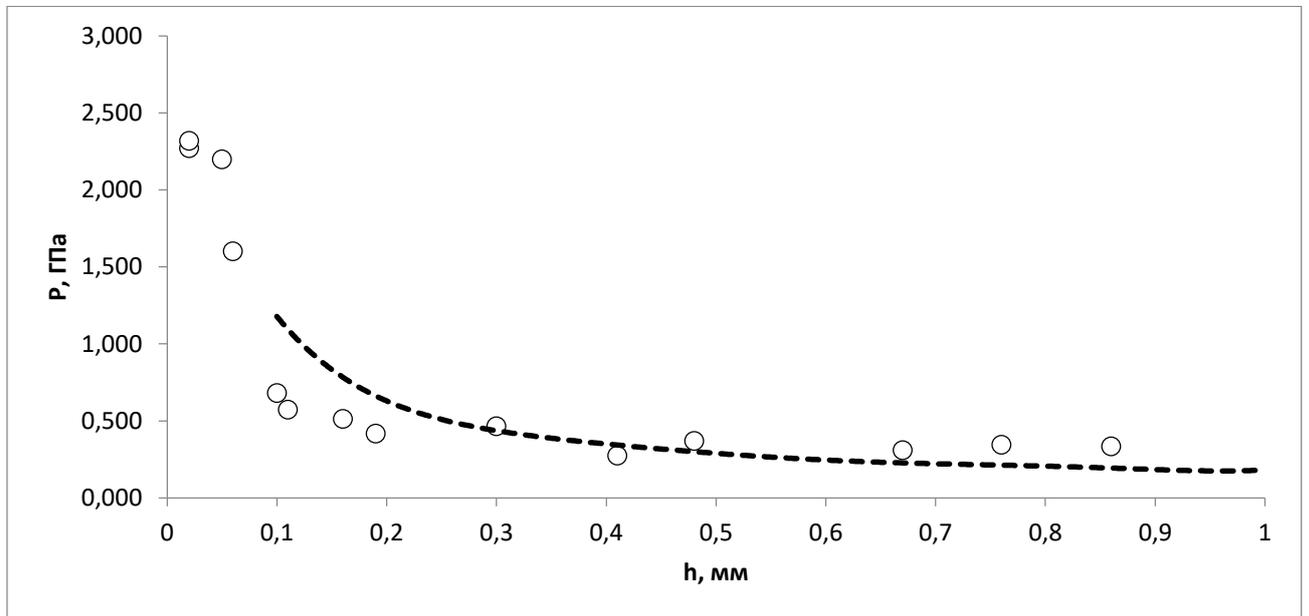


Рисунок 50 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 85/15

Таблица 43 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 85/15  
(уточнение эксперимента)

мг	h0, мм	hк, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,04	24,06	0,02	88,59	2,204	0,023	0,054	0
20	24,17	24,21	0,04	37,03	0,921	0,019		0
30	23,15	23,26	0,11	18,75	0,466	0,025		0
40	24,09	24,28	0,19	18,28	0,455	0,041		0
50	24,18	24,47	0,29	15,94	0,397	0,052		0
60	23,85	24,18	0,33	15,94	0,397	0,058		0
70	24,18	24,62	0,44	14,06	0,350	0,065		0
80	23,93	24,62	0,69	18,75	0,466	0,123		0
90	24,02	24,57	0,55	12,66	0,315	0,070		0
100	24,23	24,88	0,65	10,31	0,256	0,065		0

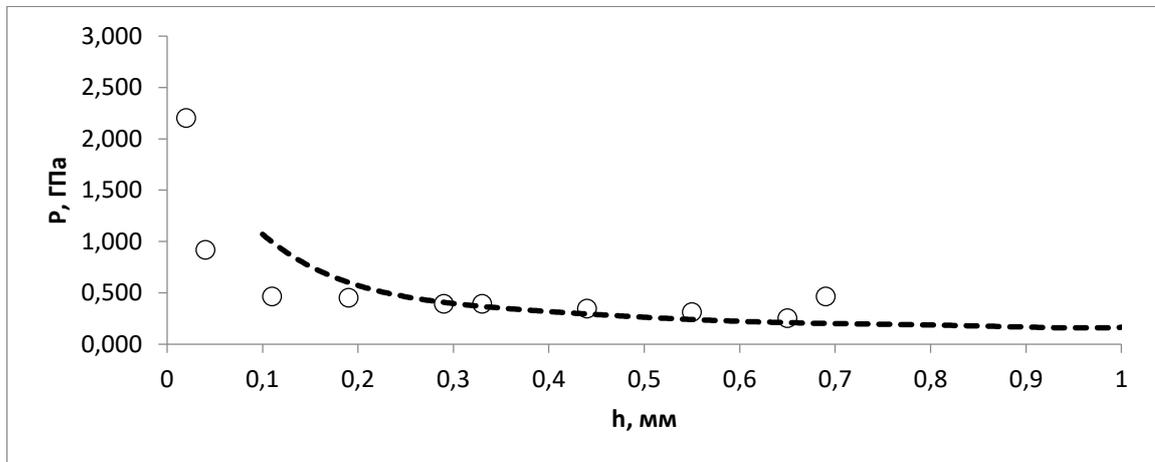


Рисунок 51 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 85/15 (вторая серия)

Таблица 44 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 80/20

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	23,58	23,6	0,02	66,09	2,304	0,024	0,073	0
20	24,17	24,22	0,05	36,56	1,275	0,032		1
30	23,15	23,28	0,13	15,47	0,539	0,034		1
40	24,09	24,28	0,19	19,22	0,670	0,060		1
40	24,09	24,29	0,2	19,69	0,551	0,052		1
50	24,18	24,5	0,32	17,34	0,485	0,069		0
60	24,01	24,35	0,34	16,88	0,589	0,088		0
70	24,03	24,55	0,52	13,59	0,474	0,101		0
80	23,93	24,61	0,68	11,25	0,392	0,102		0
90	23,79	24,56	0,77	9,84	0,343	0,098		0
100	23,99	24,8	0,81	9,38	0,327	0,097		0

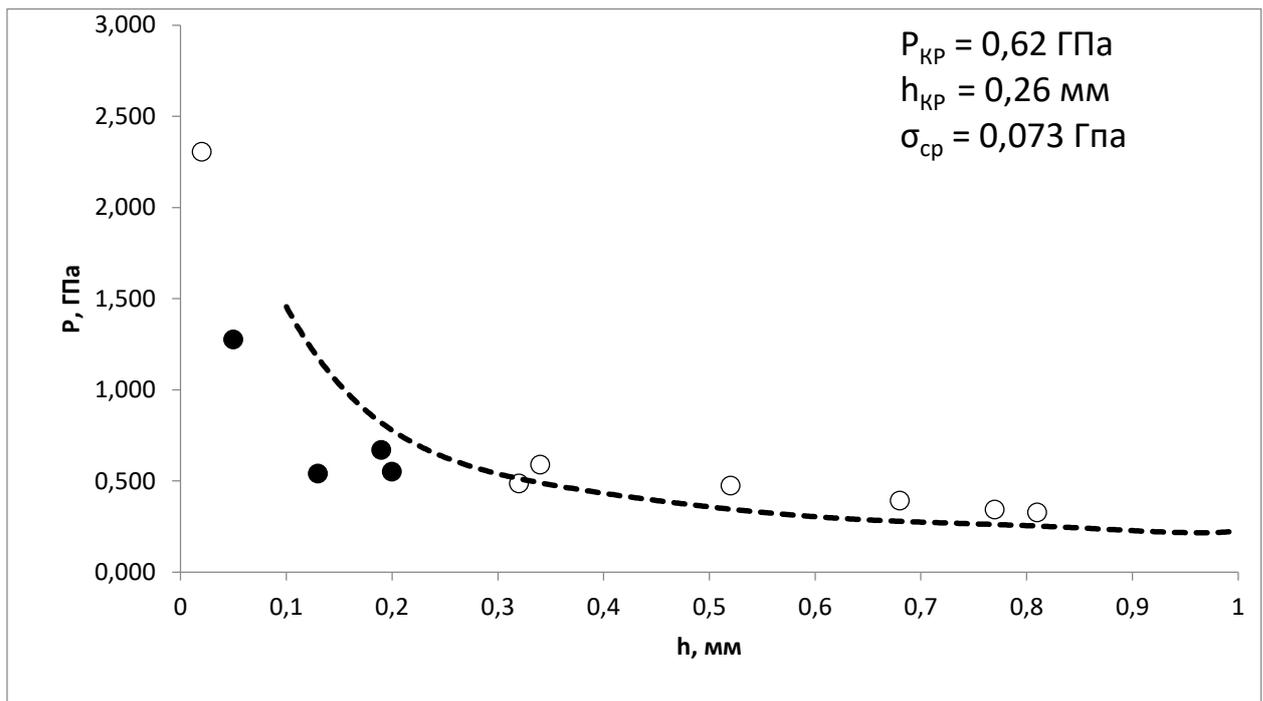


Рисунок 52 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 80/20

Таблица 45 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 75/25

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,05	24,07	0,02	52,03	1,705	0,018	0,079	1
20	24,17	24,21	0,04	42,66	1,398	0,028		1
30	23,15	23,27	0,12	22,97	0,753	0,044		1
40	24,09	24,26	0,17	30	0,983	0,080		1
50	24,18	24,54	0,36	16,41	0,538	0,085		0
60	23,9	24,27	0,37	18,28	0,599	0,097		0
70	24,03	24,5	0,47	11,72	0,384	0,075		0
80	23,93	24,6	0,67	13,59	0,445	0,115		0
90	23,79	24,51	0,72	12,19	0,399	0,109		0
100	23,99	24,81	0,82	14,06	0,461	0,138		0

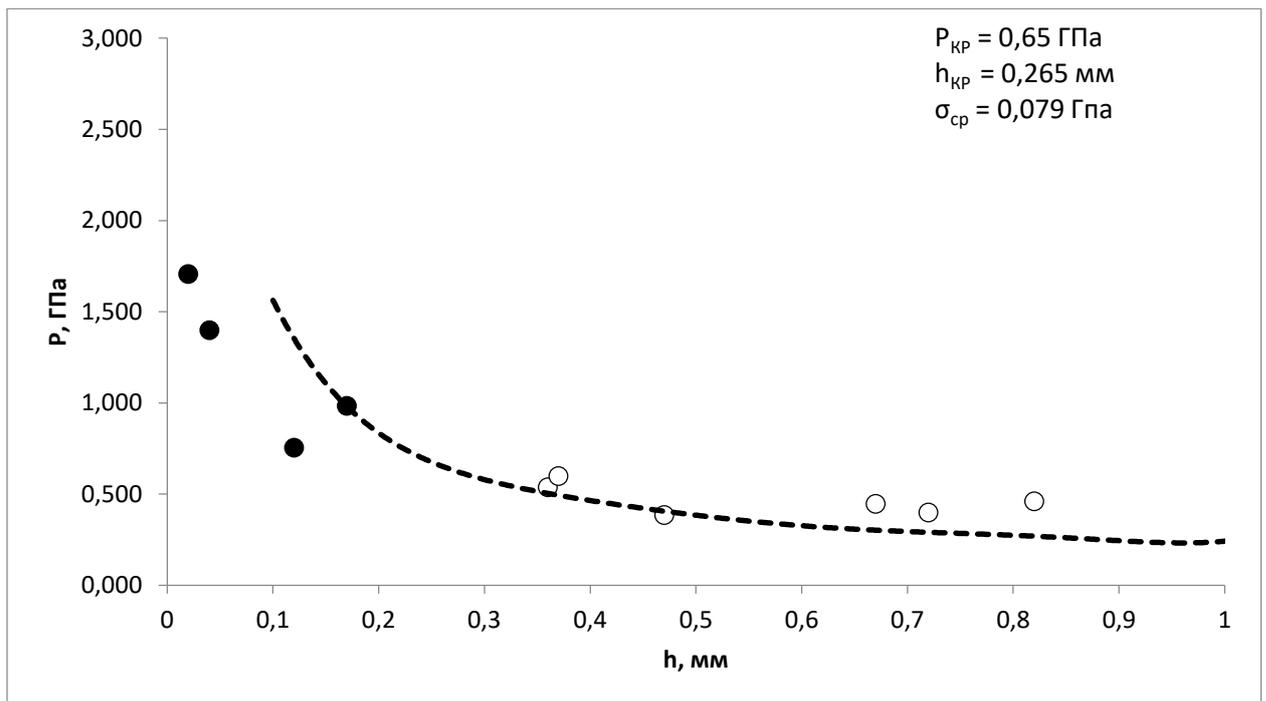


Рисунок 53 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 75/25

Таблица 46 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 70/30

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,04	24,06	0,02	86,72	2,146	0,022	0,080	0
20	24,17	24,21	0,04	43,13	1,067	0,022		1
30	23,15	23,29	0,14	35,16	0,870	0,059		1
40	24,09	24,28	0,19	34,22	0,847	0,076		1
50	24,18	24,5	0,32	29,53	0,731	0,104		0
60	24,01	24,4	0,39	14,53	0,360	0,061		0
70	24,03	24,52	0,49	19,22	0,476	0,097		0
80	23,93	24,58	0,65	13,13	0,325	0,082		0
90	23,79	24,48	0,69	16,88	0,418	0,110		0
100	23,99	24,85	0,86	14,53	0,360	0,111		0

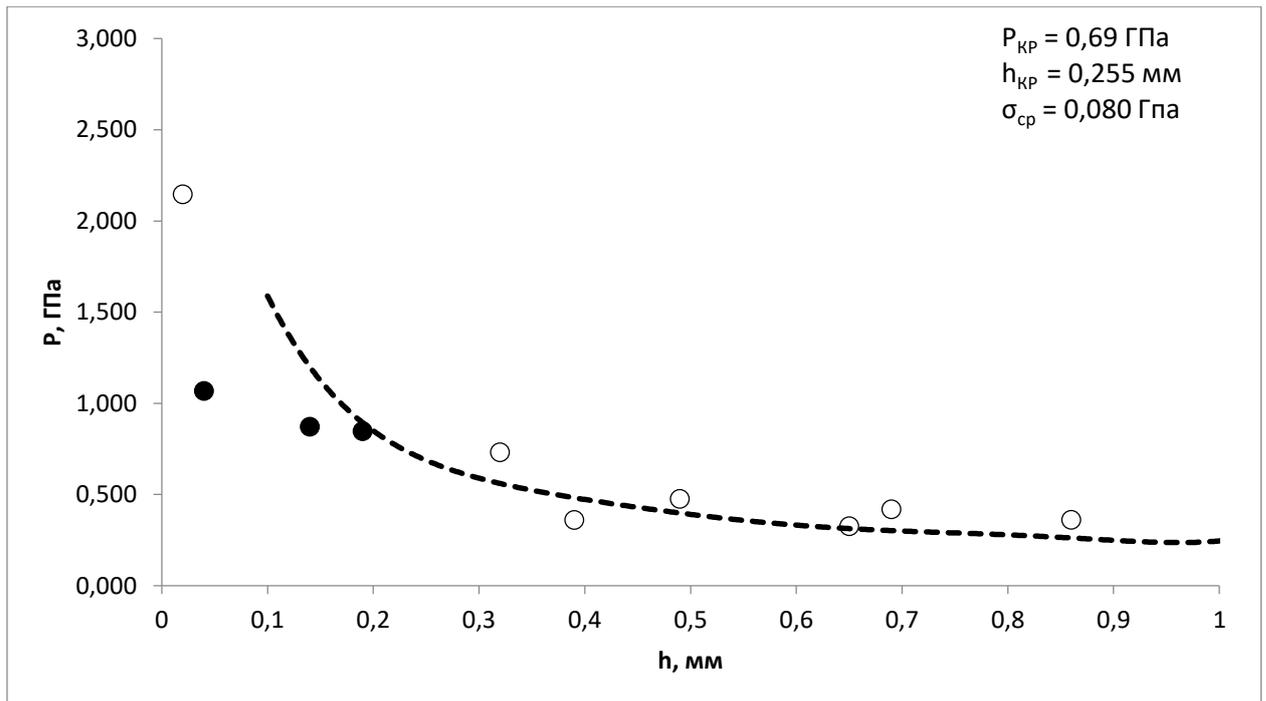


Рисунок 54 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 70/30

Таблица 47 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 60/40

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P <sub>эксп</sub> , ГПа	σ, ГПа	σ <sub>ср</sub> , ГПа	Взрыв/отказ
10	24,04	24,06	0,02	90	2,247	0,023	0,112	0
20	24,17	24,21	0,04	63,75	1,592	0,032		1
30	23,15	23,28	0,13	39,84	0,995	0,063		1
40	24,09	24,29	0,2	20,16	0,503	0,047		1
50	24,18	24,48	0,3	28,59	0,714	0,096		1
60	24,01	24,35	0,34	30,94	0,772	0,116		1
70	24,03	24,49	0,46	25,78	0,644	0,124		1
80	23,93	24,54	0,61	34,69	0,866	0,208		1
90	23,79	24,47	0,68	24,84	0,620	0,162		0
100	23,99	24,8	0,81	21,56	0,538	0,159		0

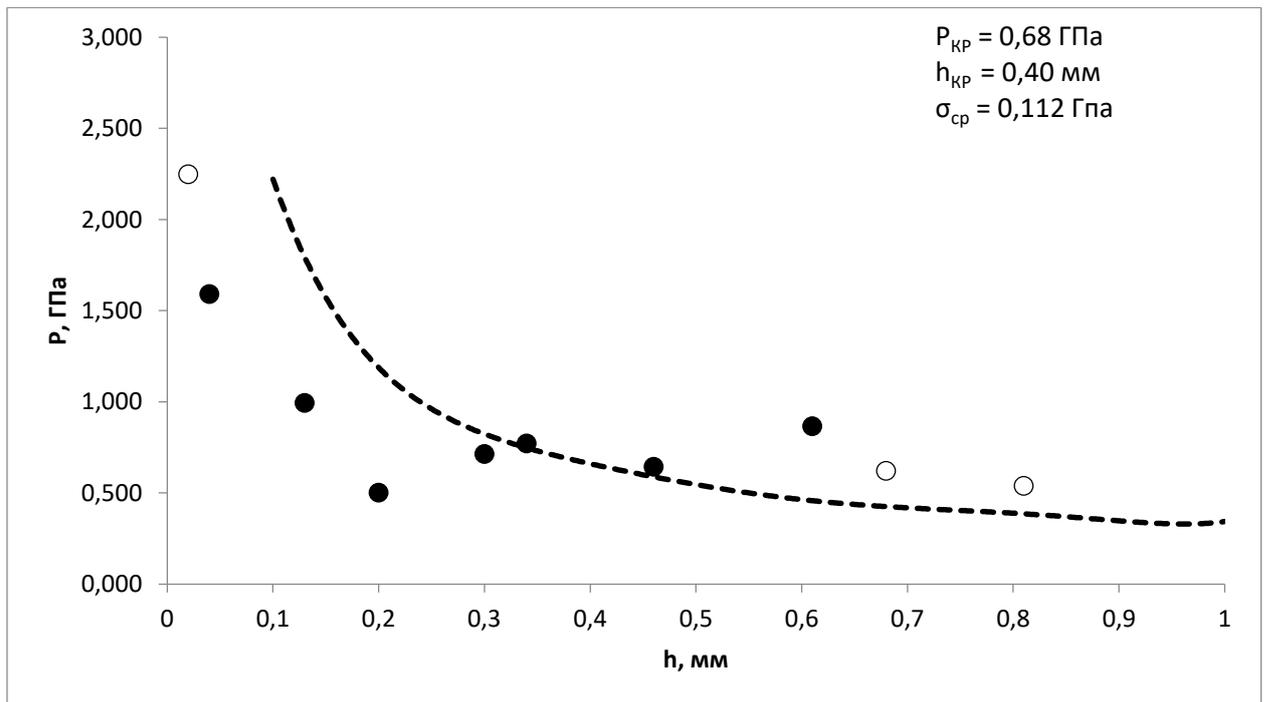


Рисунок 55 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 60/40

Таблица 48 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 50/50

мГ	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,05	24,07	0,02	69,38	2,145	0,022	0,115	0
20	24,17	24,26	0,09	69,38	2,145	0,096		0
30	23,15	23,33	0,18	29,53	0,913	0,078		1
40	24,09	24,37	0,28	29,06	0,899	0,114		1
40	24,09	24,26	0,17	38,44	1,189	0,096		1
50	24,18	24,51	0,33	27,19	0,841	0,123		1
60	23,9	24,27	0,37	23,44	0,725	0,117		1
70	24,03	24,51	0,48	14,53	0,449	0,090		0
80	23,93	24,57	0,64	13,13	0,406	0,101		0
90	23,79	24,5	0,71	17,34	0,536	0,145		0
100	23,99	24,75	0,76	19,69	0,609	0,172		0

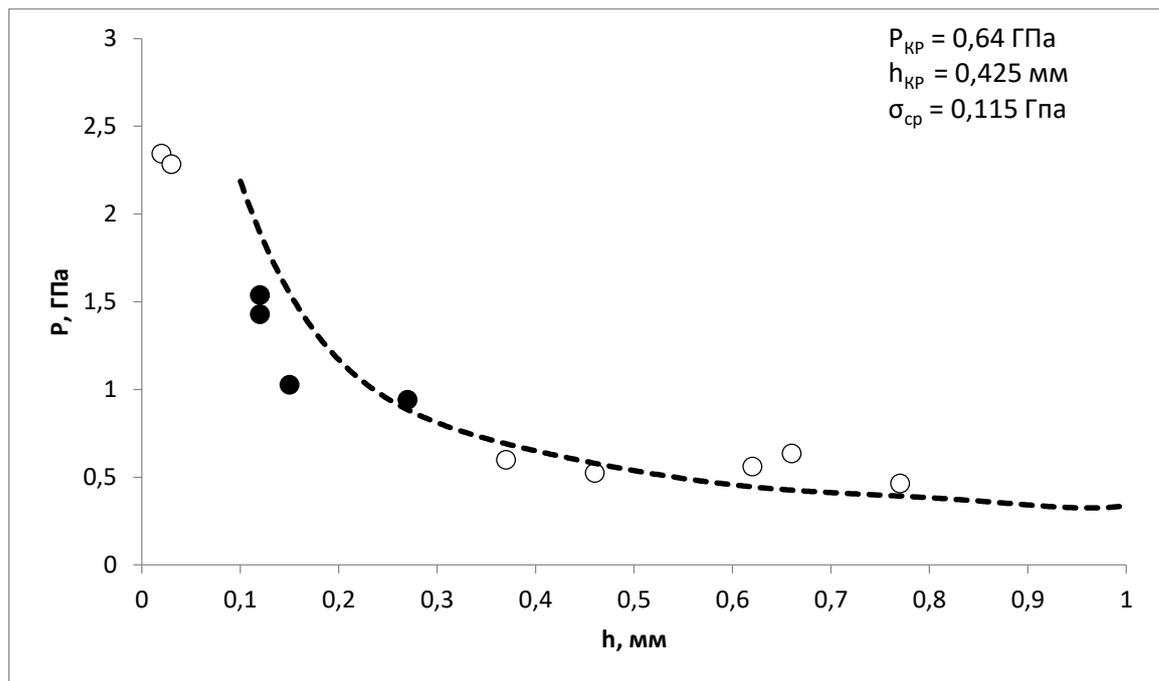


Рисунок 56 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 50/50

Таблица 49 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 50/50  
(вторая серия экспериментов)

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,04	24,06	0,02	90	2,344	0,024	0,110	0
20	24,17	24,2	0,03	87,66	2,283	0,035		0
30	23,15	23,27	0,12	59,06	1,538	0,090		1
30	23,15	23,27	0,12	54,84	1,428	0,084		1
40	24,09	24,24	0,15	39,38	1,026	0,074		1
50	24,18	24,45	0,27	36,09	0,940	0,116		1
60	24,01	24,38	0,37	22,97	0,598	0,096		0
70	24,03	24,49	0,46	20,16	0,525	0,101		0
80	23,93	24,55	0,62	21,56	0,561	0,137		0
90	23,79	24,45	0,66	24,38	0,635	0,162		0
100	23,99	24,76	0,77	17,81	0,464	0,133		0

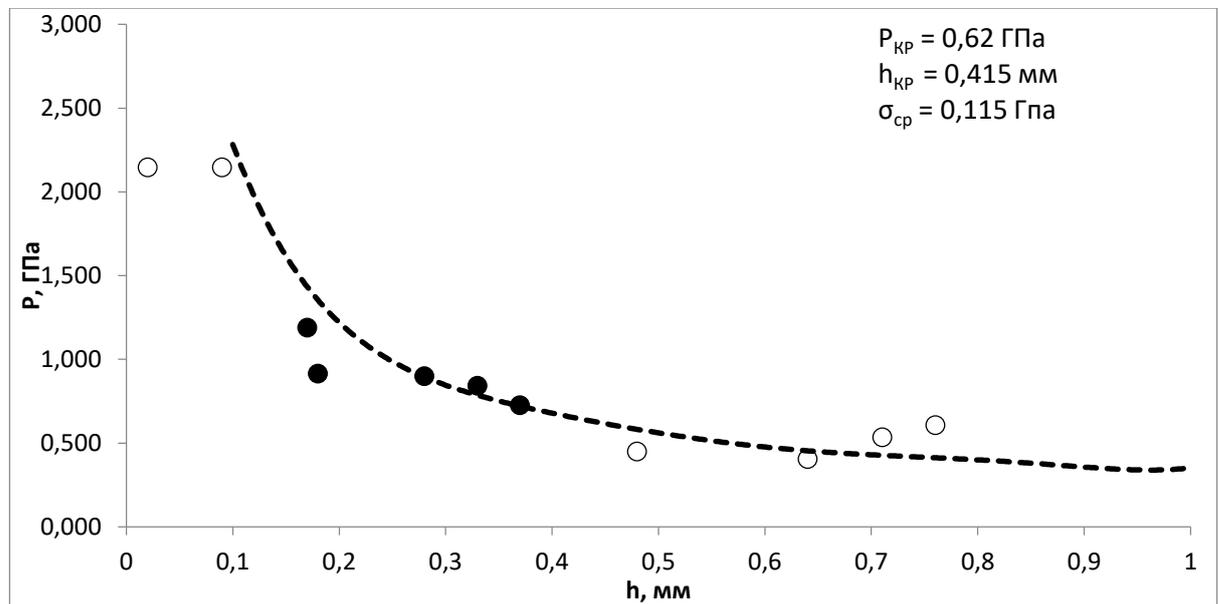


Рисунок 57 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 50/50 (вторая серия экспериментов)

Таблица 50 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 40/60

МГ	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P <sub>эксп</sub> , ГПа	σ, ГПа	σ <sub>ср</sub> , ГПа	Взрыв/отказ
10	24,42	24,48	0,06	40,78	1,157	0,035	0,106	1
20	24,41	24,55	0,14	38,44	1,091	0,074		1
30	24,41	24,6	0,19	31,88	0,905	0,081		1
40	24,43	24,66	0,23	33,28	0,945	0,101		1
50	24,4	24,73	0,33	29,53	0,838	0,123		1
60	24,42	24,82	0,4	26,72	0,758	0,131		1
70	24,43	24,86	0,43	24,84	0,705	0,129		1
80	24,37	24,85	0,48	18,75	0,532	0,106		0
90	24,38	24,91	0,53	21,56	0,612	0,132		0
100	24,42	25,01	0,59	22,5	0,639	0,150		0

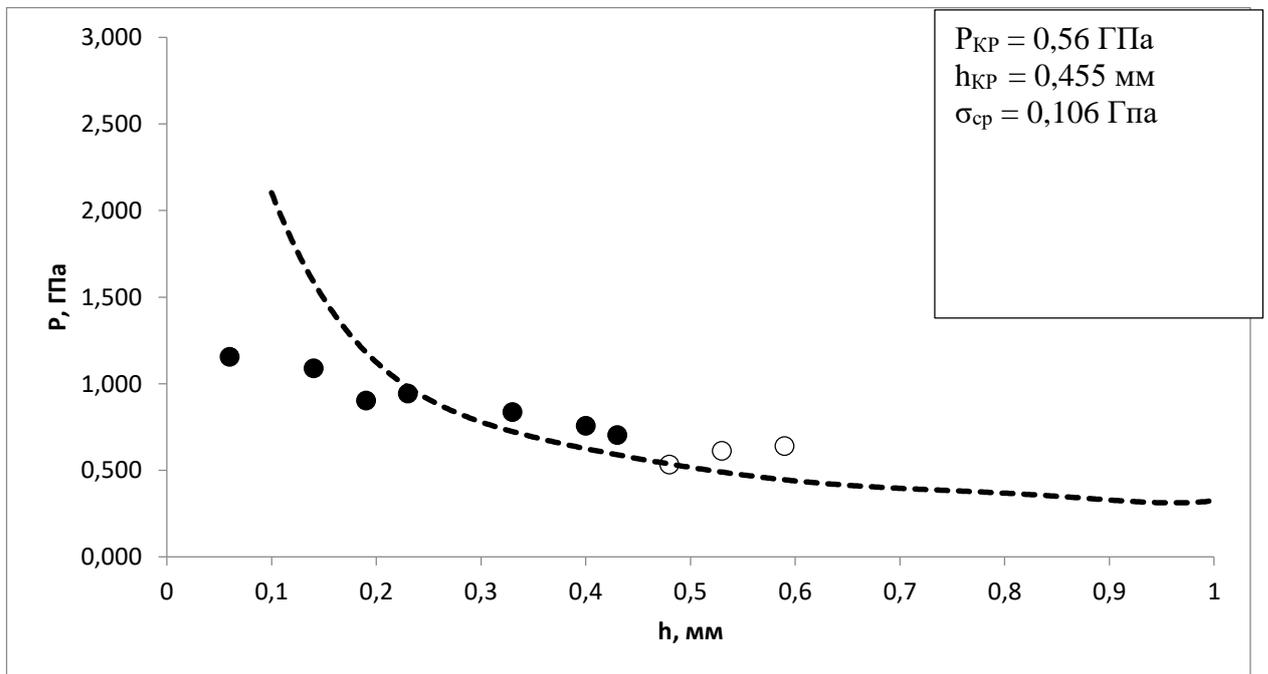


Рисунок 58 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 40/60

Таблица 51 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 30/70

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P <sub>эксп</sub> , ГПа	σ, ГПа	σ <sub>ср</sub> , ГПа	Взрыв/отказ
10	24,01	24,04	0,03	85,78	2,130	0,033	0,166	0
20	24,09	24,18	0,09	74,53	1,850	0,083		1
30	23,07	23,19	0,12	82,5	2,048	0,120		1
40	24,02	24,2	0,18	52,5	1,303	0,111		1
50	24,13	24,41	0,28	46,41	1,152	0,146		1
60	23,8	24,12	0,32	50,16	1,245	0,178		1
70	24,37	24,75	0,38	36,56	0,908	0,150		1
80	24,4	24,84	0,44	46,88	1,164	0,217		1
90	23,95	24,43	0,48	31,88	0,791	0,158		1
100	24,23	24,77	0,54	33,75	0,838	0,184		1
110	24,01	24,61	0,6	39,84	0,989	0,235		1
120	24,09	24,72	0,63	28,59	0,710	0,175		0
130	23,07	23,75	0,68	35,63	0,885	0,231		0

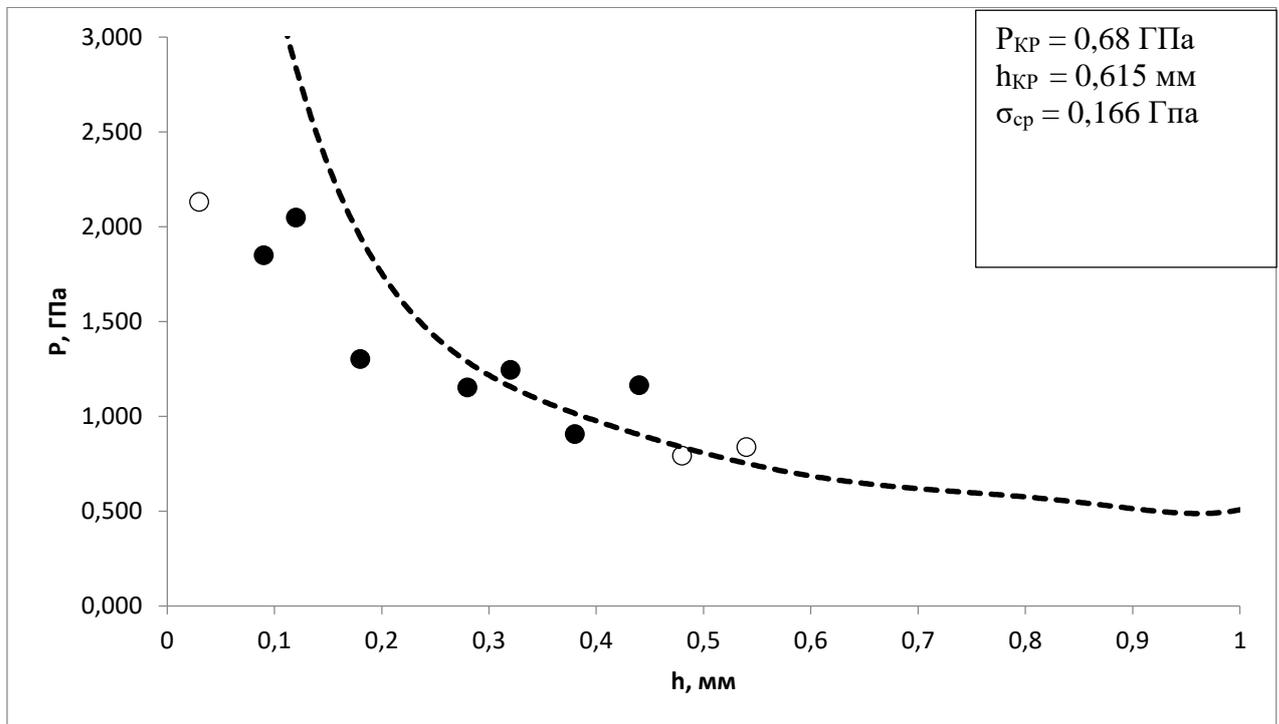


Рисунок 59 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 30/70

Таблица 52 – Результаты экспериментов смеси АС/НРА в соотношении 20/80

МГ	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	Р эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа	Взрыв/отказ
10	24,39	24,44	0,05	85,31	2,134	0,054	0,197	0
20	24,45	24,54	0,09	76,88	1,923	0,086		1
30	24,43	24,56	0,13	68,44	1,712	0,108		1
40	24,39	24,63	0,24	64,69	1,618	0,179		1
50	24,39	24,66	0,27	72,19	1,806	0,222		1
60	24,16	24,47	0,31	60,47	1,513	0,210		1
70	24,39	24,79	0,4	38,91	0,973	0,167		1
80	24,44	24,88	0,44	44,53	1,114	0,207		1
90	24,39	24,9	0,51	36,09	0,903	0,189		1
100	24,41	24,97	0,56	47,34	1,184	0,267		1
110	24,39	24,97	0,58	29,06	0,727	0,168		1
120	24,45	25,09	0,64	27,19	0,680	0,170		1
130	24,43	25,12	0,69	32,81	0,821	0,217		1
140	24,39	25,12	0,73	34,22	0,856	0,235		0
150	24,39	25,2	0,81	23,91	0,598	0,177		0
160	24,39	25,25	0,86	29,06	0,727	0,224		0
170	24,23	25,12	0,89	35,16	0,879	0,278		0
180	24,53	25,45	0,92	27,19	0,680	0,220		0
190	24,45	25,41	0,96	23,44	0,586	0,195		0
200	24,44	25,02	1,058	25,31	0,633	0,225		0

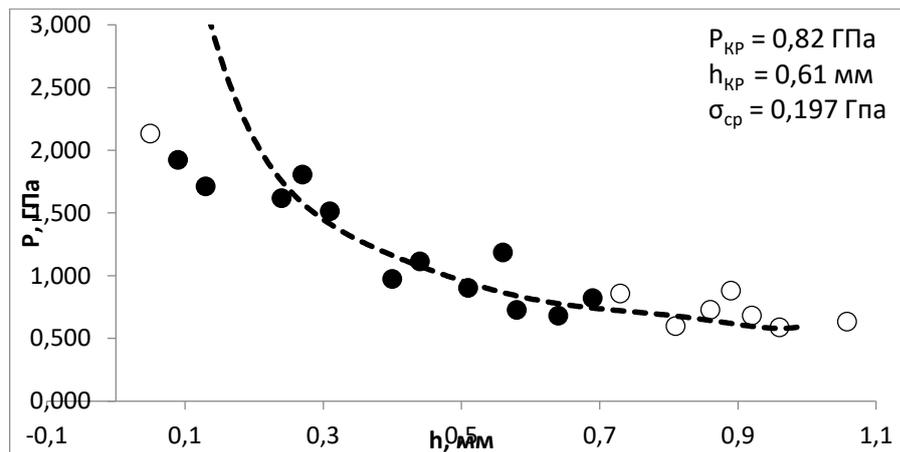


Рисунок 60 – Графическая зависимость толщины разрушения образцов от толщин изготавливаемого заряда смеси аммиачной селитры с наноразмерным алюминием в соотношении 20/80

## Приложение 2

Результаты экспериментальных данных смесей окфол-3,5 с  
алюминием различной дисперсности

Смесь окфол-3,5/АСД-4

Таблица 53 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 90%/10%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,46	24,55	0,09	94,69	2,447	0,109	0,098
24,52	24,62	0,1	52,5	1,357	0,067	
24,47	24,67	0,2	44,53	1,151	0,108	
24,49	24,71	0,22	33,75	0,872	0,089	
24,46	24,8	0,34	21,08	0,545	0,081	
24,47	24,9	0,43	17,34	0,448	0,082	
24,46	24,94	0,48	12,66	0,359	0,072	
24,48	25	0,52	12,16	0,345	0,073	
24,45	25,1	0,65	22,97	0,652	0,165	
24,45	25,14	0,69	18,75	0,532	0,140	

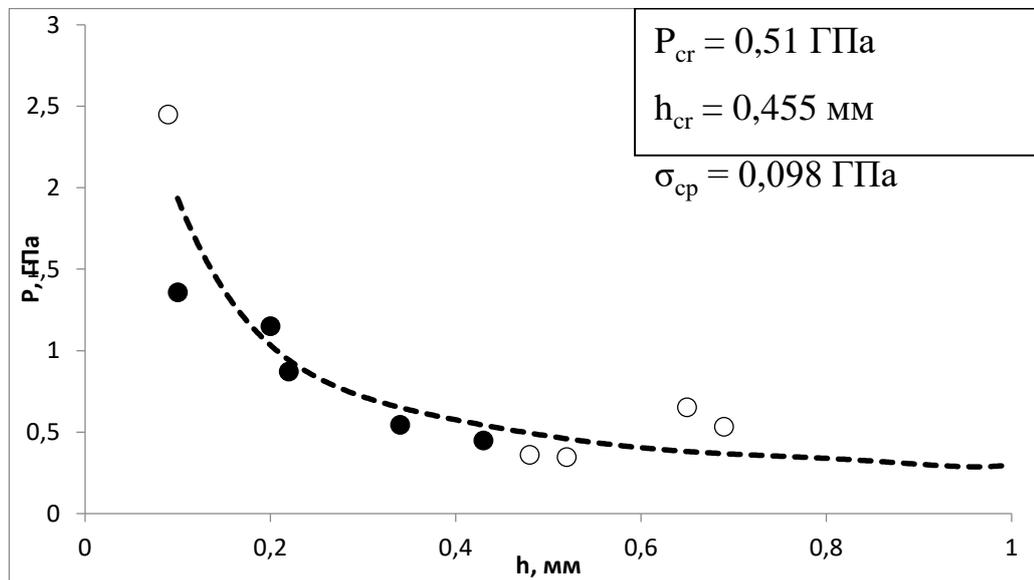


Рисунок 61 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 10%

Таблица 54 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 80%/20%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,46	24,52	0,06	70,31	1,996	0,060	0,072
24,52	24,59	0,07	55,31	1,570	0,055	
24,47	24,7	0,23	16,41	0,460	0,050	
24,49	24,74	0,25	20,16	0,572	0,066	
24,46	24,79	0,33	8,44	0,240	0,035	
24,47	24,85	0,38	12,66	0,359	0,059	
24,46	24,91	0,45	10,78	0,306	0,058	
24,48	24,96	0,48	19,69	0,559	0,112	
24,45	25,03	0,58	17,81	0,506	0,117	
24,45	25,12	0,67	12,66	0,359	0,093	

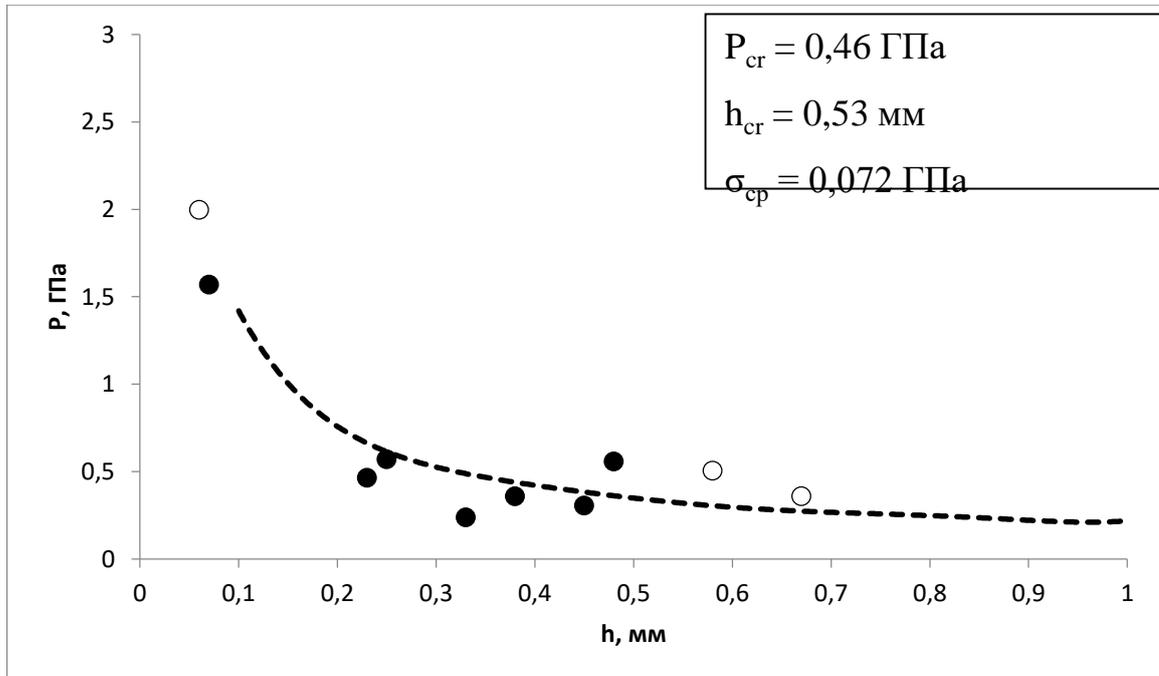


Рисунок 62 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 20%

Таблица 55 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 70%/30%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,46	24,53	0,07	64,69	2,522	0,089	0,106
24,52	24,6	0,08	63,75	2,485	0,099	
24,47	24,72	0,25	15,47	0,603	0,069	
24,49	24,77	0,28	15	0,585	0,074	
24,46	24,82	0,36	17,34	0,676	0,107	
24,47	24,93	0,46	19,69	0,768	0,148	
24,46	24,97	0,51	13,59	0,530	0,111	
24,48	25,04	0,56	14,53	0,566	0,128	
24,45	25,01	0,56	11,25	0,439	0,099	
24,45	25,13	0,68	10,78	0,420	0,110	

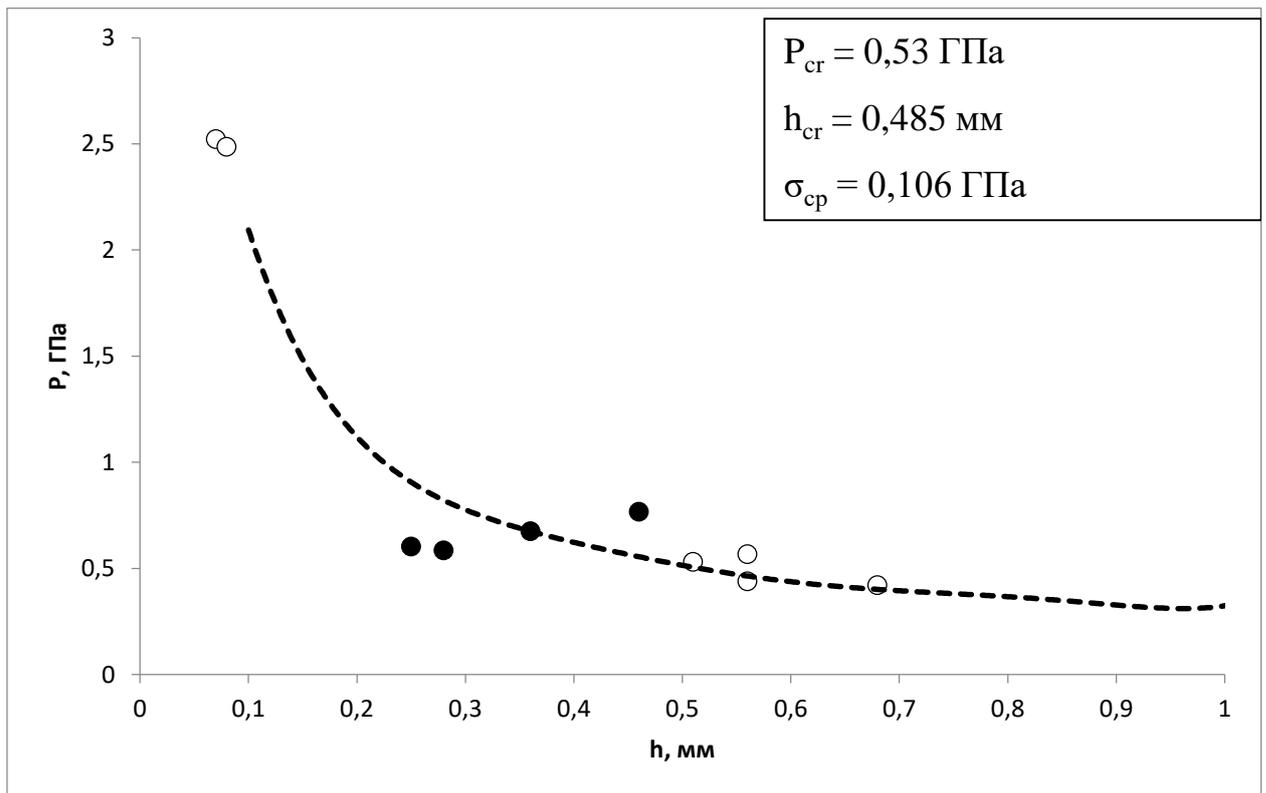


Рисунок 63 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 30%

Таблица 56 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 60%/40%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,8	23,83	0,03	73,59	2,326	0,036	0,099
23,8	23,87	0,07	73,13	2,312	0,081	
24,46	24,54	0,08	66,09	2,391	0,095	
23,86	23,95	0,09	26,25	0,830	0,037	
24,52	24,64	0,12	32,34	1,170	0,069	
23,84	23,98	0,14	30,47	0,963	0,065	
23,78	23,94	0,16	30,47	0,963	0,074	
23,83	24,1	0,27	28,13	0,889	0,109	
24,47	24,75	0,28	14,06	0,509	0,065	
23,68	23,98	0,3	34,69	1,097	0,148	
24,49	24,81	0,32	13,13	0,475	0,068	
23,86	24,23	0,37	14,06	0,444	0,072	
24,46	24,87	0,41	10,47	0,379	0,067	
23,87	24,29	0,42	22,03	0,696	0,125	
24,47	24,91	0,44	16,41	0,594	0,110	
24,46	24,92	0,46	21,56	0,780	0,150	
23,9	24,39	0,49	21,09	0,667	0,135	
23,92	24,46	0,54	15	0,474	0,104	
24,48	25,05	0,57	13,13	0,475	0,109	
24,45	25,04	0,59	17,34	0,627	0,147	
24,45	25,14	0,69	13,13	0,475	0,125	

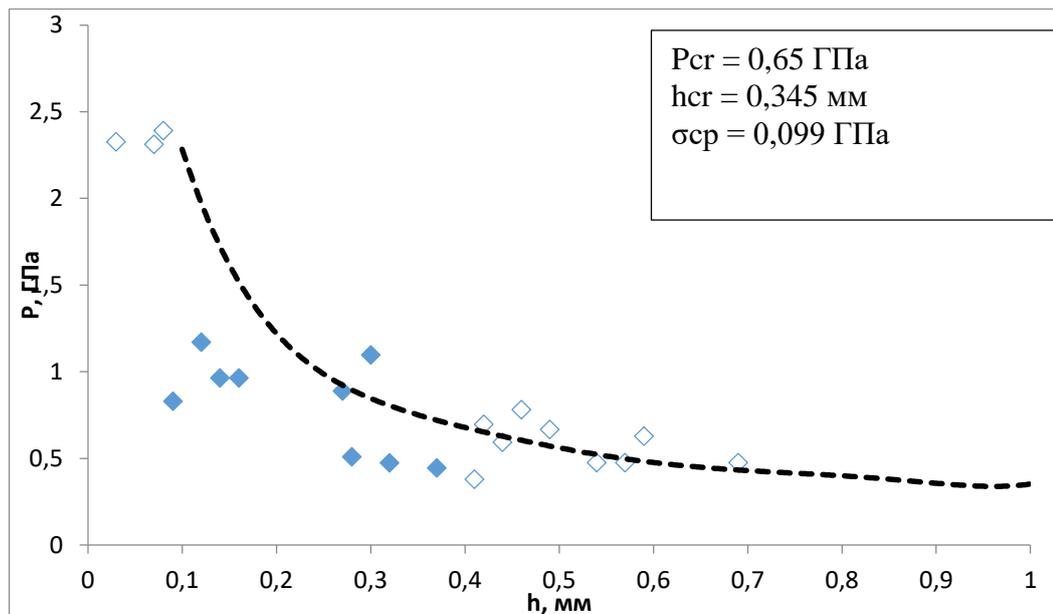


Рисунок 64 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 40%

Таблица 57 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 50%/50%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,46	24,54	0,08	40,78	1,475	0,059	0,117
30	24,47	24,73	0,26	31,41	1,136	0,135	
40	24,49	24,81	0,32	16,88	0,611	0,087	
50	24,46	24,81	0,35	25,31	0,916	0,141	
60	24,45	24,86	0,41	21,56	0,780	0,137	
70	24,42	24,88	0,46	13,59	0,492	0,095	
80	24,48	25,02	0,54	13,13	0,475	0,104	
90	24,45	25,05	0,6	17,34	0,627	0,149	
100	24,45	25,16	0,71	14,53	0,526	0,142	

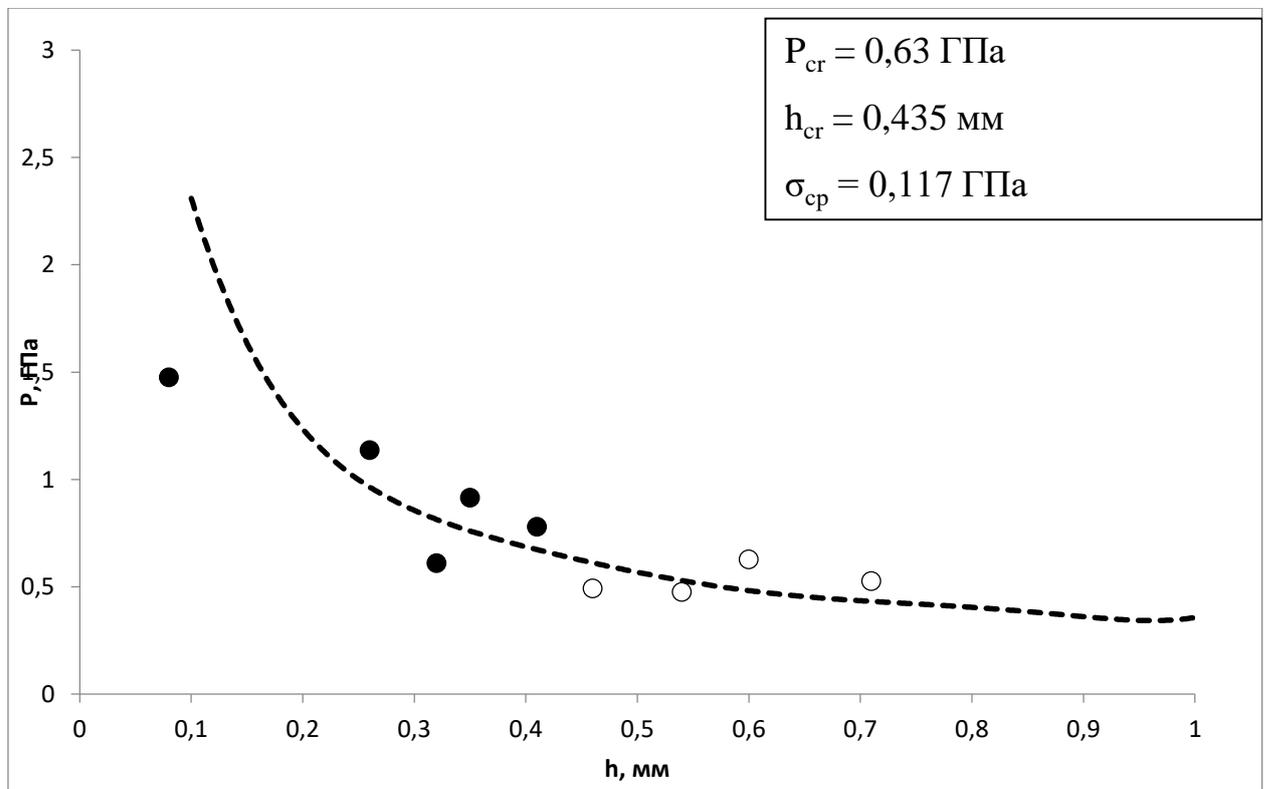


Рисунок 65 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 50%

Таблица 58 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 40%/60%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,83	23,86	0,03	57,16	2,289	0,035	0,115
23,83	23,86	0,03	59,53	2,030	0,031	
23,87	23,94	0,07	55,31	2,215	0,078	
23,97	24,06	0,09	30,94	1,119	0,050	
23,87	23,97	0,1	36,09	1,230	0,061	
23,95	24,11	0,16	20,63	0,746	0,057	
23,86	24,02	0,16	33,75	1,352	0,104	
23,86	24,03	0,17	30	1,023	0,083	
23,95	24,17	0,22	36,09	1,306	0,134	
23,79	24,01	0,22	14,06	0,563	0,058	
23,79	24,01	0,22	44,06	1,503	0,154	
23,96	24,24	0,28	15,47	0,560	0,071	
23,85	24,14	0,29	33,28	1,161	0,152	
23,85	24,14	0,29	24,84	0,847	0,111	
22,87	23,18	0,31	13,13	0,458	0,064	
22,87	23,21	0,34	25,78	0,879	0,132	
23,85	24,25	0,4	24,84	0,866	0,149	
23,96	24,38	0,42	17,34	0,627	0,112	
23,85	24,27	0,42	21,09	0,719	0,129	
23,95	24,41	0,46	25,78	0,933	0,180	
23,88	24,34	0,46	29,06	0,991	0,191	
23,88	24,35	0,47	20,16	0,703	0,138	
23,89	24,4	0,51	13,59	0,463	0,097	
23,89	24,42	0,53	14,53	0,507	0,109	
23,97	24,52	0,55	16,41	0,594	0,132	
23,99	24,55	0,56	17,34	0,627	0,141	
23,86	24,46	0,6	14,53	0,496	0,118	
23,86	24,49	0,63	9,84	0,343	0,085	
23,95	24,62	0,67	15,94	0,577	0,149	
23,95	24,64	0,69	12,66	0,458	0,121	
23,95	24,67	0,72	14,53	0,526	0,143	

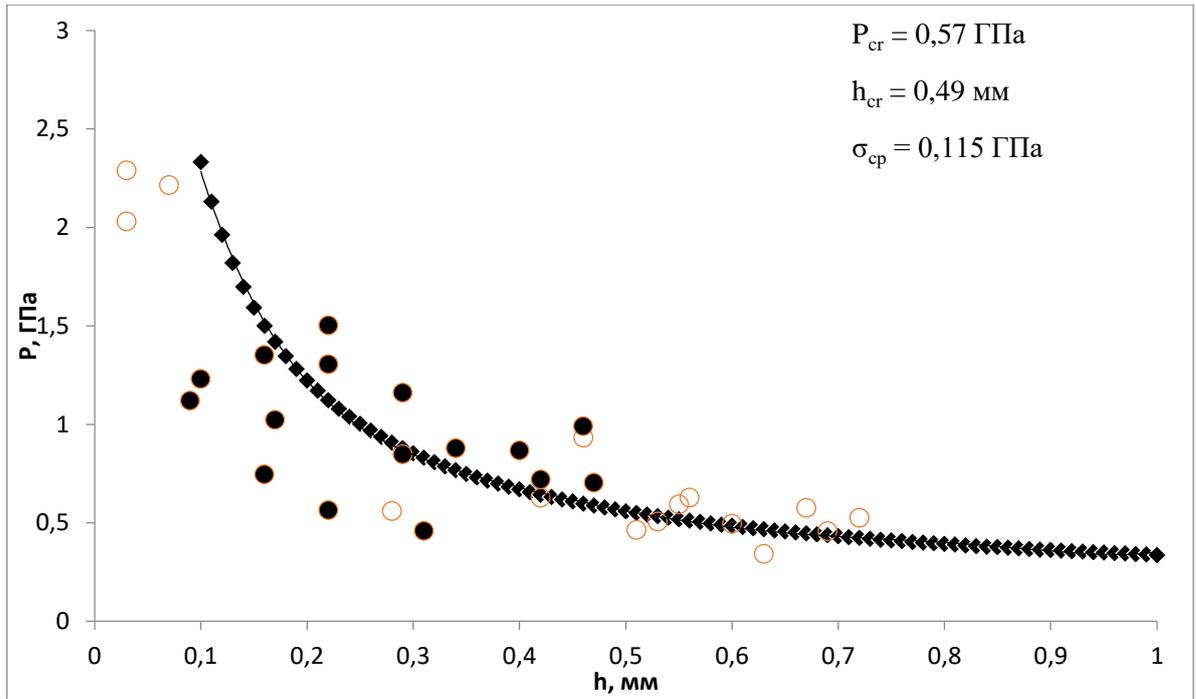


Рисунок бб – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 40%

Таблица 59 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 30%/70%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	24,03	0,06	94,69	2,305	0,070	0,160
23,97	24,09	0,12	63,75	2,306	0,135	
23,95	24,09	0,14	76,41	1,860	0,126	
23,95	24,11	0,16	66,09	2,391	0,184	
23,99	24,22	0,23	54,38	1,324	0,141	
23,95	24,19	0,24	53,44	1,933	0,214	
23,95	24,2	0,25	49,22	1,198	0,138	
24,03	24,36	0,33	66,56	1,620	0,237	
24	24,35	0,35	35,63	0,867	0,133	
23,96	24,34	0,38	35,63	1,289	0,213	
23,96	24,38	0,42	21,56	0,780	0,140	
23,95	24,41	0,46	31,88	1,153	0,222	
24	24,49	0,49	14,53	0,354	0,072	
23,98	24,5	0,52	19,22	0,468	0,010	
23,98	24,53	0,55	32,81	0,799	0,178	
23,99	24,61	0,62	14,06	0,509	0,124	
23,99	24,61	0,62	26,72	0,651	0,159	
23,97	24,63	0,66	19,69	0,712	0,182	
23,97	24,61	0,64	17,34	0,627	0,157	
23,95	24,67	0,72	15,94	0,577	0,157	

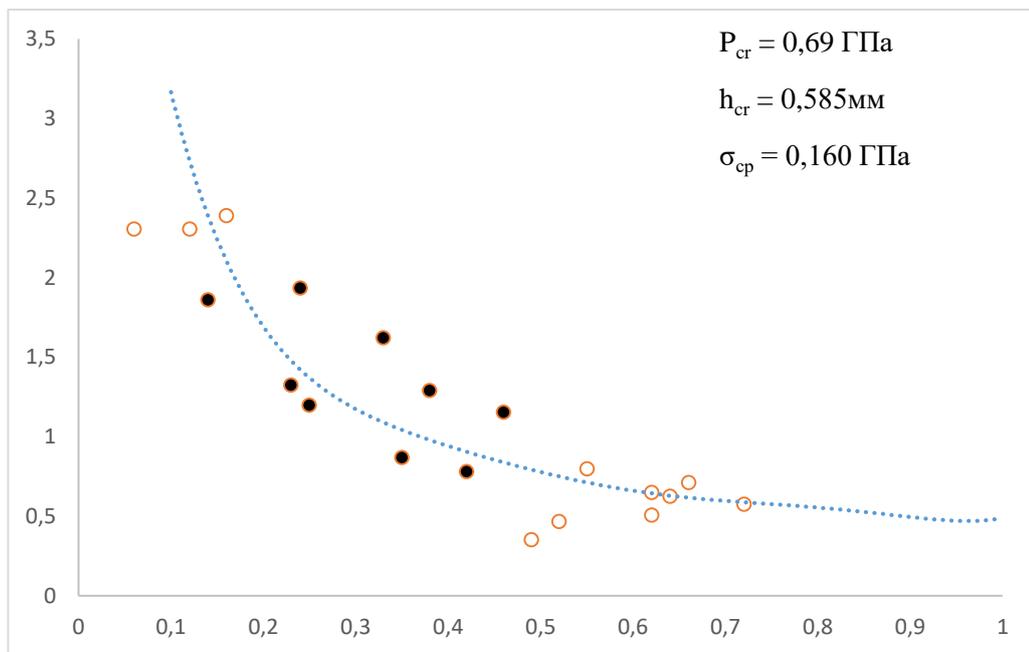


Рисунок 67 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 30%

Таблица 60 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 20%/80%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	Р эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,83	23,86	0,03	60	2,046	0,031	
23,87	23,93	0,06	60,47	2,062	0,062	
23,97	24,04	0,07	93,28	2,271	0,080	
23,97	24,05	0,08	67,5	2,442	0,097	
23,86	24,01	0,15	53,91	1,839	0,133	
23,95	24,12	0,17	33,28	1,204	0,098	
23,95	24,12	0,17	22,03	0,536	0,044	
23,79	23,97	0,18	52,5	1,791	0,153	
23,99	24,21	0,22	81,09	1,974	0,203	
23,85	24,08	0,23	36,09	1,231	0,131	
23,95	24,19	0,24	12,19	0,441	0,049	
23,95	24,22	0,27	19,22	0,468	0,058	
22,87	23,15	0,28	42,66	1,455	0,185	
23,96	24,29	0,33	51,09	1,848	0,271	
24	24,34	0,34	28,59	0,696	0,105	
23,85	24,19	0,34	33,28	1,135	0,170	
24	24,38	0,38	37,91	1,371	0,226	
23,88	24,27	0,39	24,38	0,831	0,140	
24,03	24,46	0,43	30	0,730	0,133	
23,48	23,92	0,44	22,97	0,831	0,155	
24	24,44	0,44	40,31	0,981	0,183	
23,89	24,33	0,44	25,78	0,879	0,164	
23,98	24,47	0,49	29,06	0,707	0,144	
23,97	24,48	0,51	17,34	0,627	0,131	
23,86	24,38	0,52	24,84	0,847	0,180	
23,98	24,52	0,54	25,78	0,933	0,204	
23,97	24,53	0,56	17,34	0,627	0,141	
23,99	24,55	0,56	44,53	1,084	0,244	
23,98	24,62	0,64	32,34	0,787	0,196	
23,99	24,65	0,66	16,88	0,611	0,156	

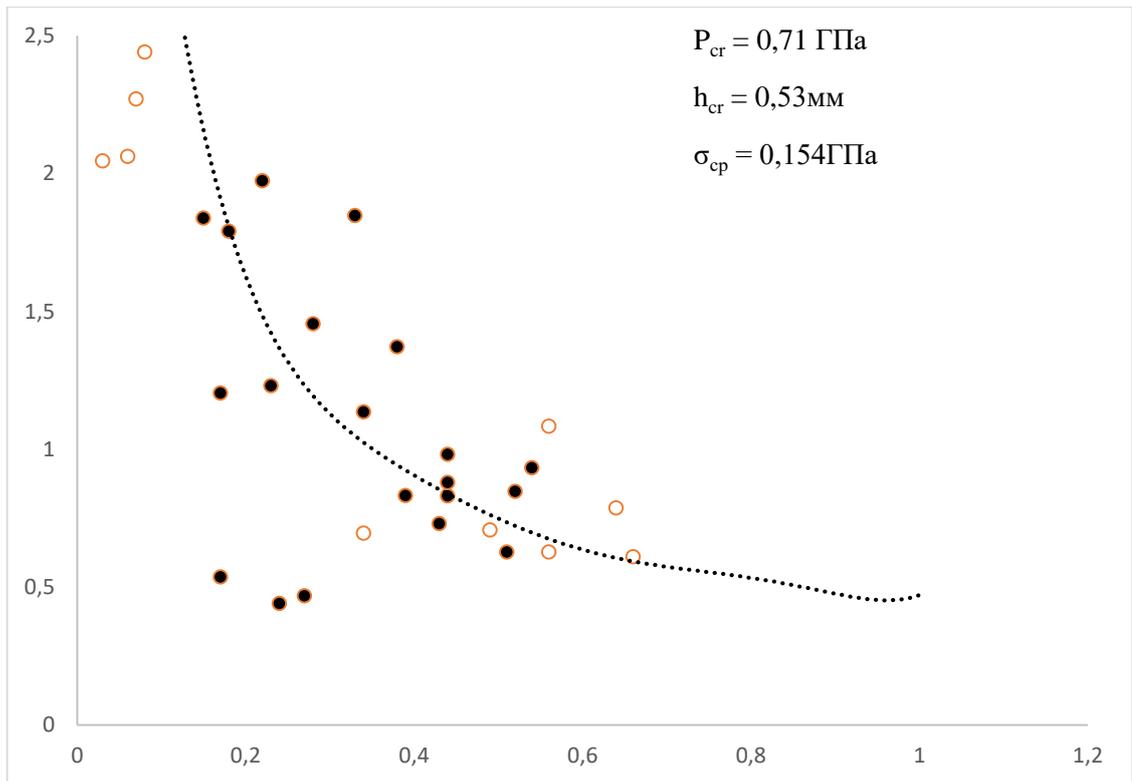


Рисунок 68 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 80%

Таблица 61 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-4 в соотношении 10%/90%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,03	0,06	66,56	2,408	0,072	0,234
20	23,95	24,12	0,17	66,56	2,408	0,195	
30	23,95	24,18	0,23	62,34	2,255	0,241	
40	23,98	24,25	0,27	60,94	2,205	0,271	
50	24	24,38	0,38	35,63	1,289	0,213	
60	23,98	24,35	0,37	35,63	1,289	0,208	
70	23,97	24,33	0,36	62,34	2,255	0,355	
80	23,98	24,42	0,44	39,38	1,425	0,265	
90	23,97	24,45	0,48	11,66	0,422	0,084	
100	23,99	24,49	0,5	37,5	1,357	0,280	

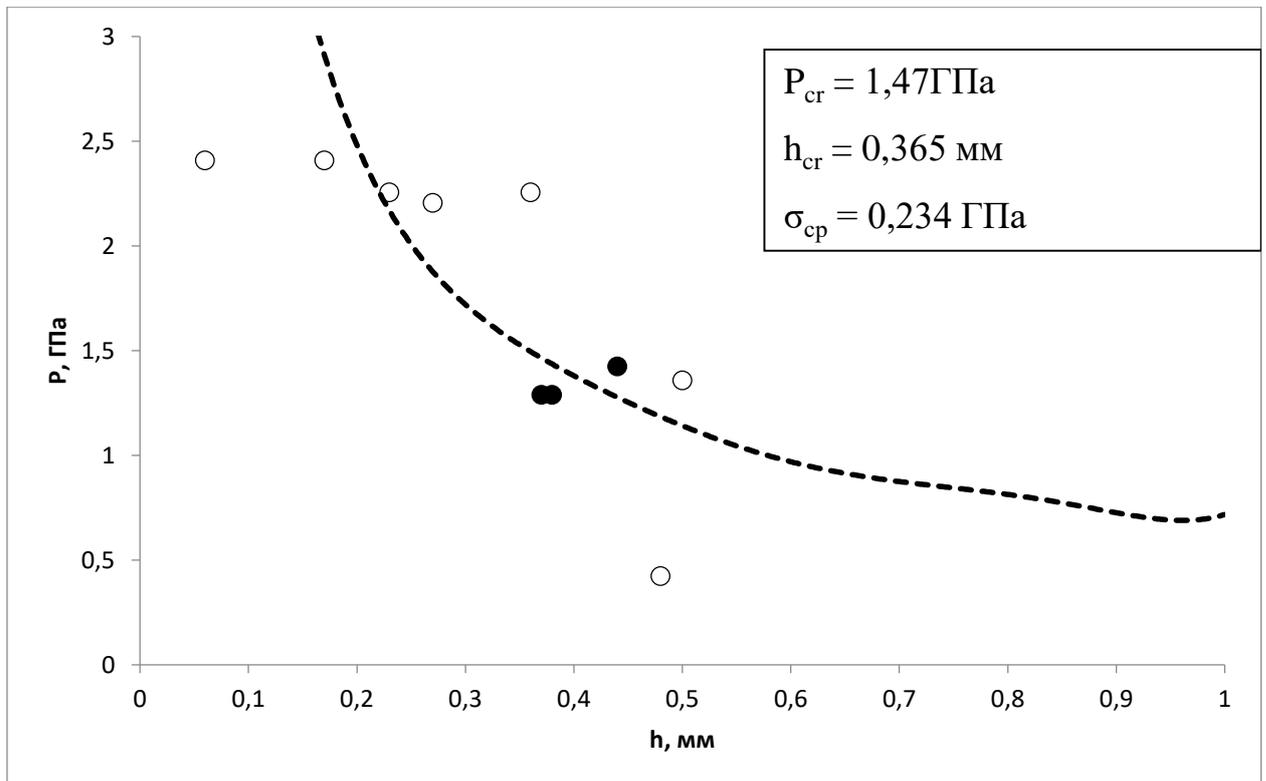


Рисунок 69 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 90%

## Смесь окфол-3,5-АСД-1

Таблица 62 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 90%/10%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,04	0,07	25,78	0,628	0,022	0,077
20	23,95	24,13	0,18	30,47	0,742	0,063	
30	23,95	24,29	0,34	21,56	0,525	0,079	
40	23,99	24,36	0,37	20,16	0,491	0,079	
50	24	24,43	0,43	21,09	0,513	0,094	
60	24,03	24,48	0,45	14,53	0,354	0,067	
70	24	24,46	0,46	13,13	0,320	0,062	
80	23,98	24,52	0,54	23,91	0,582	0,128	
90	23,98	24,67	0,69	14,06	0,342	0,090	
100	23,99	24,69	0,7	13,13	0,320	0,085	

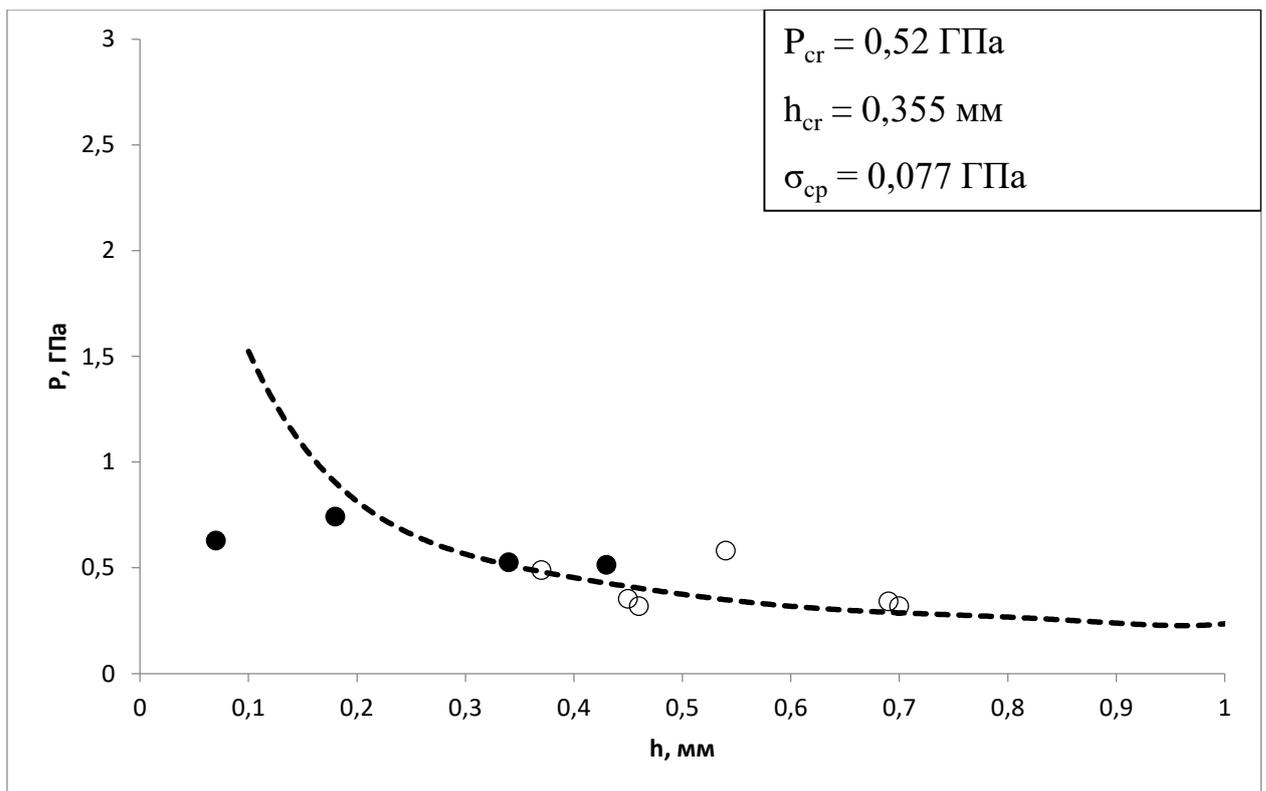


Рисунок 70 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 10%

Таблица 63 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 80%/20%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,07	0,1	30,47	0,742	0,037	0,082
20	23,95	24,18	0,23	14,53	0,354	0,038	
30	23,95	24,26	0,31	4,69	0,114	0,016	
40	23,99	24,32	0,33	20,16	0,491	0,072	
50	24	24,46	0,46	32,81	0,799	0,154	
60	24,03	24,48	0,45	13,59	0,331	0,063	
70	24	24,49	0,49	13,13	0,320	0,065	
80	23,98	24,52	0,54	49,22	1,198	0,263	
90	23,98	24,65	0,67	11,72	0,285	0,074	
100	23,99	24,7	0,71	5,63	0,137	0,037	

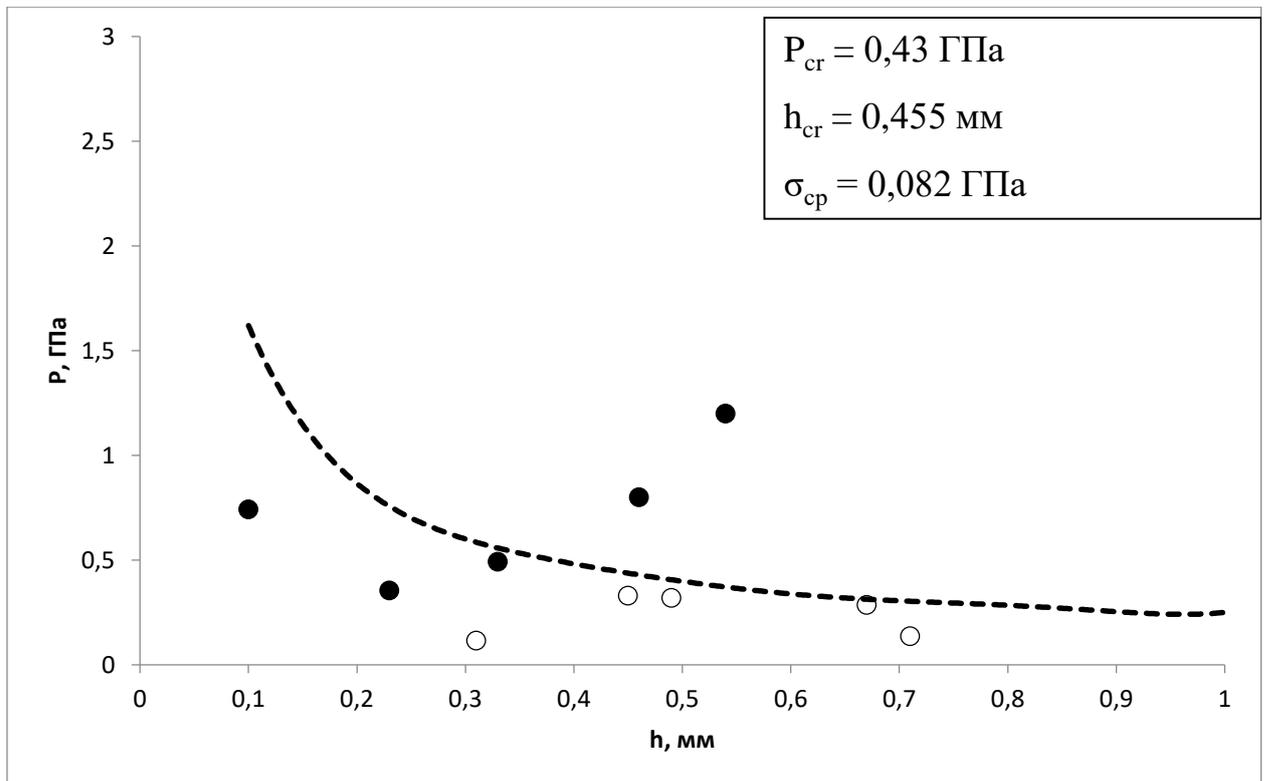


Рисунок 71 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 20%

Таблица 64 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 70%/30%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,05	0,08	95,16	2,317	0,092	0,085
20	23,95	24,12	0,17	11,25	0,274	0,022	
30	23,95	24,25	0,3	18,75	0,456	0,062	
40	23,99	24,35	0,36	20,16	0,491	0,077	
50	24	24,44	0,44	13,13	0,320	0,059	
60	24,03	24,46	0,43	35,63	0,867	0,158	
70	24	24,52	0,52	14,53	0,354	0,075	
80	23,98	24,52	0,54	15,15	0,369	0,081	
90	23,98	24,62	0,64	22,97	0,700	0,175	
100	23,99	24,65	0,66	5,63	0,171	0,044	

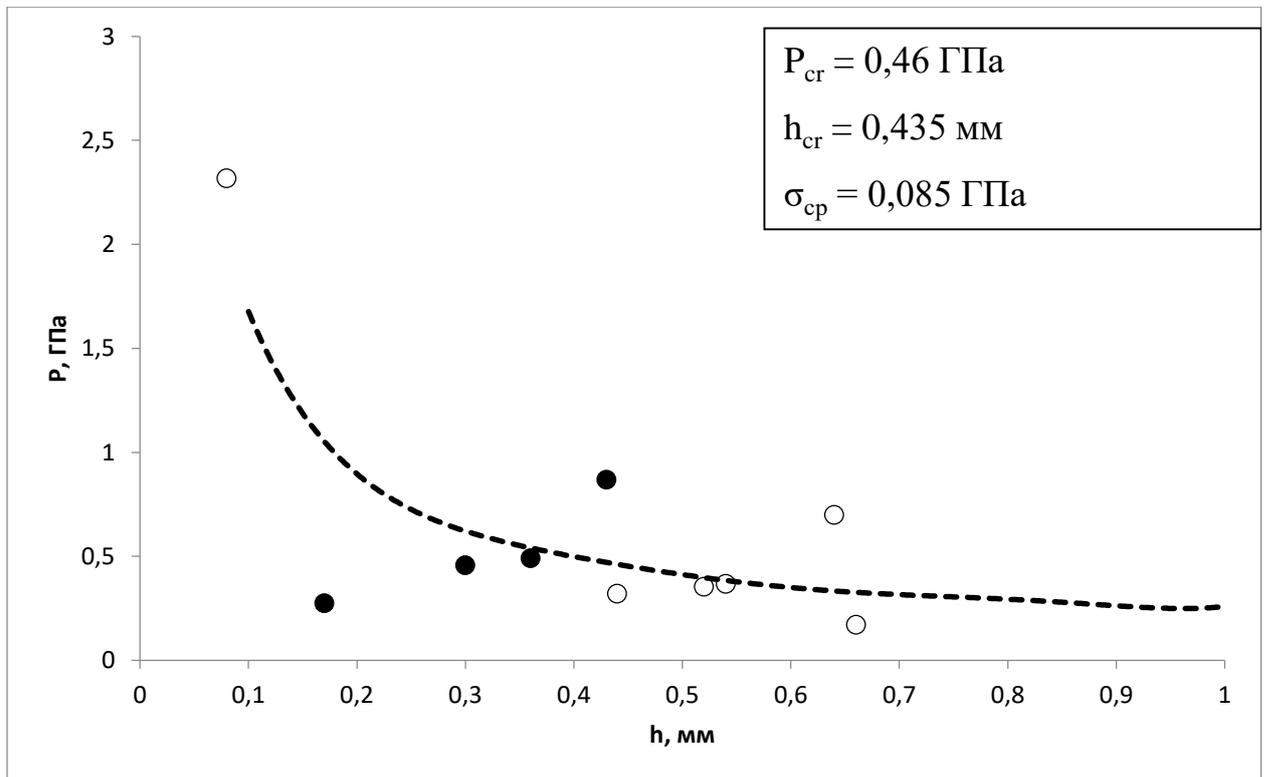


Рисунок 72 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 30%

Таблица 65 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 60%/40%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,03	0,06	80,16	2,441	0,074	0,081
20	23,95	24,12	0,17	13,59	0,414	0,034	
30	23,95	24,26	0,31	20,16	0,614	0,085	
40	23,99	24,33	0,34	9,38	0,286	0,043	
50	24	24,43	0,43	8,44	0,257	0,047	
60	24,03	24,46	0,43	9,84	0,300	0,055	
70	24	24,56	0,56	22,5	0,685	0,154	
80	23,98	24,58	0,6	13,59	0,414	0,098	
90	23,98	24,57	0,59	13,13	0,400	0,094	

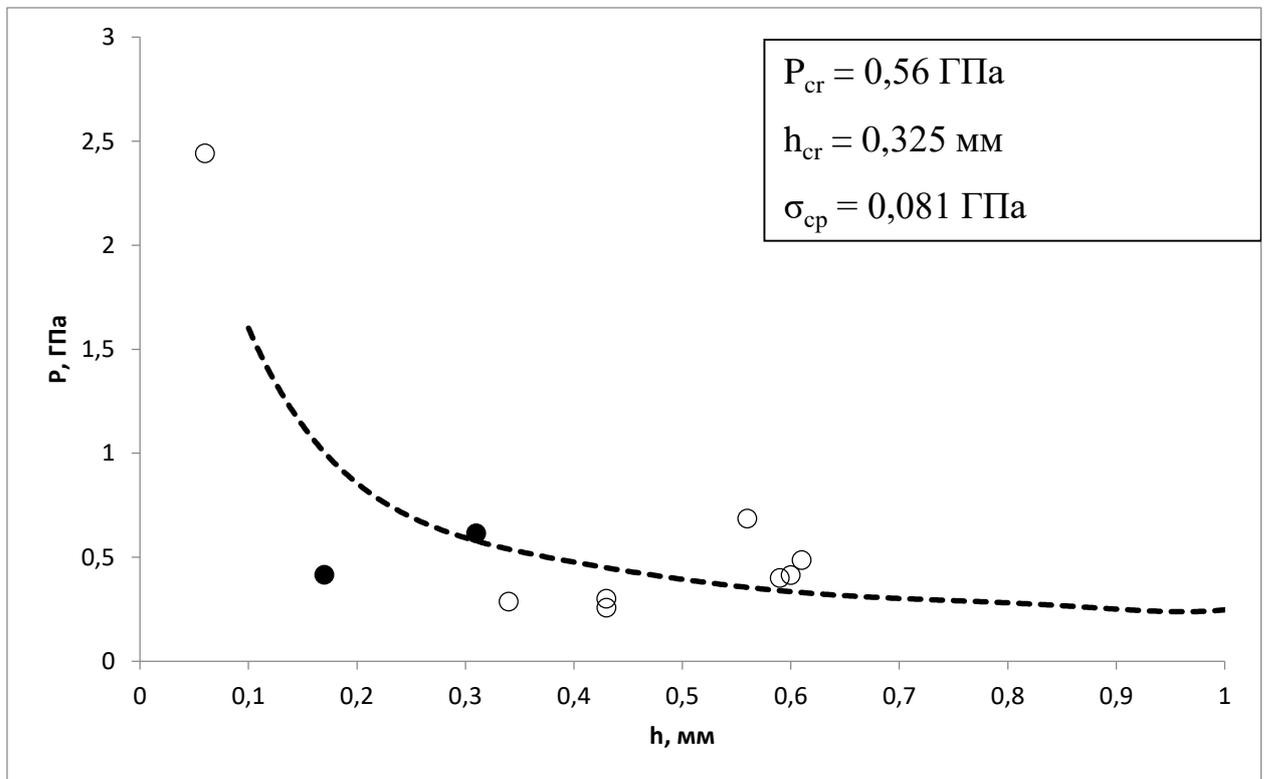


Рисунок 73 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 40%

Таблица 66 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 50%/50%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,07	0,1	75,94	2,313	0,114	0,073
20	23,95	24,1	0,15	22,03	0,671	0,048	
30	23,95	24,19	0,24	48,28	1,085	0,120	
40	23,99	24,3	0,31	11,25	0,253	0,035	
50	24	24,39	0,39	25,31	0,569	0,096	
60	24,03	24,41	0,38	12,19	0,274	0,045	
70	24	24,48	0,48	11,25	0,253	0,050	
80	23,98	24,52	0,54	21,09	0,474	0,104	
90	23,98	24,6	0,62	18,28	0,411	0,100	
100	23,99	24,62	0,63	9,84	0,221	0,055	

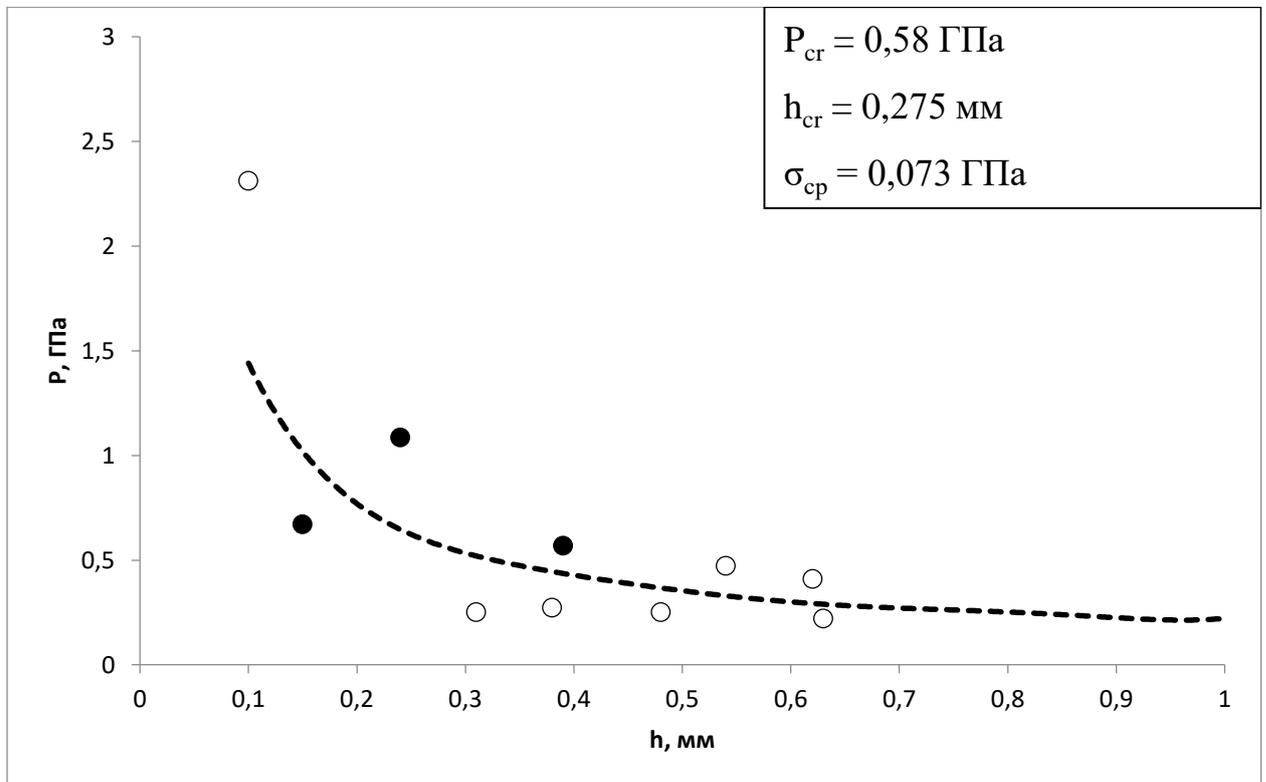


Рисунок 74 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 50%

Таблица 67 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 40%/60%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,07	0,1	86,72	1,949	0,096	0,119
20	23,95	24,09	0,14	23,44	0,527	0,036	
30	23,95	24,22	0,27	55,78	1,253	0,154	
40	23,99	24,28	0,29	45,47	1,022	0,134	
50	24	24,35	0,35	37,03	0,832	0,128	
60	24,03	24,4	0,37	48,28	1,085	0,175	
70	24	24,44	0,44	31,41	0,706	0,131	
80	23,98	24,53	0,55	22,97	0,516	0,115	
90	23,98	24,58	0,6	18,28	0,411	0,098	
100	23,99	24,62	0,63	18,28	0,411	0,101	

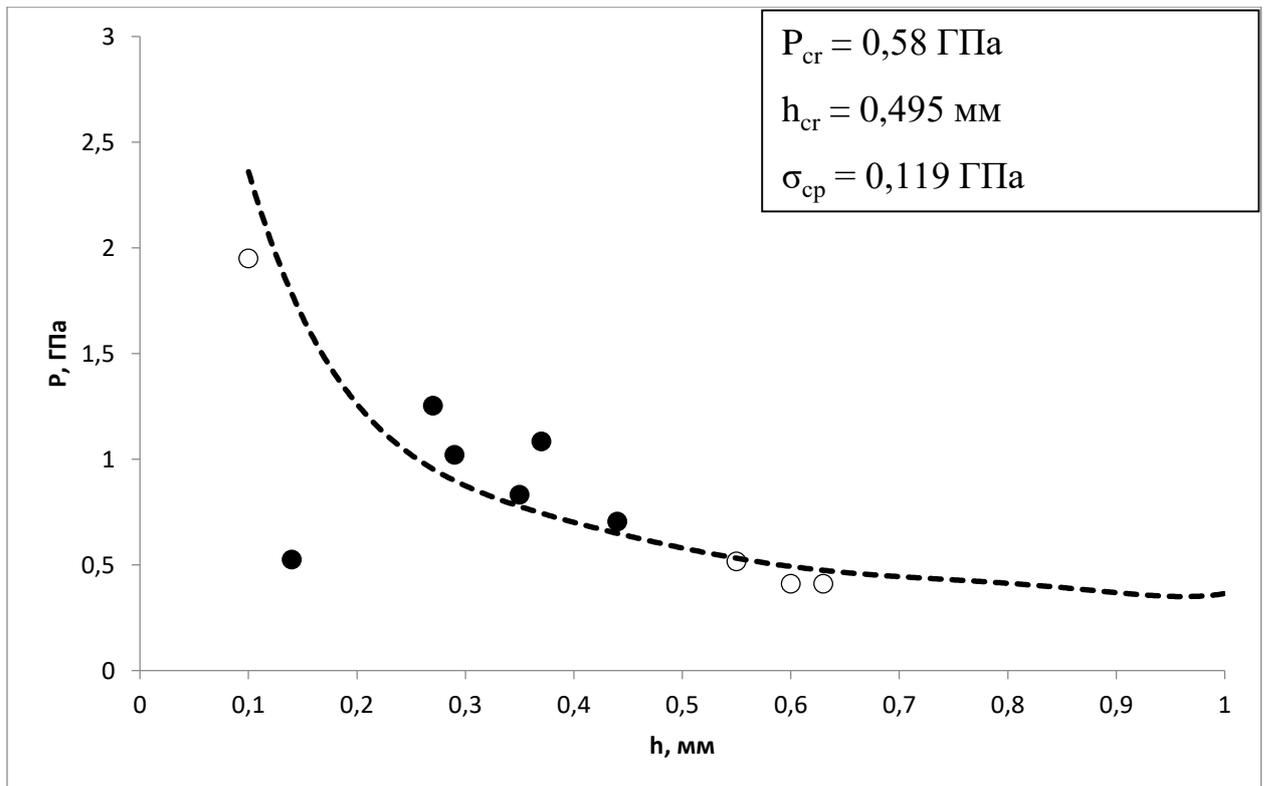


Рисунок 75 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 60%

Таблица 68 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 30%/70%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,08	0,11	20,63	0,464	0,025	0,106
20	23,95	24,12	0,17	19,69	0,442	0,036	
30	23,95	24,15	0,2	91,88	2,065	0,194	
40	23,99	24,24	0,25	54,84	1,232	0,142	
50	24	24,28	0,28	13,13	0,295	0,037	
60	24,03	24,34	0,31	39,38	0,885	0,123	
70	24	24,42	0,42	22,97	0,516	0,092	
80	23,98	24,47	0,49	42,66	0,959	0,195	
90	23,98	24,51	0,53	25,78	0,579	0,125	
100	23,99	24,62	0,63	16,88	0,379	0,094	

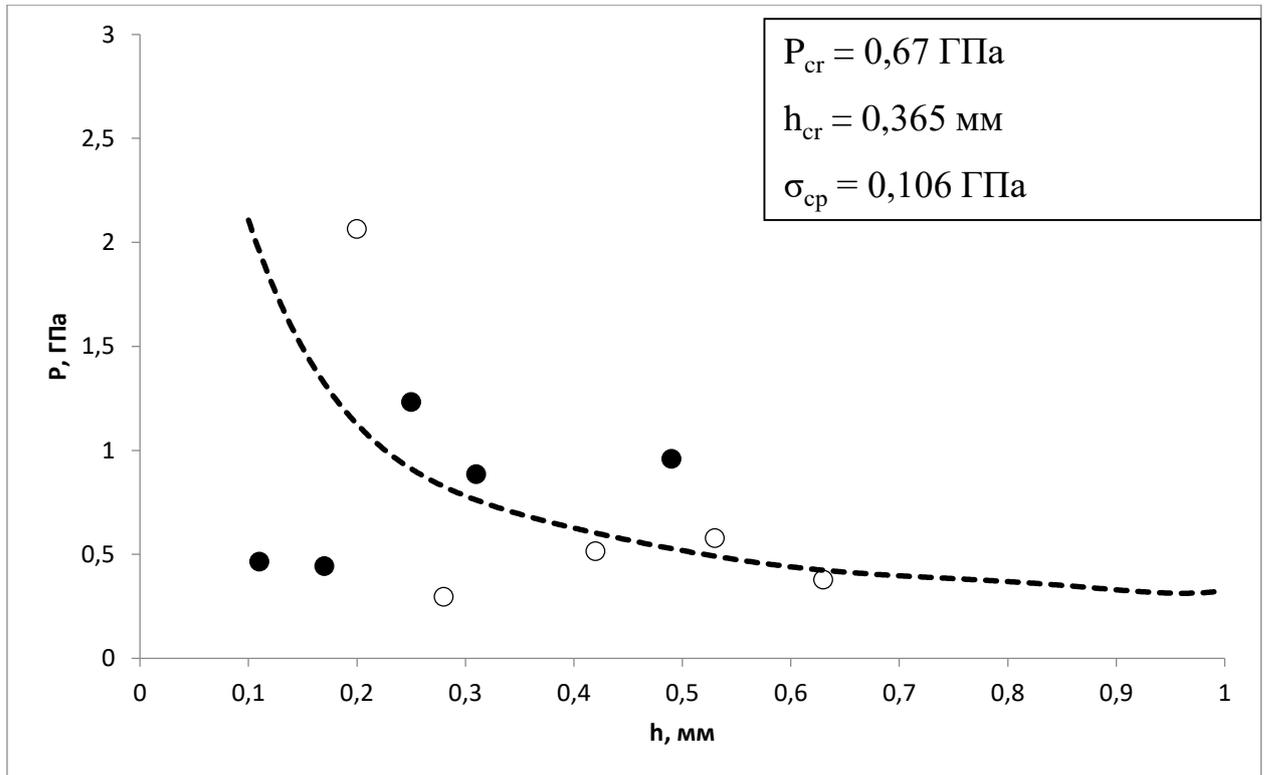


Рисунок 76 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 70%

Таблица 69 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 20%/80%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,04	0,07	95,63	2,149	0,075	0,088
20	23,95	24,1	0,15	91,41	2,054	0,149	
30	23,95	24,2	0,25	19,65	0,442	0,051	
40	23,99	24,2	0,21	84,63	1,902	0,187	
50	24	24,34	0,34	29,97	0,673	0,101	
60	24,03	24,45	0,42	18,59	0,418	0,075	
70	24	24,5	0,5	9,78	0,220	0,045	
80	23,98	24,57	0,59	8,78	0,197	0,046	
90	23,98	24,61	0,63	12,66	0,284	0,070	
100	23,99	24,63	0,64	23,44	0,527	0,131	

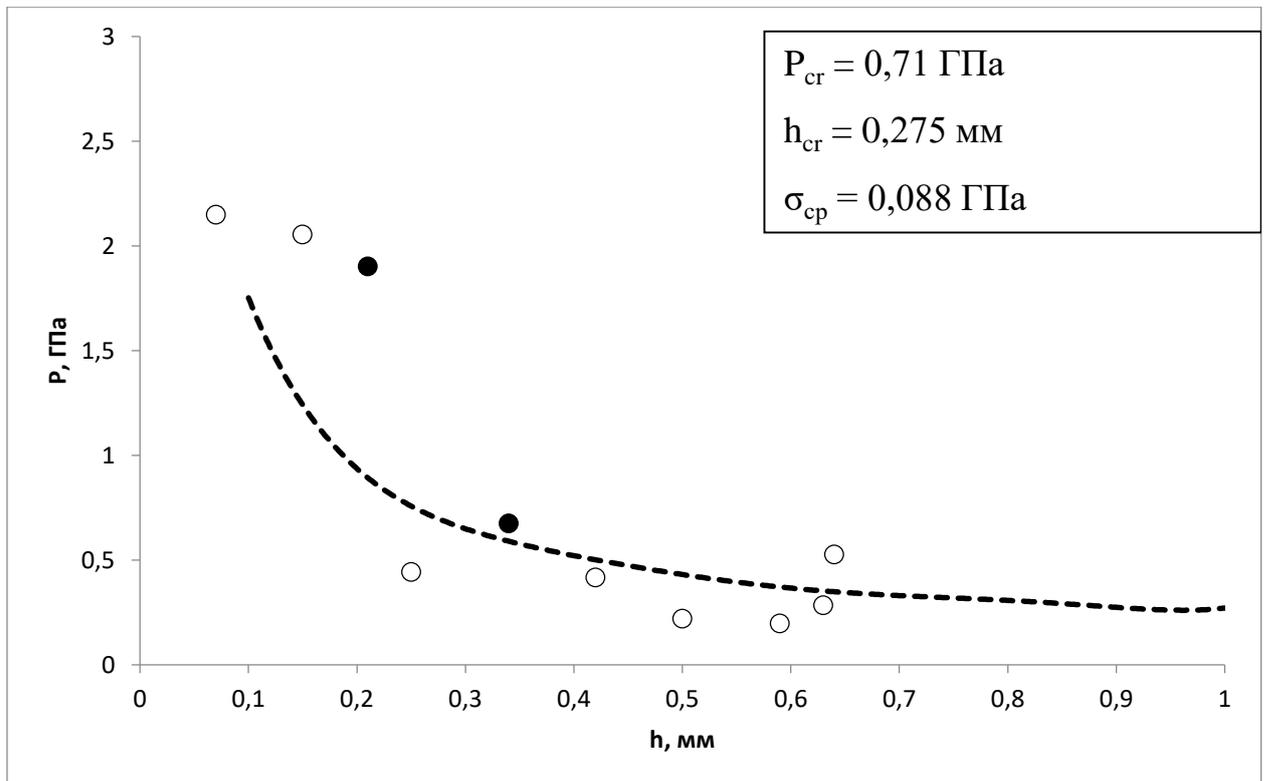


Рисунок 77 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси 80%.

Таблица 70 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/АСД-1 в соотношении 10%/90%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	23,97	24,07	0,1	95,63	2,328	0,115	0,163
20	23,95	24,08	0,13	91,41	2,225	0,141	
30	23,95	24,17	0,22	15	0,365	0,037	
40	23,99	24,24	0,25	60,47	1,472	0,169	
50	24	24,28	0,28	58,13	1,415	0,180	
60	24,03	24,36	0,33	66,56	1,620	0,237	
70	24	24,41	0,41	43,13	1,050	0,184	
80	23,98	24,49	0,51	47,34	1,153	0,241	
90	23,98	24,52	0,54	20,16	0,491	0,108	
100	23,99	24,57	0,58	26,72	0,651	0,151	

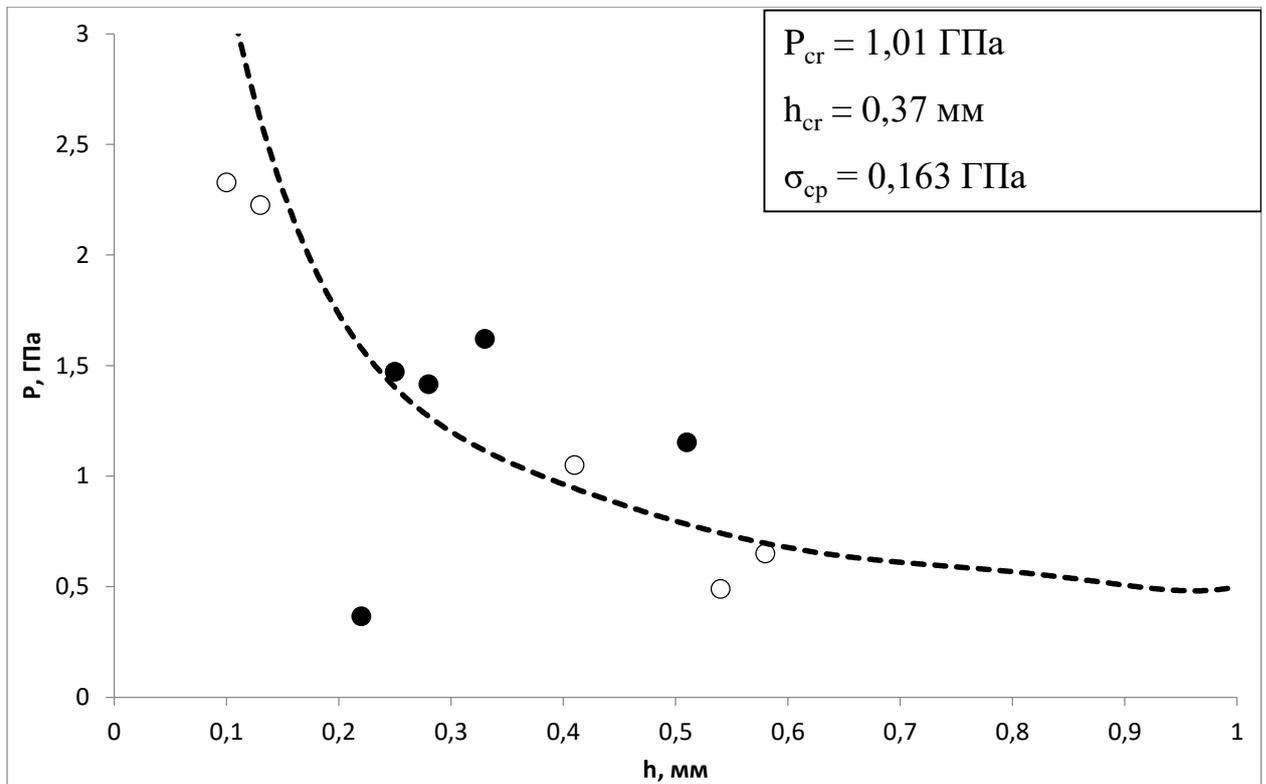


Рисунок 78 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 90%

## Смесь окфол-3,5-ПА-3

Таблица 71 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 90%/10%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,9	23,96	0,06	67,97	2,029	5	0,113
23,88	23,99	0,11	49,69	1,483	0,080	
23,86	24,04	0,18	41,25	1,231	0,105	
23,79	24,02	0,23	26,72	0,797	0,085	
23,85	24,14	0,29	22,97	0,686	0,090	
22,87	23,2	0,33	30	0,895	0,131	
23,85	24,32	0,47	18,28	0,546	0,107	
23,88	24,39	0,51	22,5	0,672	0,141	
23,89	24,48	0,59	19,22	0,574	0,135	
23,86	24,52	0,66	19,22	0,574	0,146	

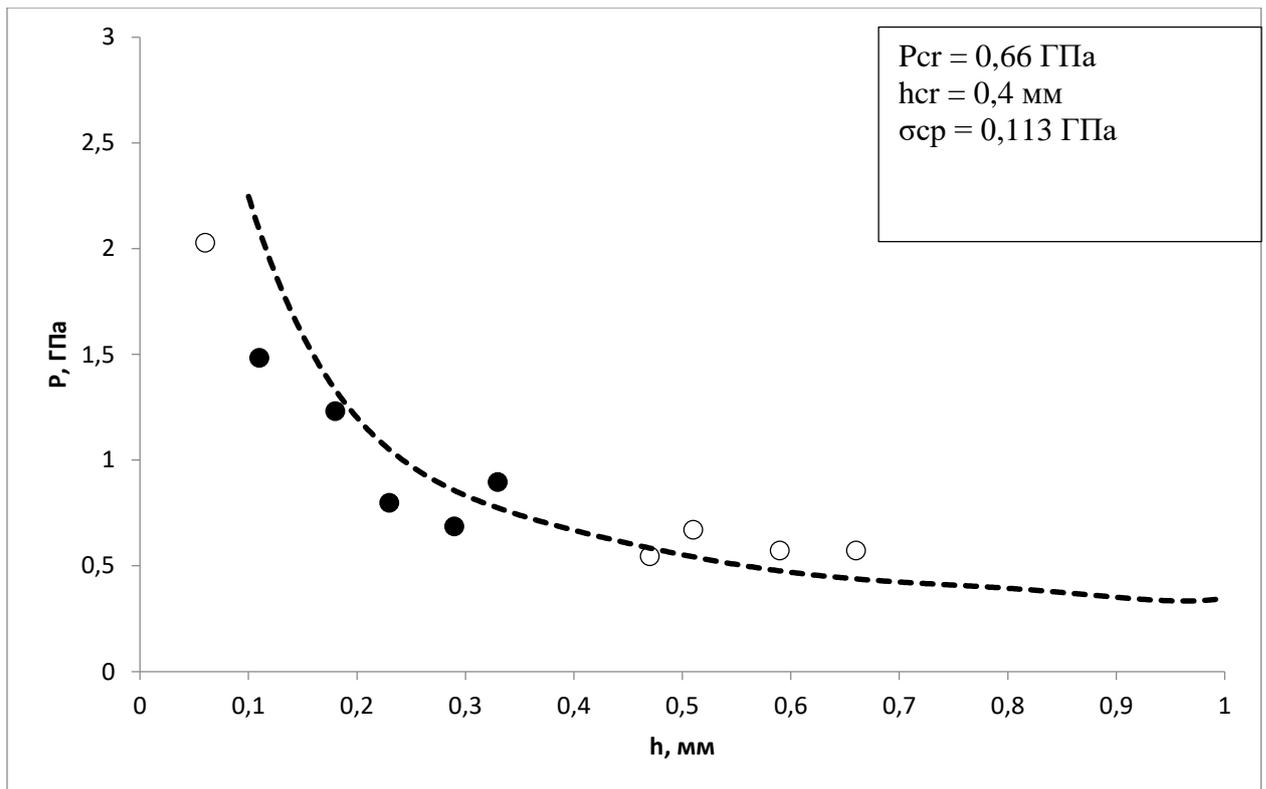


Рисунок 79 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 10%

Таблица 72 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 80%/20%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,9	23,96	0,06	60	1,717	0,052	0,111
23,88	23,99	0,11	37,03	1,060	0,057	
23,86	24,09	0,23	40,31	1,154	0,123	
23,79	24,04	0,25	41,25	1,180	0,136	
23,85	24,17	0,32	22,03	0,630	0,090	
22,87	23,28	0,41	21,09	0,604	0,106	
23,85	24,33	0,48	21,09	0,604	0,120	
23,88	24,39	0,51	23,91	0,684	0,143	
23,89	24,46	0,57	21,56	0,617	0,141	
23,86	24,51	0,65	20,16	0,577	0,146	

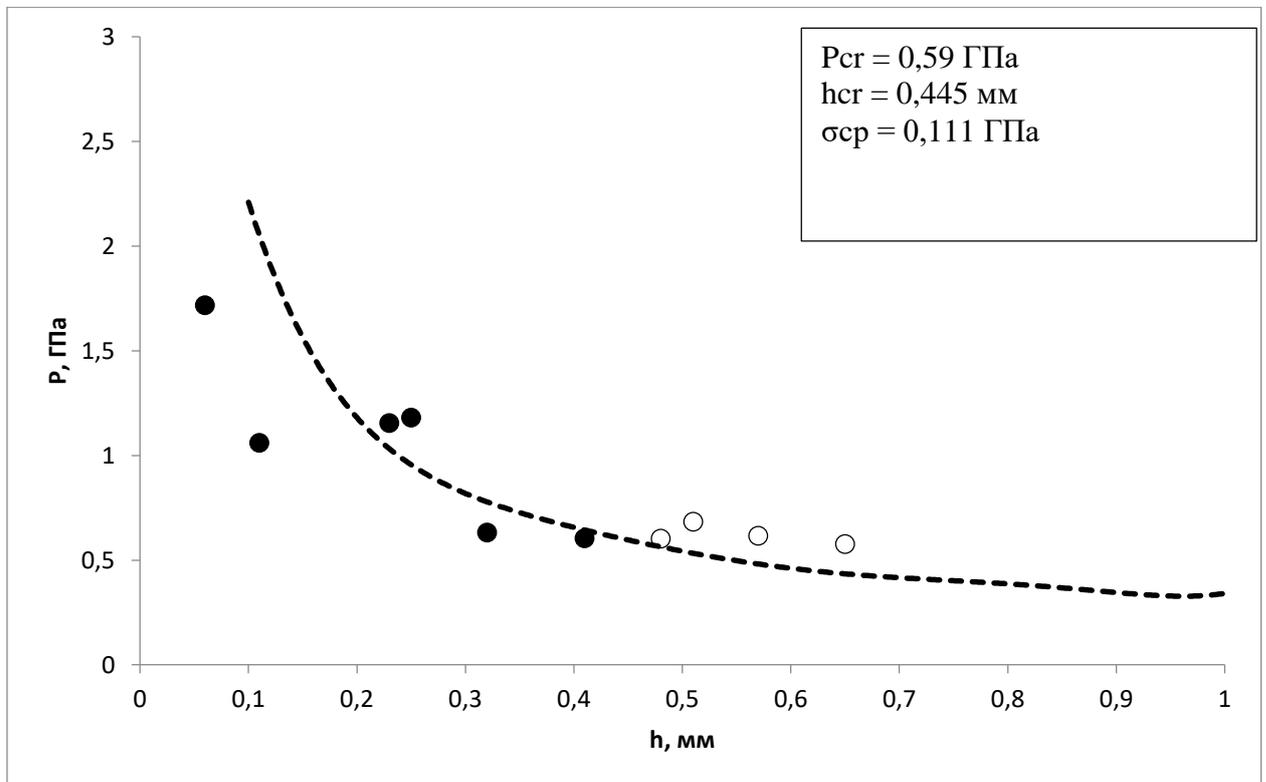


Рисунок 80 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 20%

Таблица 73 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 70%/30%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,9	23,97	0,07	60,94	1,476	0,051	0,096
23,88	23,98	0,1	38,91	0,942	0,047	
23,86	24,03	0,17	42,66	1,033	0,084	
23,79	24	0,21	36,56	0,886	0,087	
23,85	24,13	0,28	42,66	1,033	0,131	
22,87	23,22	0,35	36,56	0,886	0,136	
23,85	24,3	0,45	24,84	0,602	0,114	
23,88	24,38	0,5	20,63	0,500	0,103	
23,89	24,44	0,55	21,09	0,511	0,114	
23,86	24,51	0,65	15,94	0,386	0,097	

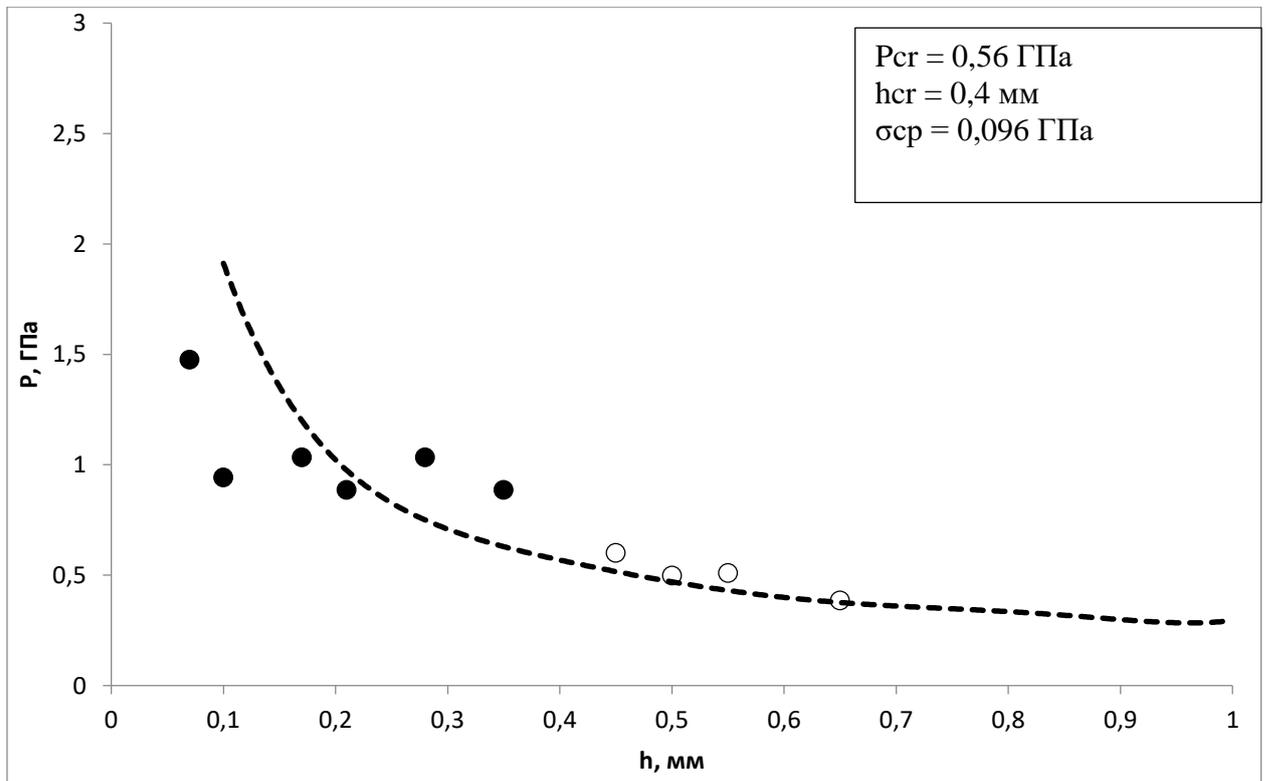


Рисунок 81 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 30%

Таблица 74 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 60%/40%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,83	23,88	0,05	28,13	1,047	0,027	0,099
23,87	23,98	0,11	27,66	1,030	0,056	
23,86	24,09	0,23	24,38	0,908	0,097	
23,79	24,05	0,26	13,13	0,489	0,058	
23,85	24,15	0,3	24,84	0,925	0,125	
22,87	23,29	0,42	14,53	0,541	0,097	
23,85	24,33	0,48	15	0,558	0,111	
23,88	24,4	0,52	19,69	0,733	0,156	
23,89	24,48	0,59	14,53	0,541	0,127	
23,86	24,51	0,65	14,53	0,541	0,137	

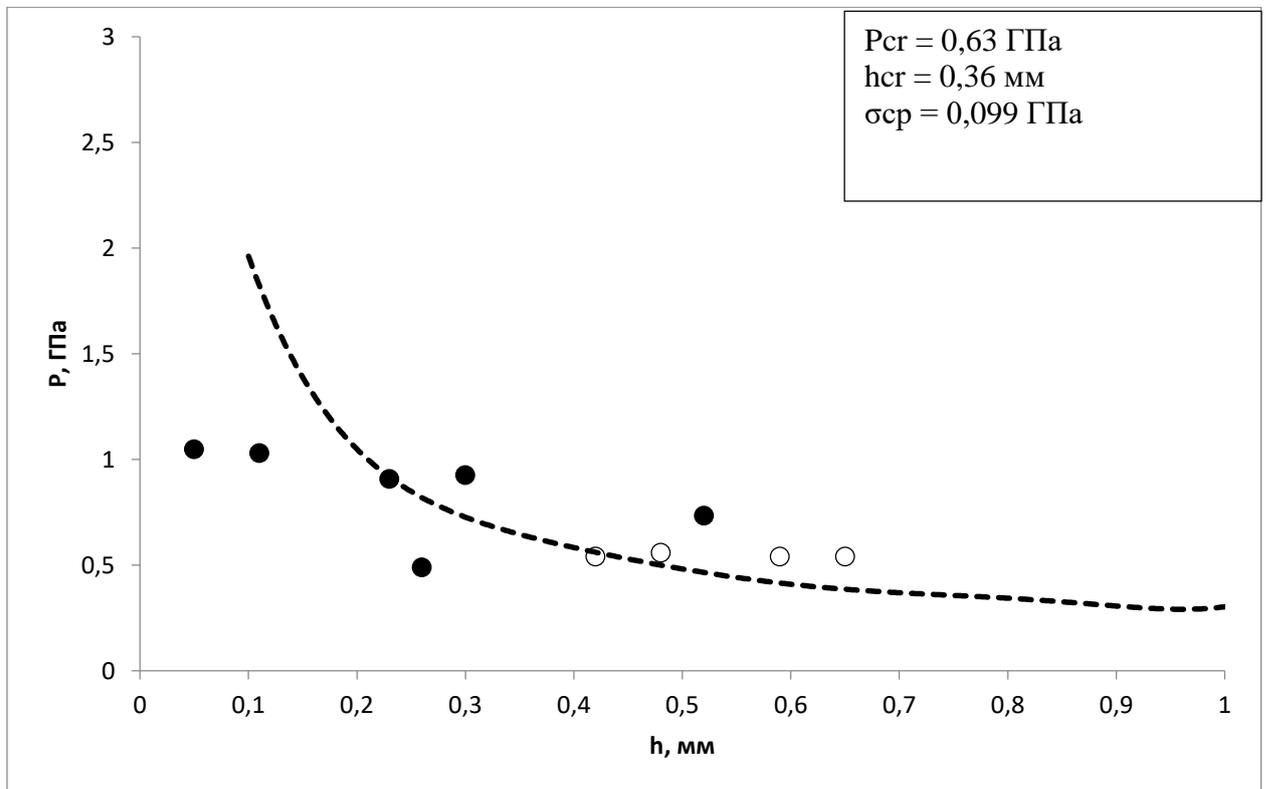


Рисунок 82 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 40%

Таблица 75 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 50%/50%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,9	23,97	0,07	52,5	2,000	0,070	0,098
23,88	24,01	0,13	32,34	1,232	0,078	
23,86	24,06	0,2	27,66	1,054	0,099	
23,79	24,07	0,28	24,84	0,946	0,120	
23,85	24,19	0,34	9,38	0,357	0,054	
22,87	23,27	0,4	15	0,572	0,098	
23,85	24,32	0,47	12,66	0,482	0,095	
23,88	24,4	0,52	12,66	0,482	0,103	
23,89	24,43	0,54	15,47	0,589	0,129	
23,86	24,5	0,64	11,25	0,429	0,107	

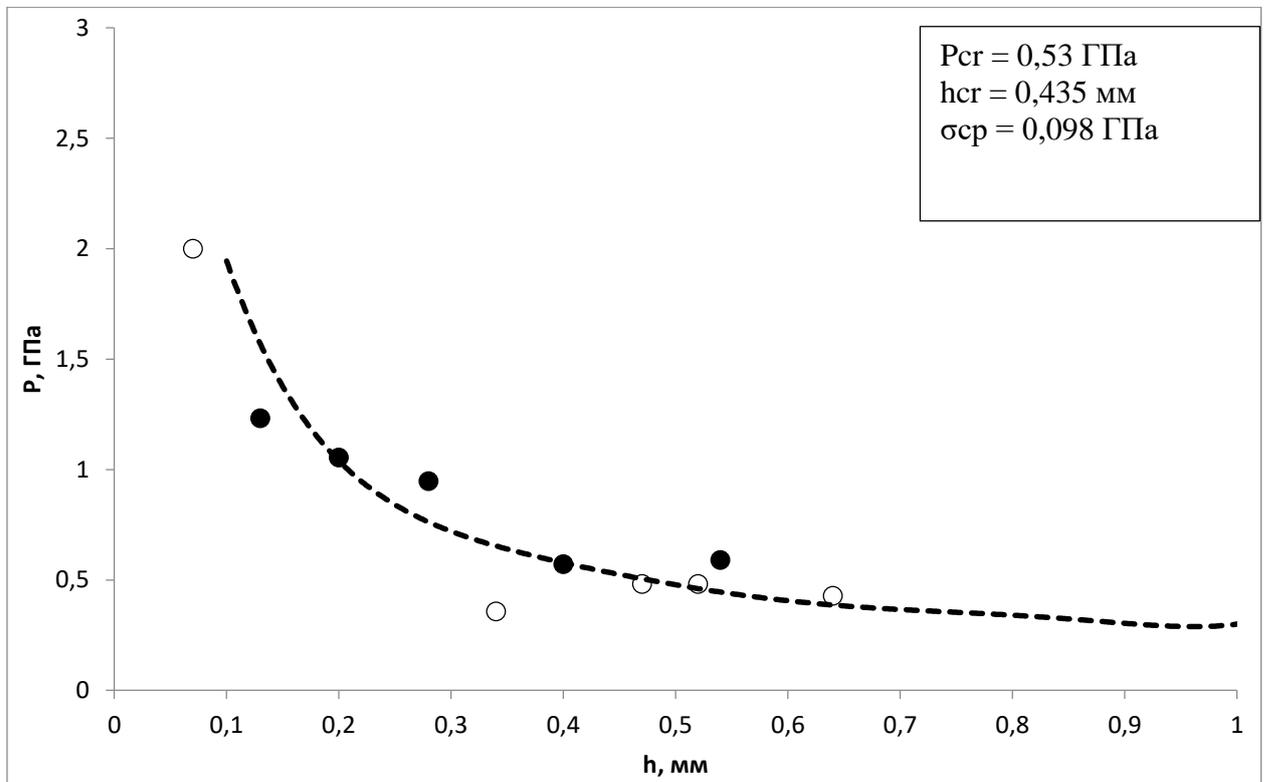


Рисунок 83 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 50%

Таблица 76 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 40%/60%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,83	23,89	0,06	53,44	1,937	0,059	0,102
23,87	24	0,13	25,31	0,917	0,058	
23,86	24,07	0,21	24,38	0,884	0,087	
23,79	24,03	0,24	35,63	1,291	0,143	
23,85	24,16	0,31	13,13	0,476	0,066	
22,87	23,22	0,35	22,03	0,798	0,123	
23,85	24,26	0,41	15,94	0,578	0,101	
23,88	24,37	0,49	10,78	0,391	0,079	
23,89	24,41	0,52	17,81	0,645	0,137	
23,86	24,45	0,59	14,06	0,510	0,120	

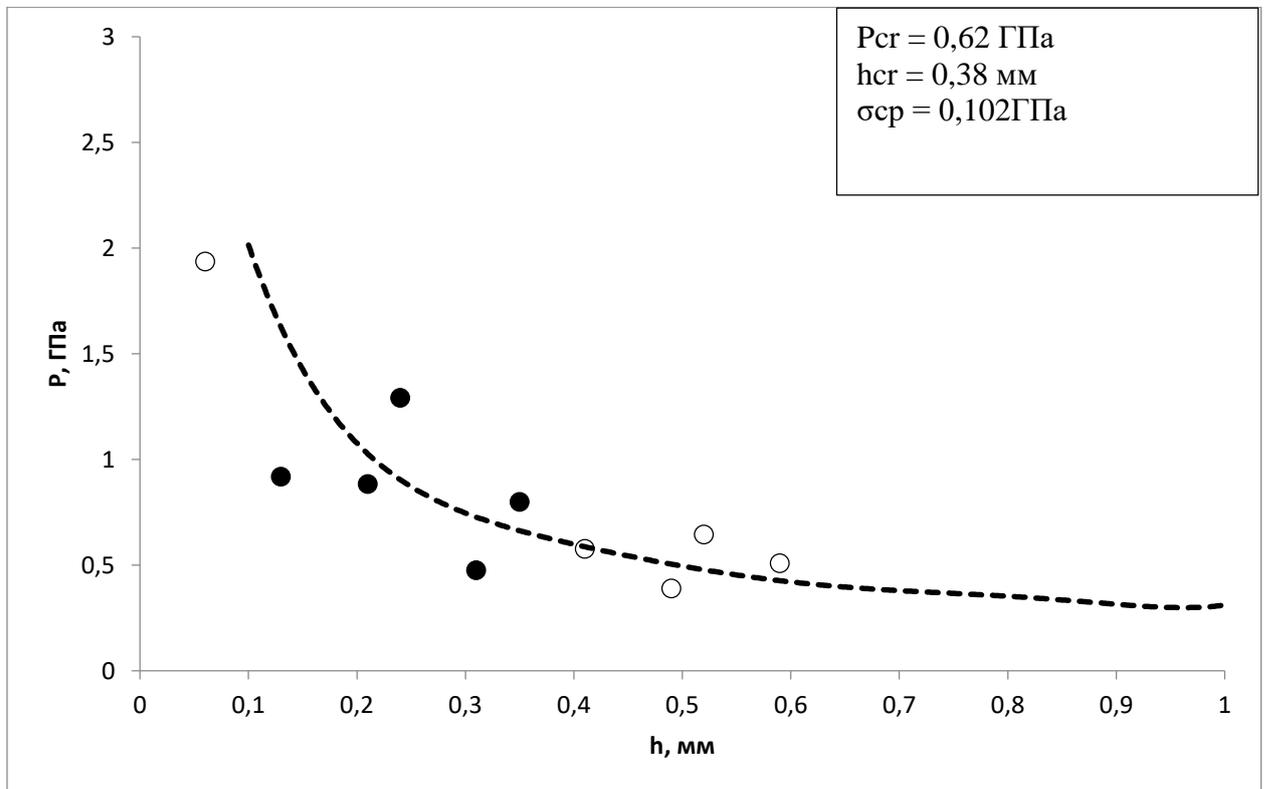


Рисунок 84 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 60%

Таблица 77 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 30%/70%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,9	23,97	0,07	53	2,019	0,071	0,093
23,88	24,02	0,14	15,47	0,589	0,040	
23,86	24,1	0,24	25,31	0,964	0,107	
23,79	24,06	0,27	23,44	0,893	0,110	
23,85	24,16	0,31	19,22	0,732	0,102	
22,87	23,24	0,37	11,25	0,429	0,069	
23,85	24,29	0,44	15	0,572	0,106	
23,88	24,39	0,51	13,59	0,518	0,108	
23,89	24,42	0,53	12,19	0,464	0,100	
23,86	24,46	0,6	10,78	0,411	0,098	

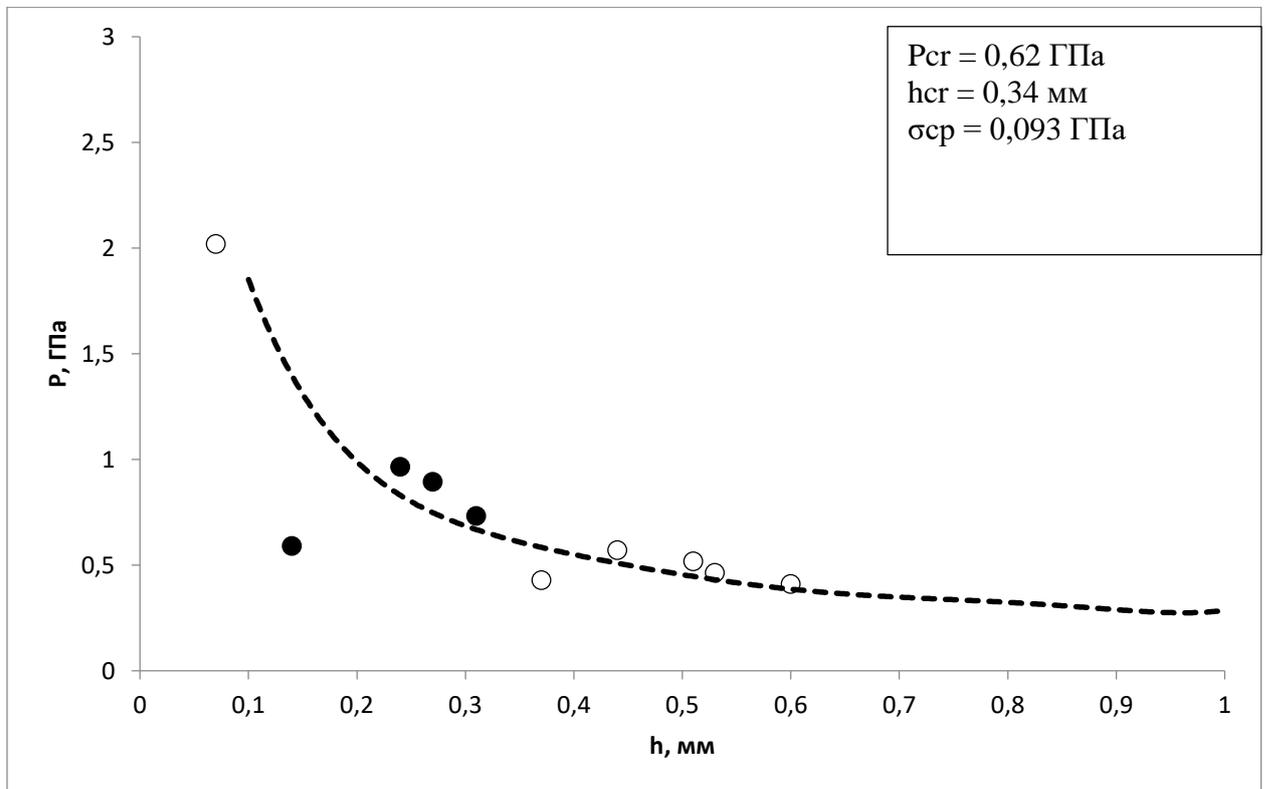


Рисунок 85 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 70%

Таблица 78 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 20%/80%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,83	23,87	0,04	64,22	2,133	0,043	0,097
23,83	23,9	0,07	21,09	0,760	0,027	
23,87	23,96	0,09	37,97	1,261	0,056	
23,87	23,98	0,11	24,38	0,879	0,048	
23,86	24,02	0,16	31,88	1,059	0,081	
23,86	24,03	0,17	36,09	1,301	0,106	
23,79	23,99	0,2	14,06	0,507	0,048	
23,79	23,99	0,2	33,75	1,121	0,106	
23,85	24,13	0,28	22,97	0,763	0,097	
23,85	24,13	0,28	25,78	0,929	0,118	
22,87	23,19	0,32	23,91	0,862	0,123	
22,87	23,2	0,33	20,63	0,685	0,100	
23,85	24,23	0,38	19,69	0,710	0,117	
23,85	24,24	0,39	20,63	0,685	0,115	
23,88	24,32	0,44	17,81	0,642	0,119	
23,88	24,33	0,45	18,75	0,623	0,118	
23,89	24,38	0,49	15	0,498	0,101	
23,89	24,41	0,52	13,13	0,473	0,101	
23,86	24,44	0,58	17,81	0,642	0,149	
23,86	24,48	0,62	15	0,498	0,121	

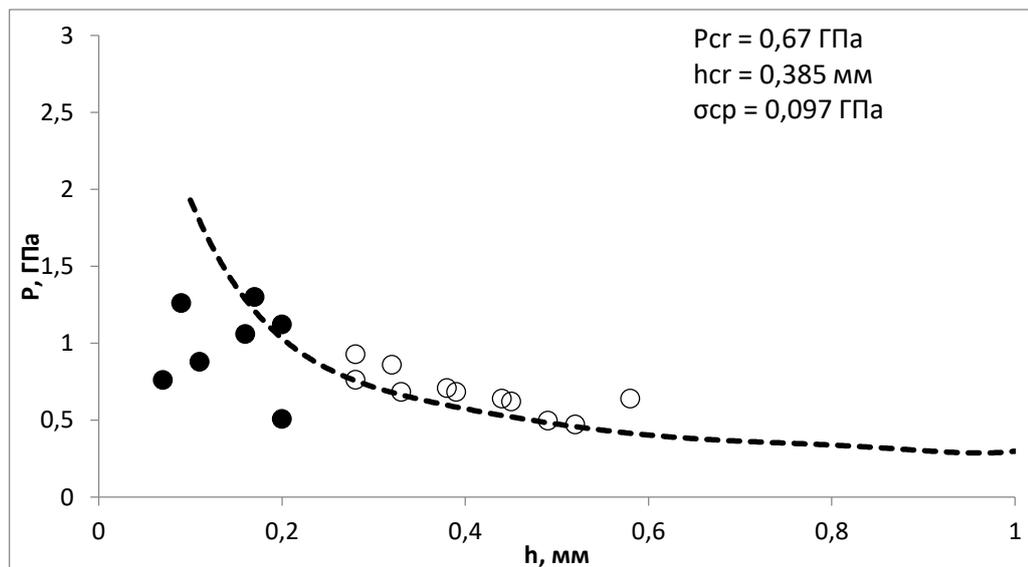


Рисунок 86 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 80%

Таблица 79 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ПА-3 в соотношении 10%/90%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,83	23,92	0,09	67,5	2,008	0,090	0,122
23,87	24,03	0,16	57,9	1,722	0,132	
23,86	24,04	0,18	45	1,339	0,114	
23,79	24	0,21	41,25	1,227	0,121	
23,85	24,12	0,27	22,03	0,655	0,081	
22,87	23,2	0,33	23,91	0,711	0,104	
23,85	24,23	0,38	22,03	0,655	0,108	
23,88	24,32	0,44	29,53	0,878	0,163	
23,89	24,39	0,5	22,5	0,669	0,138	
23,86	24,41	0,55	20,16	0,600	0,133	

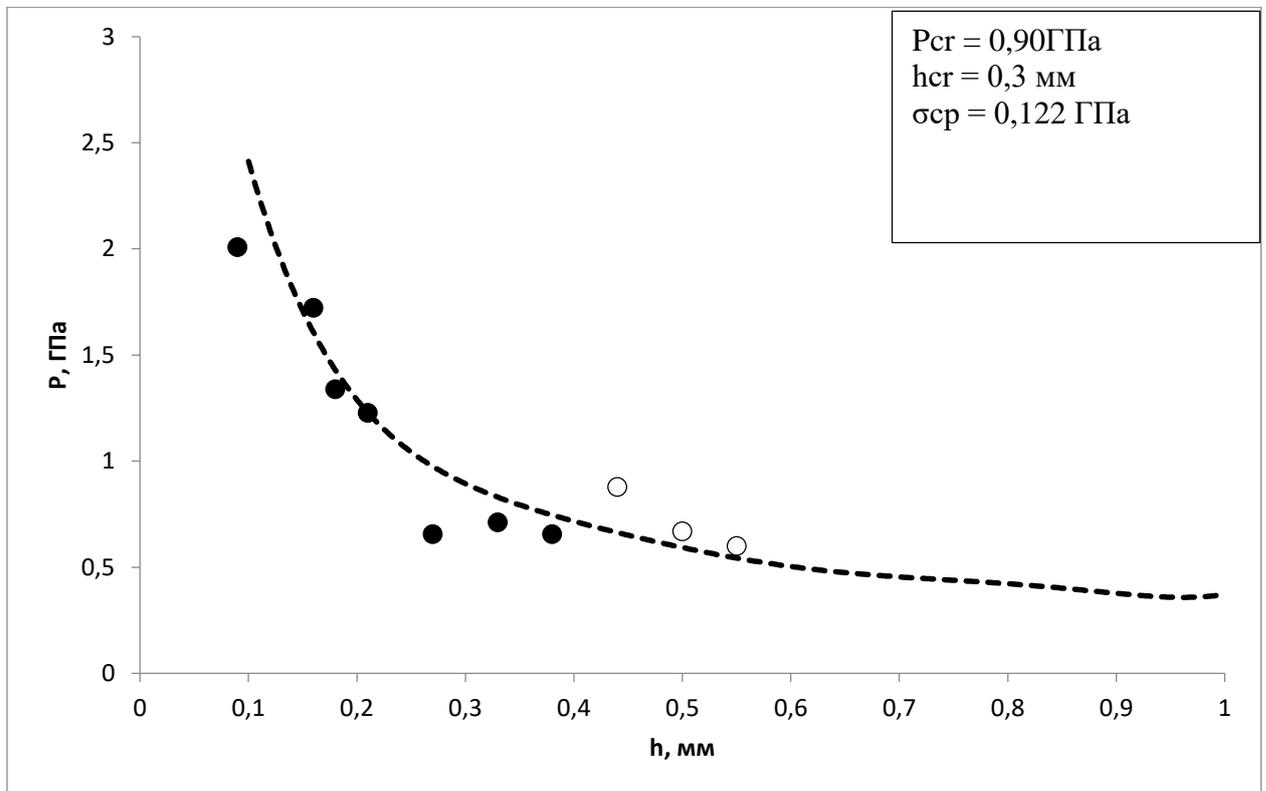


Рисунок 87 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 90%

## Смесь окфол-3,5-НРА

Таблица 80 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 90%/10%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	24,04	0,07	84,38	1,946	0,068291	0,100
24	24,22	0,22	44,06	1,016	0,104	
23,93	24,23	0,3	77,34	1,783	0,241	
24	24,32	0,32	30,47	0,703	0,100	
23,99	24,39	0,4	29,06	0,670	0,115	
23,97	24,46	0,49	12,66	0,292	0,059	
23,56	24,06	0,5	19,22	0,443	0,091	
23,77	24,33	0,56	14,53	0,335	0,076	
23,95	24,64	0,69	5,16	0,119	0,031	
24	24,71	0,71	13,13	0,303	0,082	

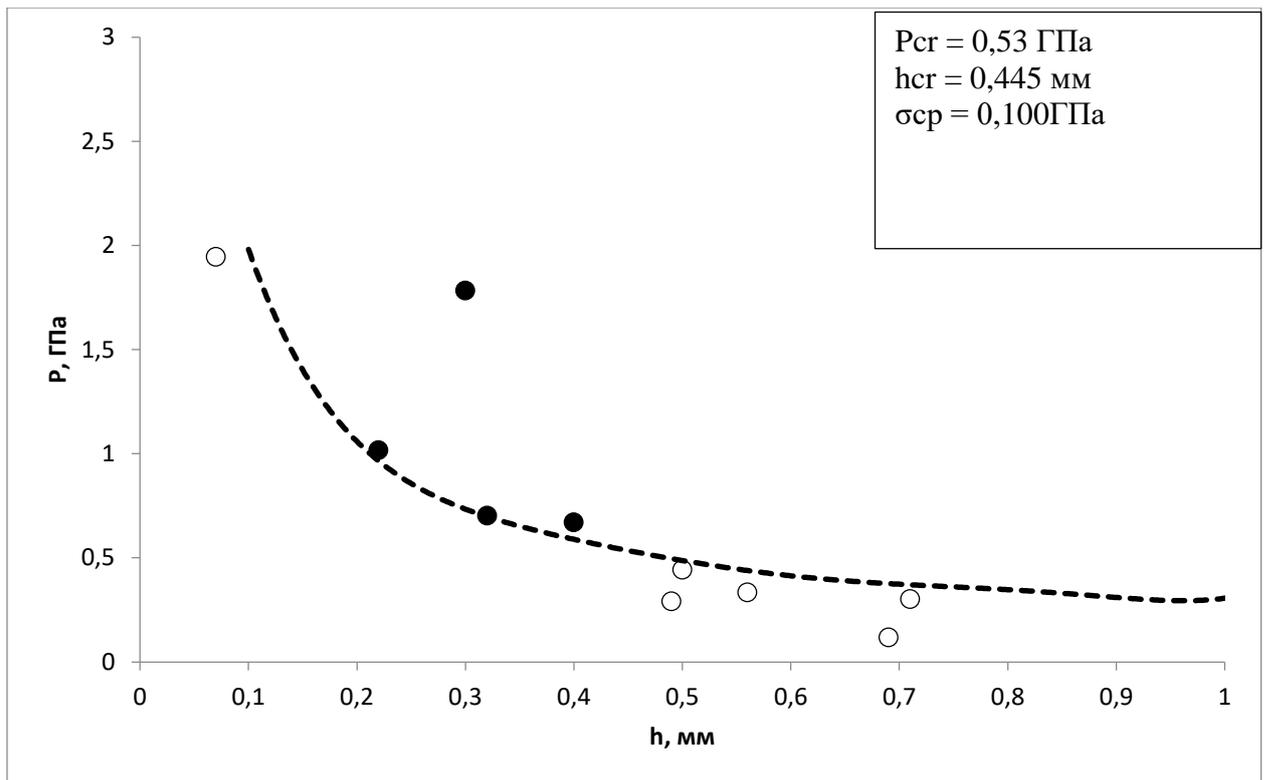


Рисунок 88 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 10%

Таблица 81 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 80%/20%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	24,08	0,11	85,78	2,118	0,115	0,097
24	24,15	0,15	35,63	0,880	0,064	
23,93	24,26	0,33	20,63	0,509	0,075	
24	24,34	0,34	15,47	0,382	0,057	
23,99	24,39	0,4	15,47	0,382	0,066	
23,97	24,4	0,43	26,72	0,660	0,121	
23,56	24,06	0,5	19,69	0,486	0,100	
23,77	24,41	0,64	22,03	0,544	0,136	
23,95	24,55	0,6	19,22	0,475	0,113	
24	24,69	0,69	22,5	0,556	0,147	

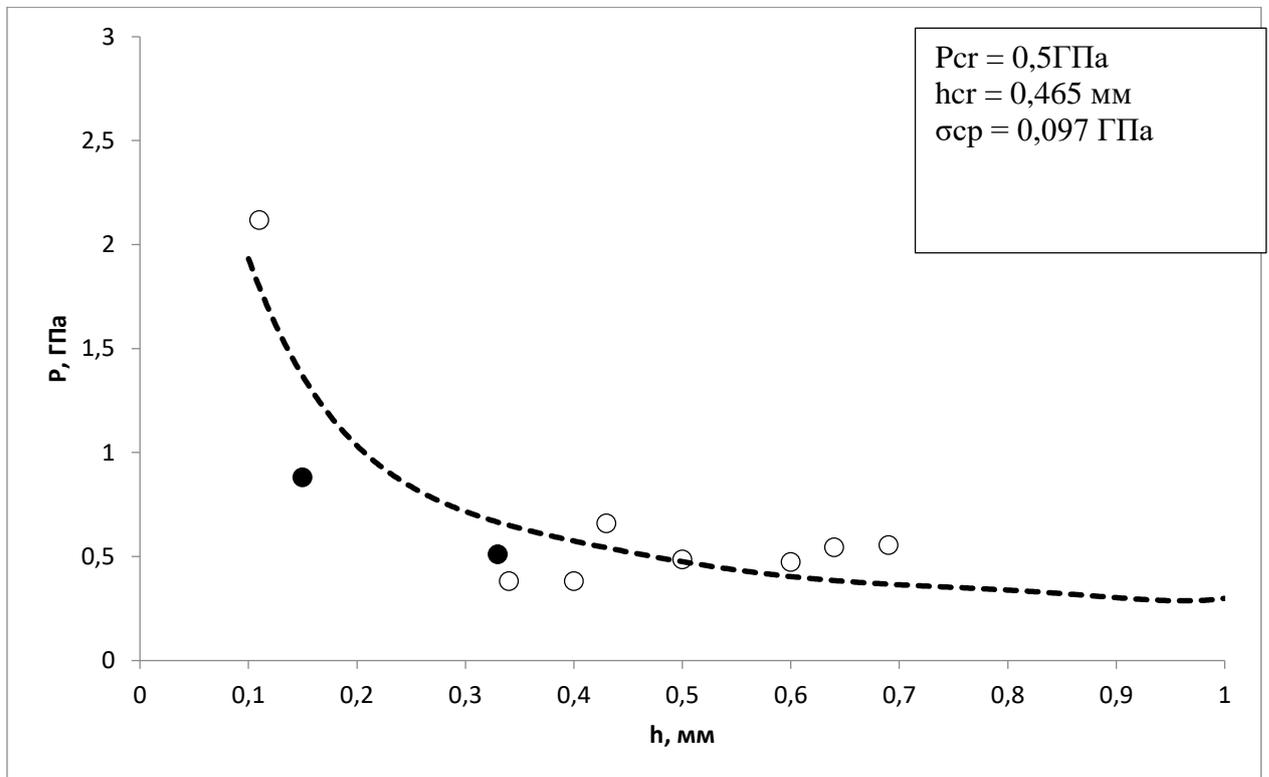


Рисунок 89 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 20%

Таблица 82 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 70%/30%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	24,02	0,05	89,06	1,988	0,050	0,094
24	24,09	0,09	35,16	0,785	0,035	
23,93	24,16	0,23	44,06	0,983	0,105	
24	24,26	0,26	22,03	0,492	0,059	
23,99	24,3	0,31	28,13	0,628	0,087	
23,97	24,27	0,3	34,22	0,764	0,103	
23,85	24,26	0,41	33,75	0,753	0,132	
23,77	24,28	0,51	30,94	0,691	0,145	
23,95	24,48	0,53	19,69	0,439	0,095	
24	24,61	0,61	16,41	0,366	0,088	

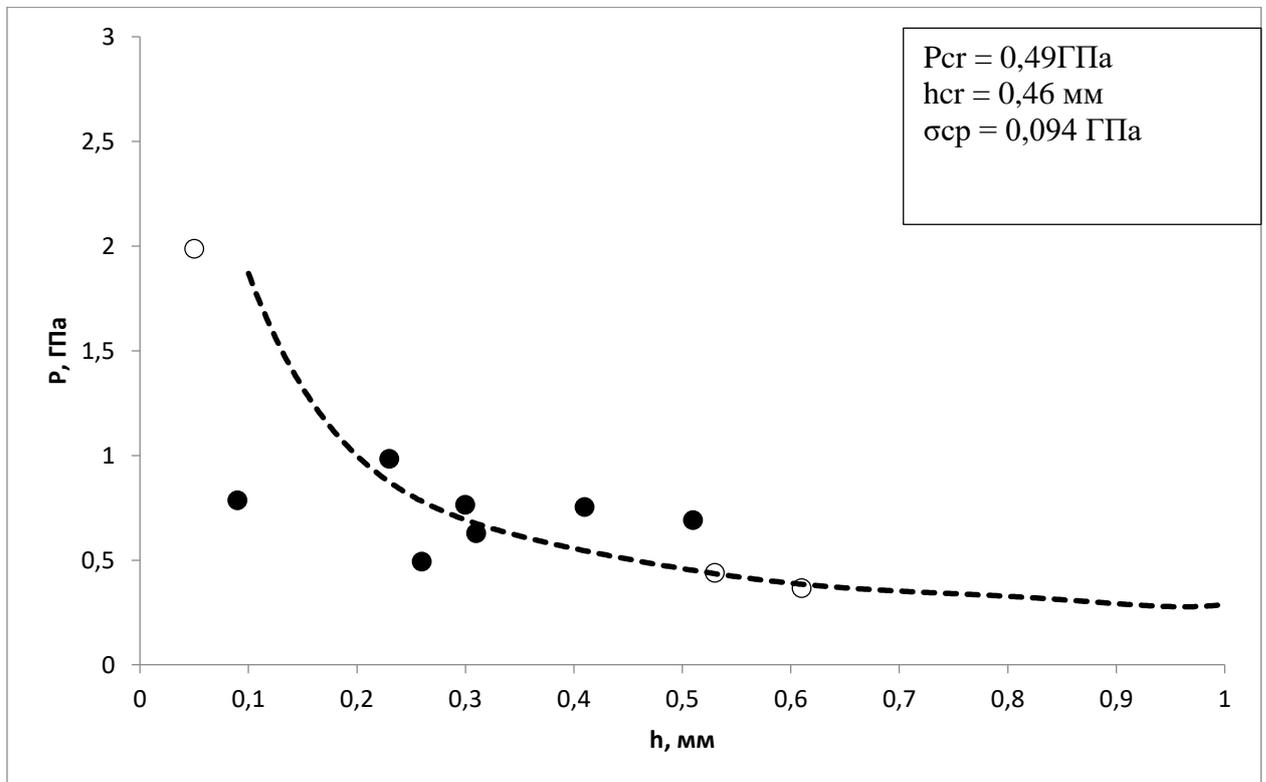


Рисунок 90 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 30%

Таблица 83 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 60%/40%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	23,98	0,01	85,31	2,135	0,011	0,131
24	24,04	0,04	84,38	2,111	0,043	
23,93	24,08	0,15	52,5	1,314	0,095	
24	24,16	0,16	57,66	1,443	0,111	
23,99	24,23	0,24	39,84	0,997	0,111	
23,97	24,25	0,28	21,09	0,528	0,067	
23,85	24,17	0,32	35,16	0,880	0,125	
23,77	24,19	0,42	35,16	0,880	0,158	
23,92	24,46	0,54	30,47	0,762	0,167	
24	24,57	0,57	29,06	0,727	0,166	
23,97	24,56	0,59	28,59	0,715	0,168	
24	24,62	0,62	23,91	0,598	0,146	
23,93	24,69	0,76	19,69	0,493	0,139	
24	24,78	0,78	17,81	0,502	0,145	
23,99	24,81	0,82	13,13	0,370	0,111	
23,97	24,86	0,89	15,47	0,436	0,138	
23,85	24,78	0,93	15,47	0,436	0,142	
24	24,85	0,85	14,53	0,410	0,125	
23,77	24,8	1,03	12,19	0,344	0,120	

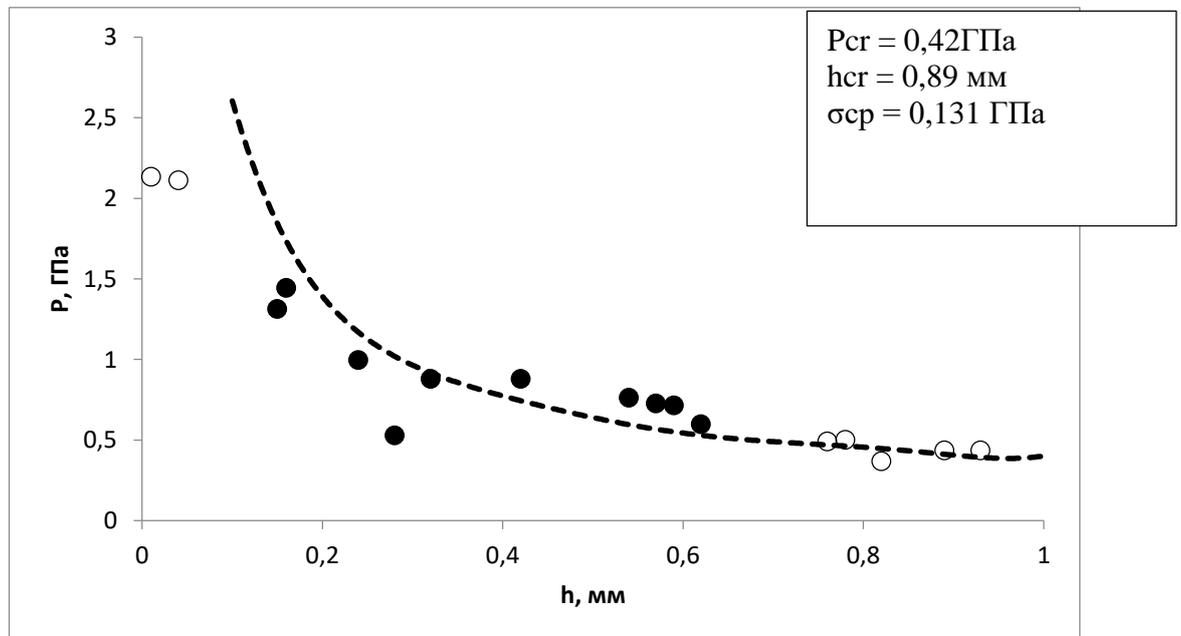


Рисунок 91 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 40%

Таблица 84 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 50%/50%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	24,01	0,04	83,44	2,003	0,041	0,148
24	24,07	0,07	83,44	2,003	0,070	
23,93	24,13	0,2	37,5	0,900	0,085	
24	24,25	0,25	52,03	1,249	0,144	
23,99	24,28	0,29	44,06	1,058	0,139	
23,97	24,3	0,33	38,44	0,923	0,135	
23,85	24,24	0,39	52,97	1,272	0,214	
23,77	24,28	0,51	31,88	0,765	0,160	
23,95	24,48	0,53	33,28	0,799	0,173	
24	24,63	0,63	30,47	0,731	0,180	
23,97	24,62	0,65	20,16	0,484	0,122	
24	24,67	0,67	30	0,720	0,186	
23,93	24,75	0,82	24,84	0,596	0,178	
23,97	24,66	0,69	21,56	0,608	0,160	
24	24,77	0,77	13,59	0,383	0,109	
23,93	24,81	0,88	14,53	0,410	0,129	
24	24,93	0,93	14,06	0,396	0,129	
23,99	24,92	0,93	13,59	0,383	0,125	
23,97	24,94	0,97	16,41	0,463	0,155	

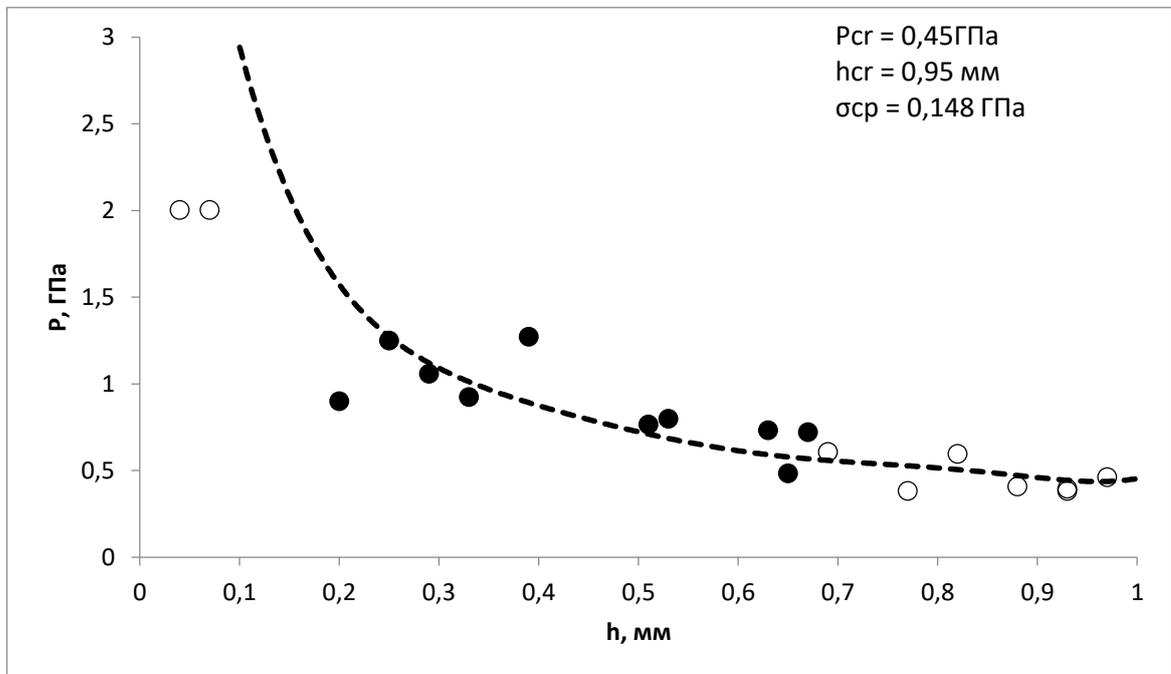


Рисунок 92 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 50%

Таблица 85 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 40%/60%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,84	23,88	0,04	86,72	2,082	0,042	0,156
23,92	24,04	0,12	31,88	0,765	0,045	
23,9	24,1	0,2	66,09	1,587	0,149	
23,89	24,12	0,23	36,56	0,878	0,094	
23,92	24,23	0,31	57,66	1,384	0,192	
23,85	24,2	0,35	49,22	1,182	0,182	
23,28	23,71	0,43	30,94	0,913	0,167	
23,91	24,37	0,46	31,41	0,927	0,179	
23,78	24,3	0,52	25,31	0,747	0,159	
23,78	24,34	0,56	24,84	0,733	0,165	
23,84	24,46	0,62	22,5	0,664	0,162	
23,92	24,59	0,67	18,81	0,555	0,143	
23,28	24,01	0,73	20,63	0,581	0,160	
23,91	24,72	0,81	19,69	0,555	0,164	
23,78	24,65	0,87	20,16	0,568	0,177	
23,78	24,68	0,9	20,63	0,581	0,185	
23,92	24,86	0,94	15,47	0,436	0,143	
23,9	24,97	1,07	17,81	0,502	0,179	
23,89	25,01	1,12	15,94	0,449	0,165	

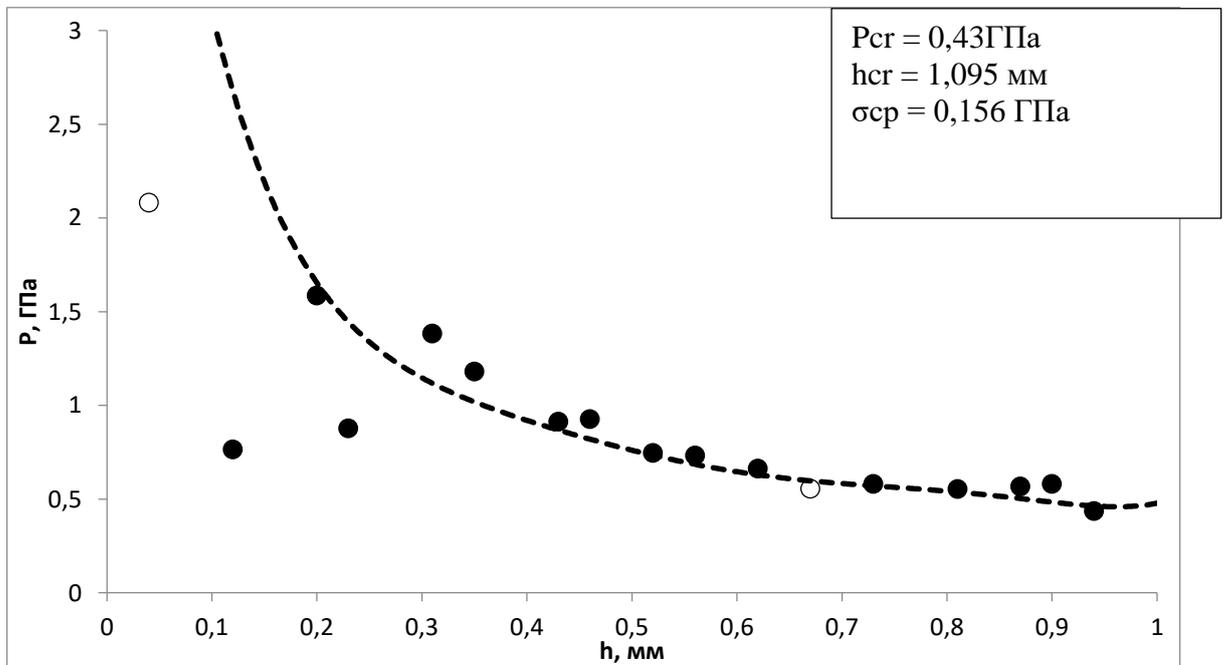


Рисунок 93 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 60%

Таблица 86 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 70%/30%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,97	23,99	0,02	84,38	2,129	0,022	0,163
24	24,05	0,05	83,44	2,106	0,053	
23,93	24,16	0,23	44,53	1,124	0,120	
24	24,18	0,18	69,38	1,751	0,150	
23,99	24,32	0,33	38,44	0,970	0,142	
23,97	24,33	0,36	34,69	0,875	0,138	
23,85	24,22	0,37	56,72	1,431	0,231	
23,77	24,22	0,45	36,56	0,923	0,175	
23,95	24,49	0,54	28,59	0,722	0,158	
24	24,58	0,58	28,59	0,722	0,167	
23,97	24,59	0,62	31,88	0,805	0,196	
24	24,65	0,65	21,09	0,532	0,134	
24,07	24,77	0,7	27,19	0,662	0,177	
23,3	24,01	0,71	26,25	0,740	0,199	
23,93	24,68	0,75	25,78	0,727	0,204	
24	24,77	0,77	24,38	0,687	0,196	
23,99	24,81	0,82	20,63	0,581	0,174	
23,97	24,84	0,87	21,56	0,608	0,189	
23,77	24,75	0,98	21,09	0,594	0,201	
23,95	24,97	1,02	12,66	0,357	0,124	
24	25,04	1,04	15	0,423	0,148	
24,07	24,87	0,8	15,47	0,436	0,128	
24	25,16	1,16	15,47	0,436	0,164	
23,93	25,14	1,21	15,94	0,449	0,173	
24	25,21	1,21	16,41	0,463	0,179	
23,99	25,23	1,24	14,53	0,410	0,160	
23,99	25,05	1,06	12,66	0,357	0,127	
23,85	24,9	1,05	13,13	0,370	0,131	
23,77	24,94	1,17	13,13	0,370	0,140	
24	25,26	1,26	15,47	0,436	0,173	
23,81	25,15	1,34	14,06	0,396	0,163	
23,93	25,28	1,35	13,13	0,370	0,153	
24	25,42	1,42	10,78	0,304	0,129	

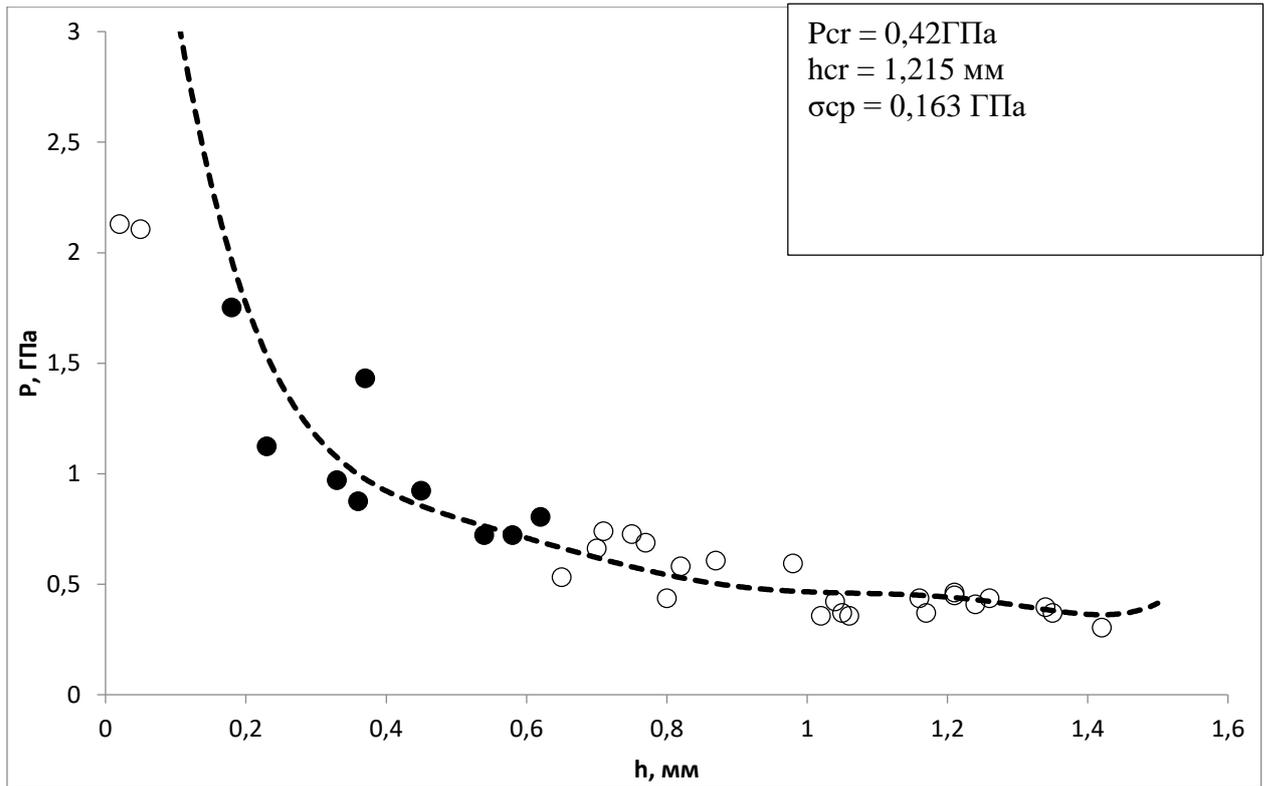


Рисунок 94 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 70%

Таблица 87 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/НРА в соотношении 20%/80%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
23,84	23,9	0,06	74,53	2,199	0,066	0,196
23,92	24,07	0,15	73,13	2,157	0,156	
23,9	24,1	0,2	52,03	1,535	0,144	
23,89	24,12	0,23	67,03	1,977	0,211	
23,92	24,23	0,31	49,22	1,452	0,201	
23,85	24,21	0,36	29,53	0,871	0,137	
23,28	23,73	0,45	39,38	1,162	0,220	
23,91	24,37	0,46	38,91	1,148	0,221	
23,78	24,35	0,57	21,09	0,622	0,142	
23,78	24,38	0,6	33,75	0,996	0,237	
23,84	24,46	0,62	21,09	0,622	0,152	
23,92	24,56	0,64	37,03	1,092	0,273	
23,9	24,61	0,71	25,78	0,761	0,205	
24,07	24,87	0,8	21,09	0,594	0,175	
23,92	24,71	0,79	26,72	0,753	0,219	
23,9	24,74	0,84	24,38	0,687	0,209	
23,89	24,79	0,9	23,44	0,661	0,211	
23,92	24,86	0,94	23,44	0,661	0,217	
23,99	24,95	0,96	20,63	0,581	0,194	
23,85	24,82	0,97	21,56	0,608	0,204	
23,91	24,96	1,05	21,56	0,608	0,215	
23,78	24,86	1,08	20,16	0,568	0,204	
23,78	24,89	1,11	18,75	0,528	0,193	
24,07	24,91	0,84	17,34	0,489	0,149	
23,92	25,12	1,2	17,81	0,502	0,193	
23,9	25,07	1,17	12,66	0,357	0,135	
23,92	25,21	1,29	18,28	0,515	0,207	
23,89	25,05	1,16	12,19	0,344	0,129	
23,99	25,1	1,11	15,94	0,449	0,163	
23,91	25,15	1,24	11,72	0,330	0,250	
23,78	25,29	1,51	14,06	0,396	0,283	

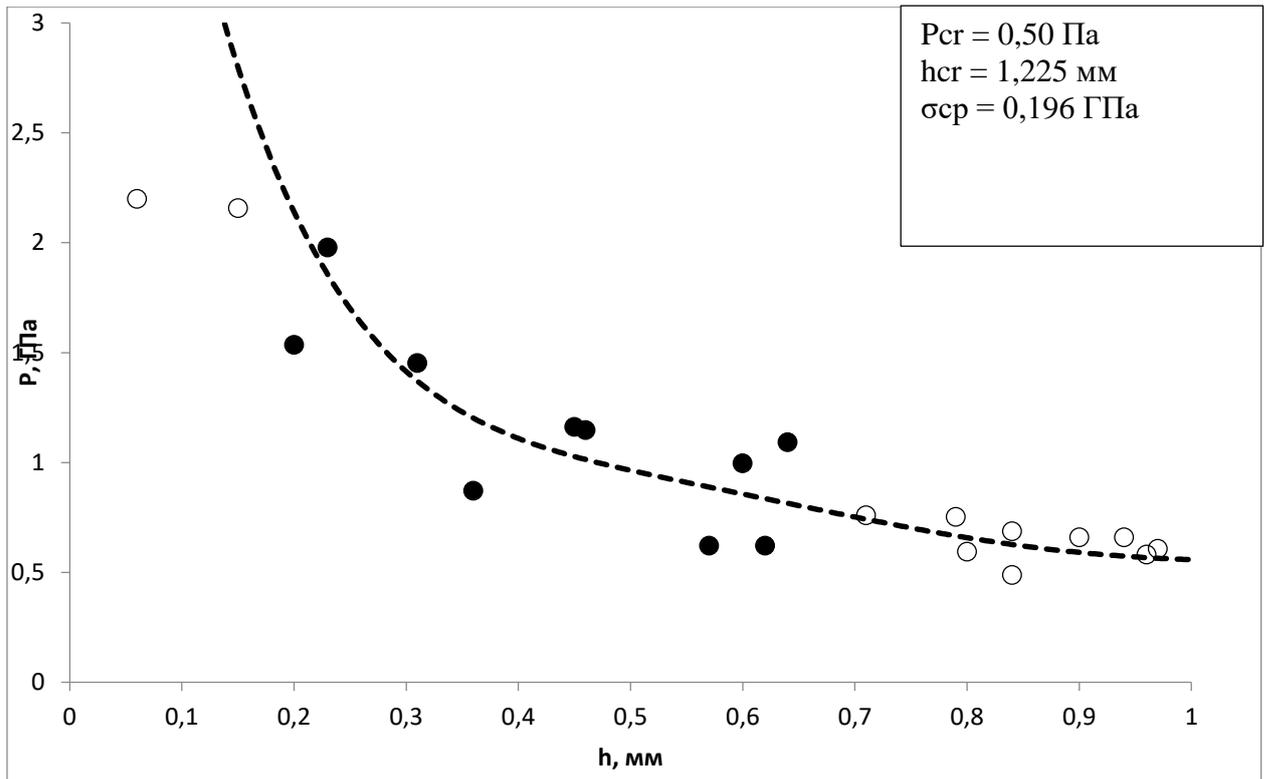


Рисунок 95 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с алюминием. Содержание алюминия в смеси – 80%

Приложение 3  
Смеси окфола-3,5 с углеродными добавками

Таблица 88 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/нанотрубки в соотношении 98%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
23,15	23,18	0,03	66,56	2,2945	0,035	0,071
23,9	24	0,1	31,41	1,083	0,053	
23,95	24,12	0,17	29,53	1,018	0,082	
23,92	24,16	0,24	19,69	0,678	0,075	
22,31	22,63	0,32	14,53	0,500	0,071	
24	24,35	0,35	16,88	0,582	0,0895	
24,03	24,44	0,41	14,06	0,485	0,085	
23,92	24,37	0,45	7,5	0,2585	0,049	
23,92	24,46	0,54	7,5	0,2585	0,056	
23,85	24,45	0,6	9,38	0,323	0,077	

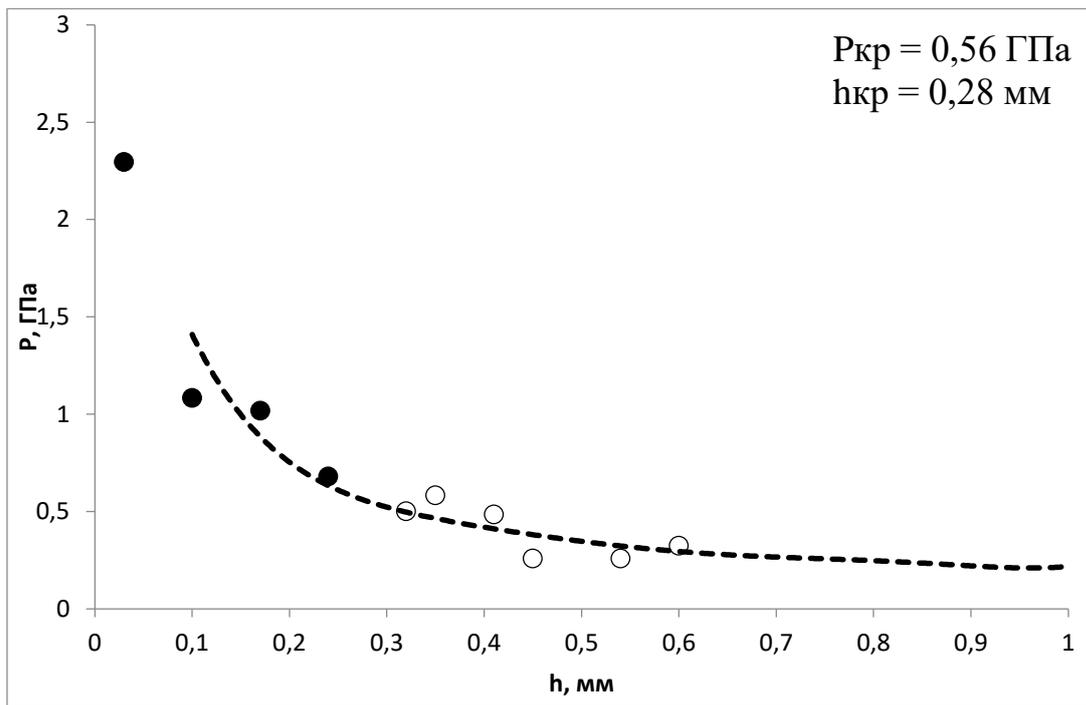


Рисунок 96 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфола-3,5 с нанотрубками. Содержание нанотрубок в смеси 2%

Таблица 89 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/графен в соотношении 98%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
23,11	23,19	0,08	23,91	0,7845	0,031	0,065
23,9	24,04	0,14	15,94	0,523	0,035	
23,95	24,14	0,19	27,19	0,661	0,065	
23,92	24,17	0,25	15,47	0,8921	0,080	
22,31	22,64	0,33	12,66	0,646	0,085	
24	24,46	0,46	11,72	0,369	0,047	
24,03	24,54	0,51	7,97	0,507	0,058	
23,92	24,42	0,5	15,94	0,415	0,060	
23,92	24,55	0,63	8,44	0,385	0,074	
23,85	24,55	0,7	9,38	0,261	0,055	

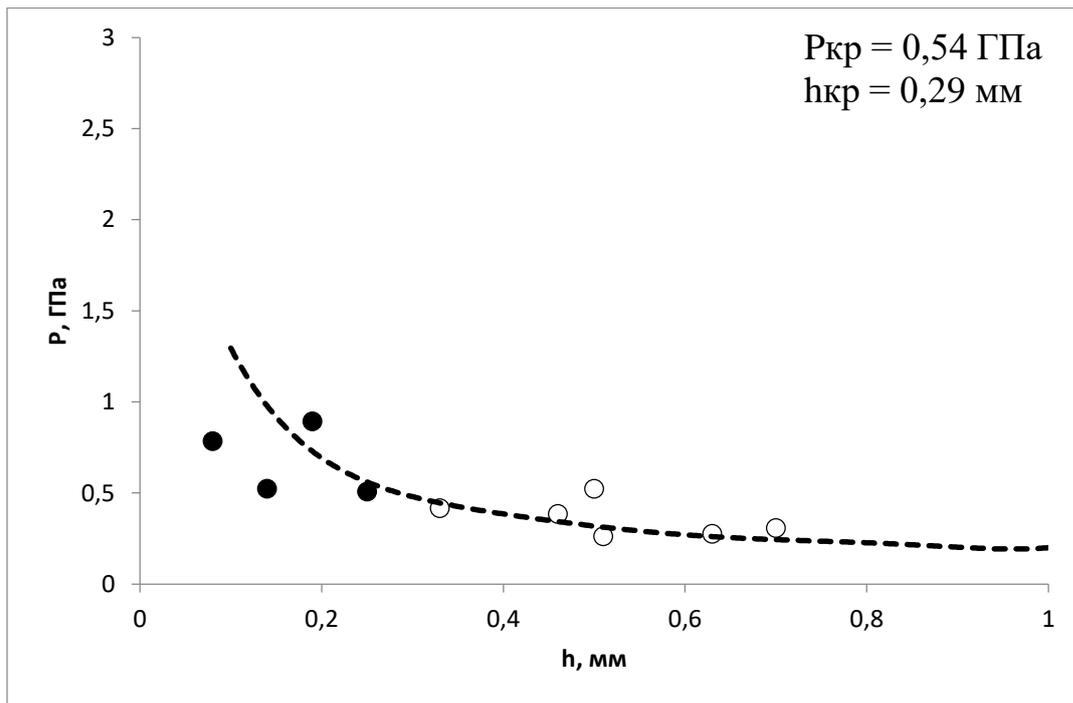


Рисунок 97 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с графеном. Содержание графена в смеси 2%

Таблица 90 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/сажа в соотношении 98%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
23,15	23,29	0,14	24,38	0,816	0,055	0,061
23,9	24,08	0,18	24,38	0,816	0,070	
23,95	24,19	0,24	13,59	0,455	0,050	
23,92	24,21	0,29	14,53	0,486	0,063	
22,31	22,64	0,33	7,5	0,251	0,036	
24	24,38	0,38	11,25	0,376	0,062	
24,03	24,46	0,43	10,31	0,345	0,063	
23,92	24,43	0,51	11,25	0,377	0,079	
23,92	24,5	0,58	9,38	0,314	0,078	
23,85	24,5	0,65	7,03	0,235	0,060	

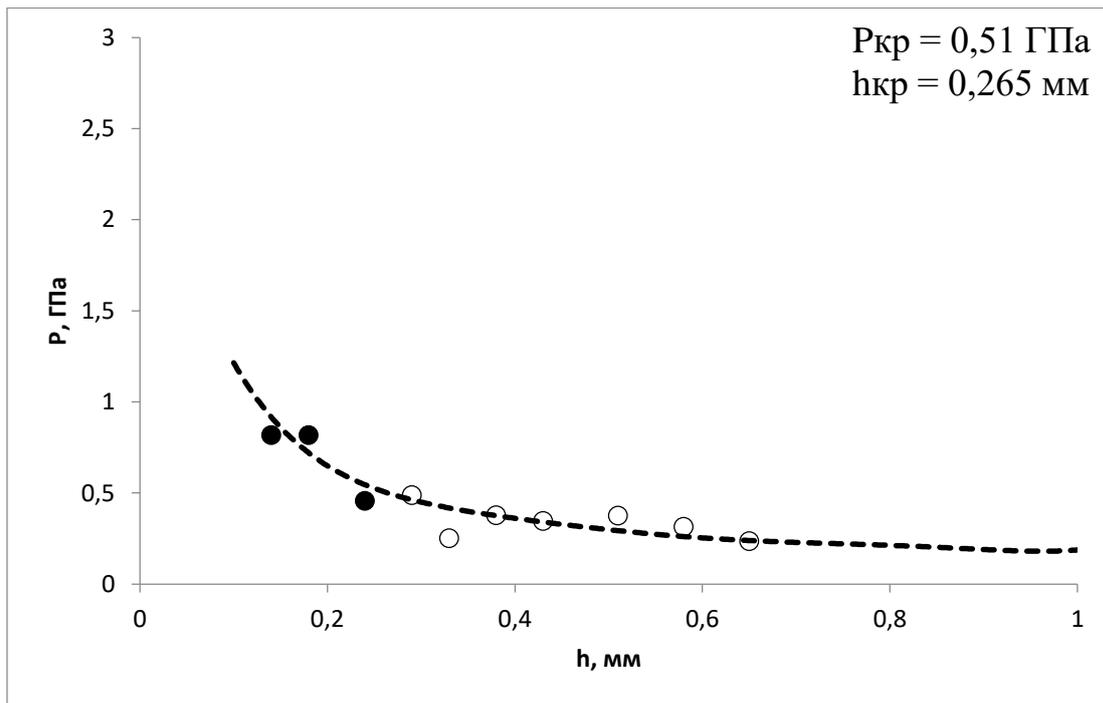


Рисунок 98 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфола-3,5 с сажей. Содержание сажи в смеси 2%

Таблица 91 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/сажа в соотношении 95%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
23,11	23,16	0,05	42,66	1,461	0,037	0,086
23,9	24	0,1	41,72	1,430	0,070	
23,95	24,09	0,14	38,44	1,317	0,0893	
23,95	24,15	0,23	14,53	0,497	0,053	
23,92	22,65	0,34	25,78	0,883	0,132	
23,92	24,45	0,45	18,75	0,642	0,122	
23,92	24,52	0,49	7,97	0,273	0,055	
22,31	24,48	0,56	15	0,514	0,115	
24	24,51	0,59	11,25	0,385	0,090	
24,03	24,58	0,73	9,84	0,337	0,092	

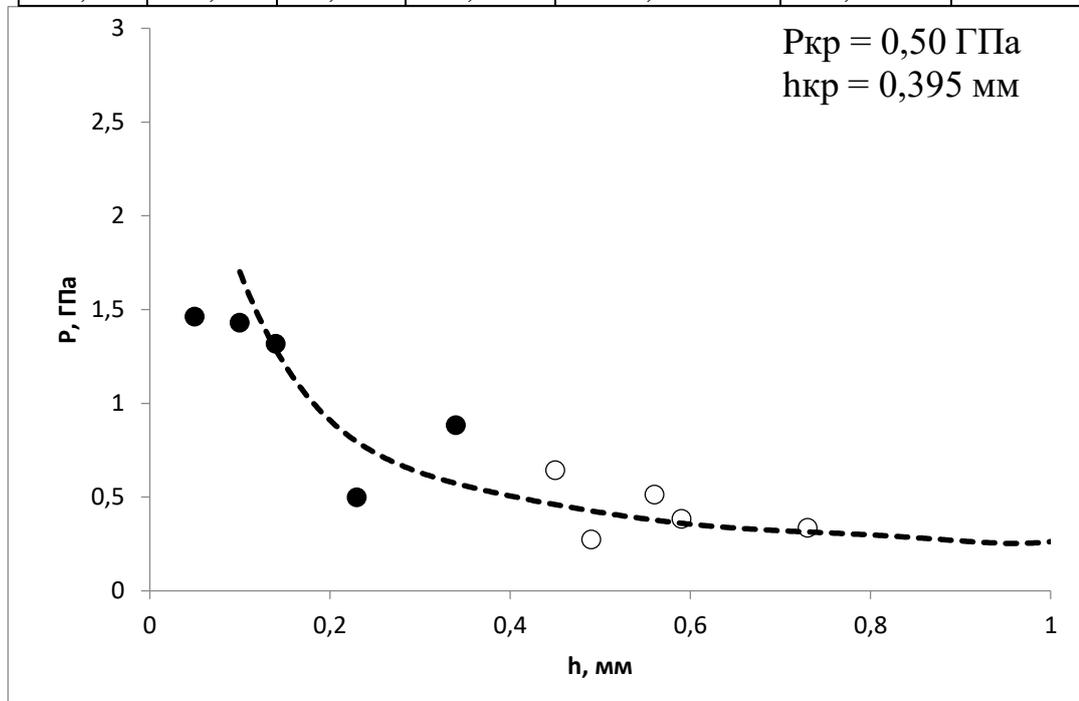


Рисунок 99 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфола-3,5 с сажей. Содержание сажи в смеси 5%

Таблица 92 – Результаты эксперимента со смесью оксид-3,5/нанотрубки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в соотношении 99%/1%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,41	24,51	0,1	39,38	1,916	0,094	0,107
24,42	24,63	0,21	17,81	0,8645	0,085	
24,41	24,68	0,27	17,81	0,8645	0,106	
24,38	24,69	0,31	19,22	0,933	0,129	
24,4	24,77	0,37	16,88	0,820	0,132	
24,38	24,82	0,44	14,53	0,705	0,131	
24,41	24,95	0,54	7,03	0,341	0,075	
24,39	24,96	0,57	8,91	0,4325	0,099	
24,4	25,02	0,62	9,38	0,455	0,111	
24,35	25,06	0,71	7,97	0,387	0,104	

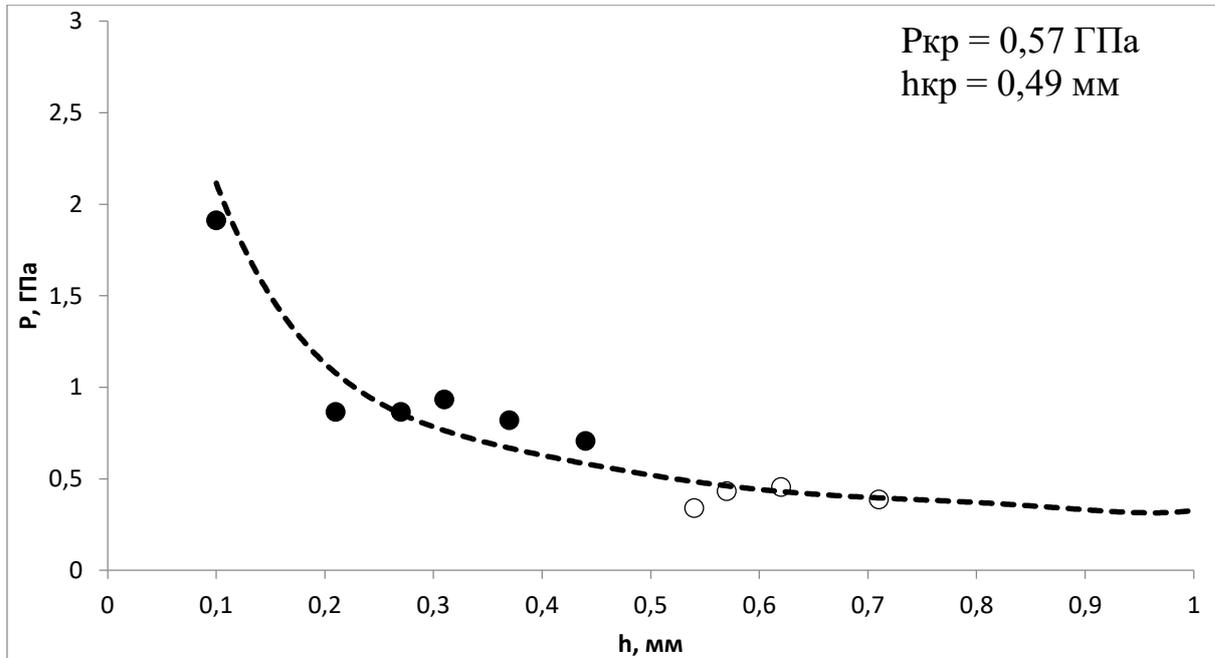


Рисунок 100 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей оксид-3,5 с нанотрубками ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Содержание нанотрубок ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в смеси 1%

Таблица 93 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/нанотрубки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в соотношении 98%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,41	24,51	0,09	31,38	1,554	0,069	0,128
24,42	24,63	0,15	25,78	1,277	0,092	
24,41	24,68	0,22	24,84	1,23	0,126	
24,38	24,69	0,29	23,44	1,161	0,152	
24,4	24,77	0,36	18,28	0,905	0,143	
24,38	24,82	0,46	15	0,743	0,143	
24,41	24,95	0,53	14,06	0,696	0,150	
24,39	24,96	0,59	12,19	0,604	0,141	
24,4	25,02	0,66	10,78	0,534	0,136	
24,35	25,06	0,09	31,38	1,554	0,069	

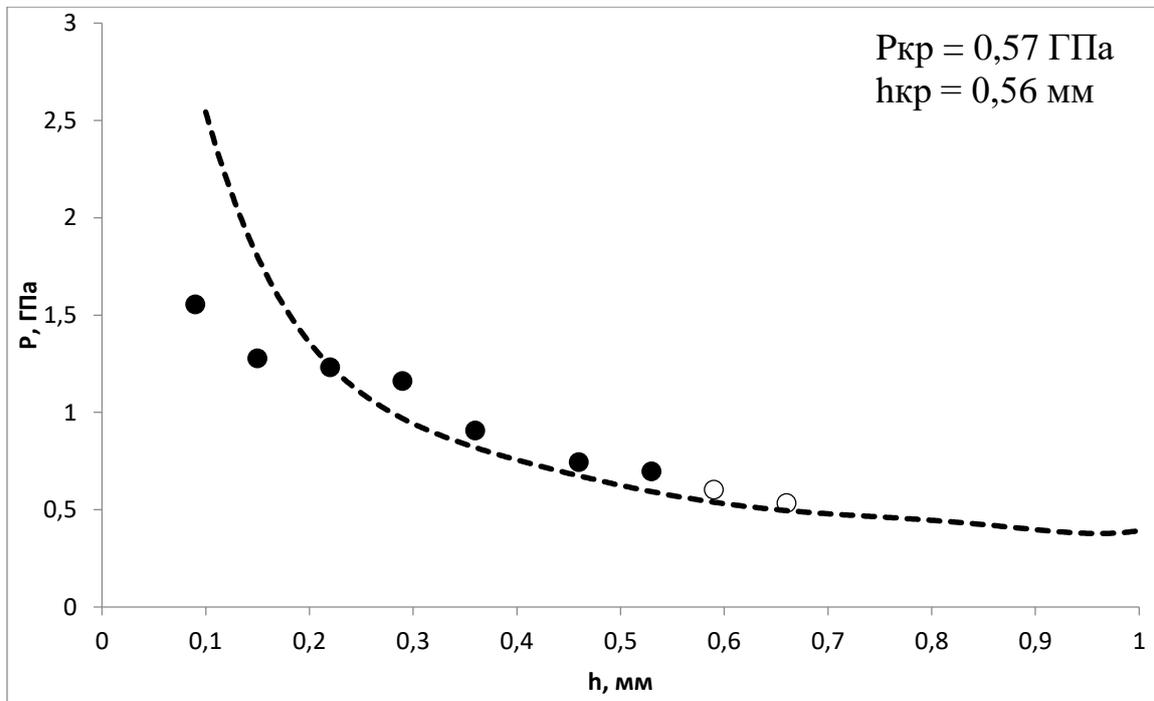


Рисунок 101 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с нанотрубками ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Содержание нанотрубок ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в смеси 2%

Таблица 94 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/нанотрубки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в соотношении 95%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,41	24,5	0,09	39,84	1,890	0,0845	0,092
24,42	24,56	0,14	39,38	1,100	0,0745	
24,41	24,63	0,22	22,5	1,067	0,1095	
24,38	24,67	0,28	19,22	0,912	0,116	
24,4	24,76	0,36	17,81	0,497	0,078	
24,38	24,86	0,48	14,06	0,392	0,078	
24,41	24,96	0,55	7,03	0,196	0,043	
24,39	24,97	0,58	11,72	0,556	0,129	
24,4	25,03	0,63	16,88	0,471	0,116	
24,35	25,02	0,67	13,13	0,367	0,094	

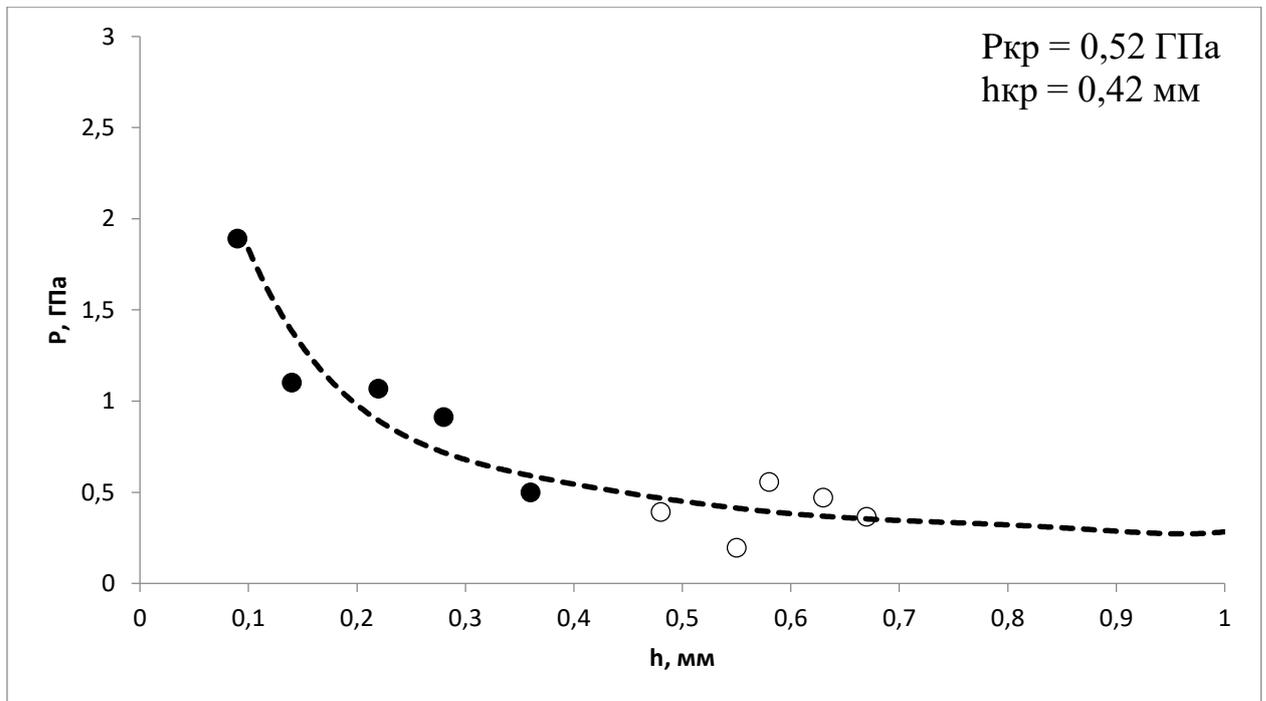


Рисунок 102 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с нанотрубками ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Содержание нанотрубок ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в смеси 5%

Таблица 95 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид железа (III)/нанотрубки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в соотношении 88%/10%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,45	0,09	41,72	1,420	0,063	0,139
24,37	24,51	0,14	48,28	1,643	0,111	
24,39	24,59	0,2	35,63	1,213	0,114	
24,34	24,62	0,28	31,88	1,085	0,137	
24,37	24,72	0,35	28,13	0,958	0,147	
24,35	24,79	0,44	27,66	0,942	0,175	
24,38	24,88	0,5	24,84	0,846	0,174	
24,37	24,92	0,55	19,69	0,670	0,149	
24,36	25	0,64	20,16	0,686	0,171	
24,32	25,01	0,69	15	0,511	0,134	
24,36	25,12	0,76	15,47	0,526	0,149	

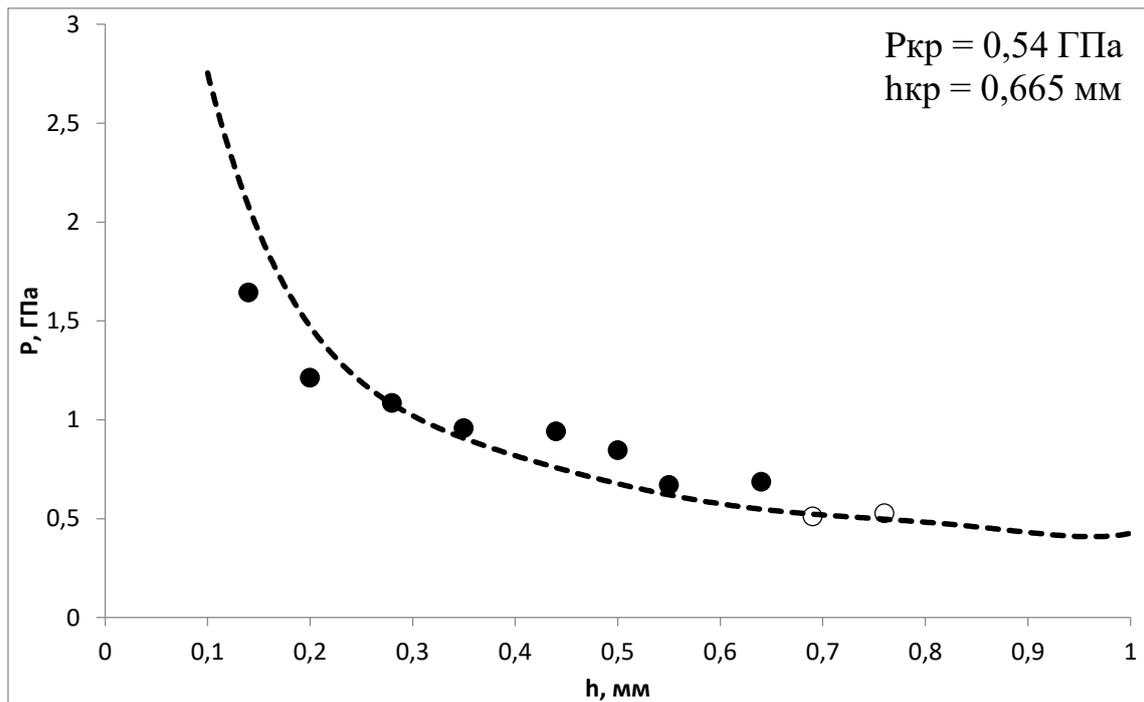


Рисунок 103 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом железа (III) и нанотрубками ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Содержание оксида железа (III) в смеси 10%, нанотрубок ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 2%

Таблица 96 – Результаты эксперимента со смесью окфола-3,5/оксид железа (III)/нанотрубки ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в соотношении 85%/10%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,41	0,05	49,69	1,741	0,044	0,119
24,37	24,5	0,13	44,06	1,544	0,098	
24,39	24,63	0,24	37,03	1,298	0,144	
24,34	24,65	0,31	31,41	1,100	0,152	
24,37	24,75	0,38	19,22	0,673	0,111	
24,35	24,75	0,4	21,09	0,739	0,127	
24,38	24,87	0,49	19,22	0,674	0,137	
24,37	24,92	0,55	15,94	0,558	0,124	
24,36	25	0,64	14,53	0,509	0,127	
24,32	25,01	0,69	13,13	0,460	0,121	

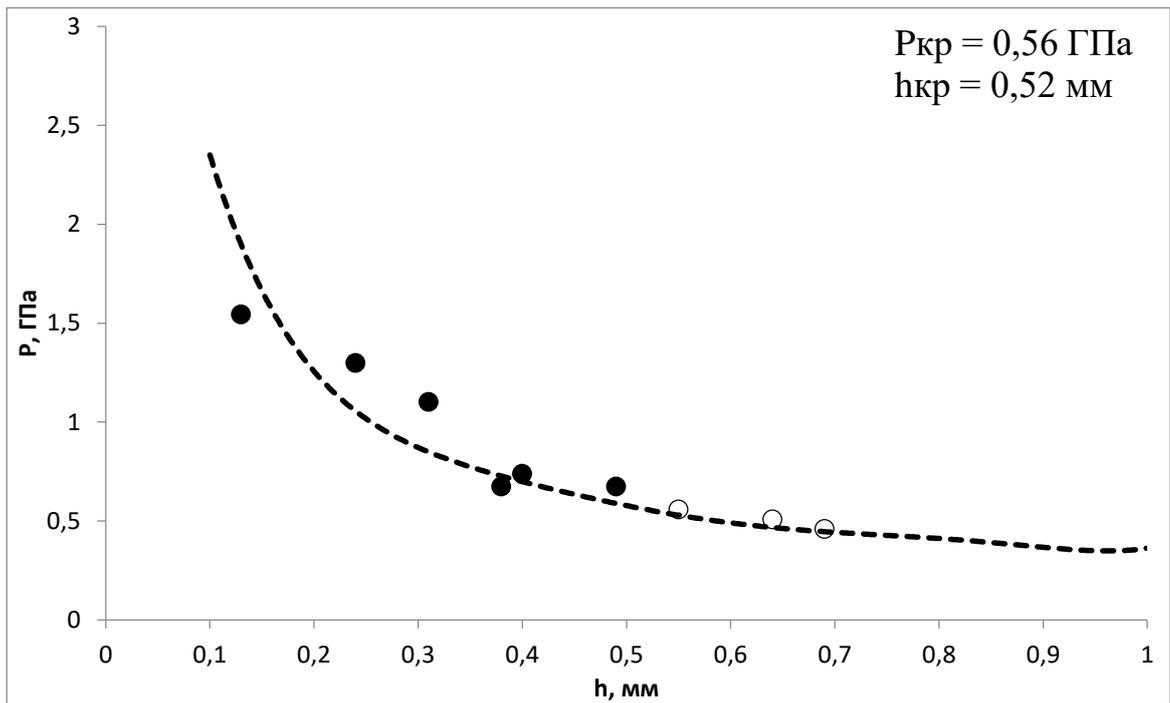


Рисунок 104 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфола-3,5 с оксидом железа (III) и нанотрубками ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Содержание оксида железа (III) в смеси 10%, нанотрубок ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 5%

Таблица 97 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид железа (III)/сажа в соотношении 88%/10%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,21	24,26	0,05	85,78	2,138	0,054	0,133
24,2	24,31	0,11	60,94	1,518	0,082	
24,29	24,49	0,2	46,88	1,168	0,110	
24,16	24,47	0,31	42,66	1,063	0,148	
24,21	24,6	0,39	26,72	0,666	0,112	
24,11	24,55	0,44	21,56	0,537	0,100	
24,2	24,71	0,51	23,44	0,584	0,122	
24,22	24,78	0,56	20,63	0,514	0,115	
24,01	24,62	0,61	28,13	0,701	0,168	
24,28	25,01	0,73	19,22	0,479	0,131	
24,21	24,98	0,77	17,34	0,432	0,123	
24,3	25,09	0,79	26,25	0,678	0,197	
24,29	25,18	0,89	19,22	0,497	0,157	
24,3	25,28	0,98	17,34	0,448	0,151	
24,14	25,18	1,04	15,47	0,400	0,140	

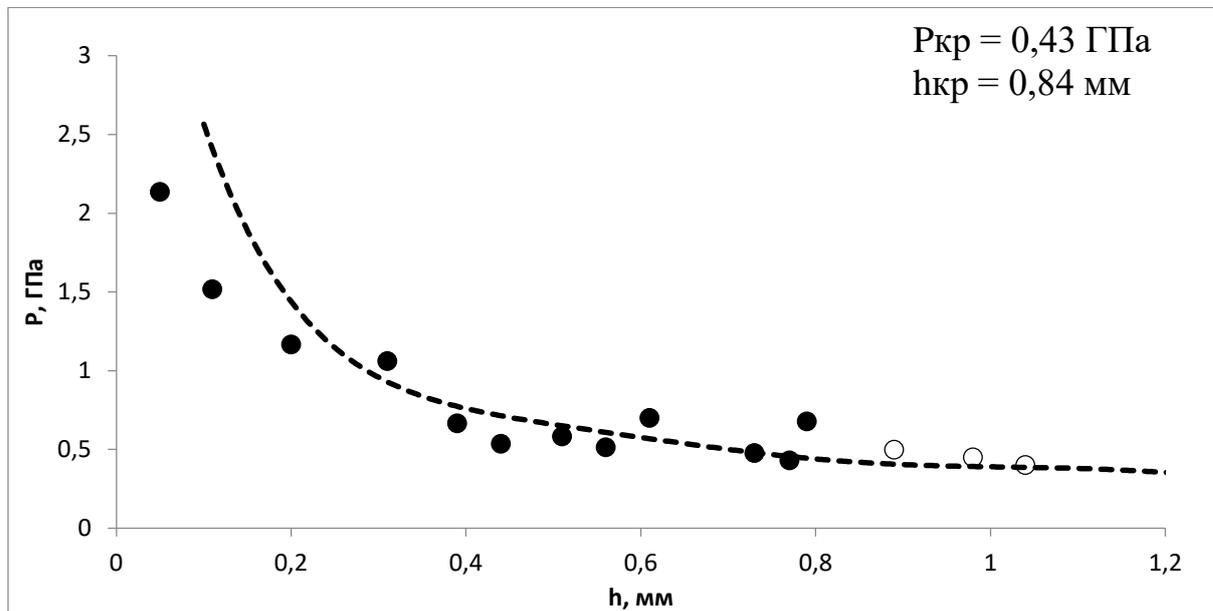


Рисунок 105 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом железа (III) и сажей. Содержание оксида железа (III) в смеси 10%, сажи 2%

Таблица 98 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид железа (III)/сажа в соотношении 85%/10%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,41	24,5	0,09	61,88	1,743	0,078	0,130
24,42	24,58	0,16	39,84	1,122	0,086	
24,41	24,66	0,25	36,09	1,016	0,117	
24,39	24,7	0,31	35,63	1,0035	0,139	
24,4	24,76	0,36	29,06	0,818	0,129	
24,38	24,85	0,47	30	0,850	0,165	
24,41	24,95	0,54	20,16	0,568	0,124	
24,39	25,02	0,63	21,56	0,607	0,150	
24,4	25,09	0,69	18,75	0,528	0,139	
24,35	25,1	0,75	18,75	0,528	0,148	
24,42	25,24	0,82	18,75	0,528	0,157	

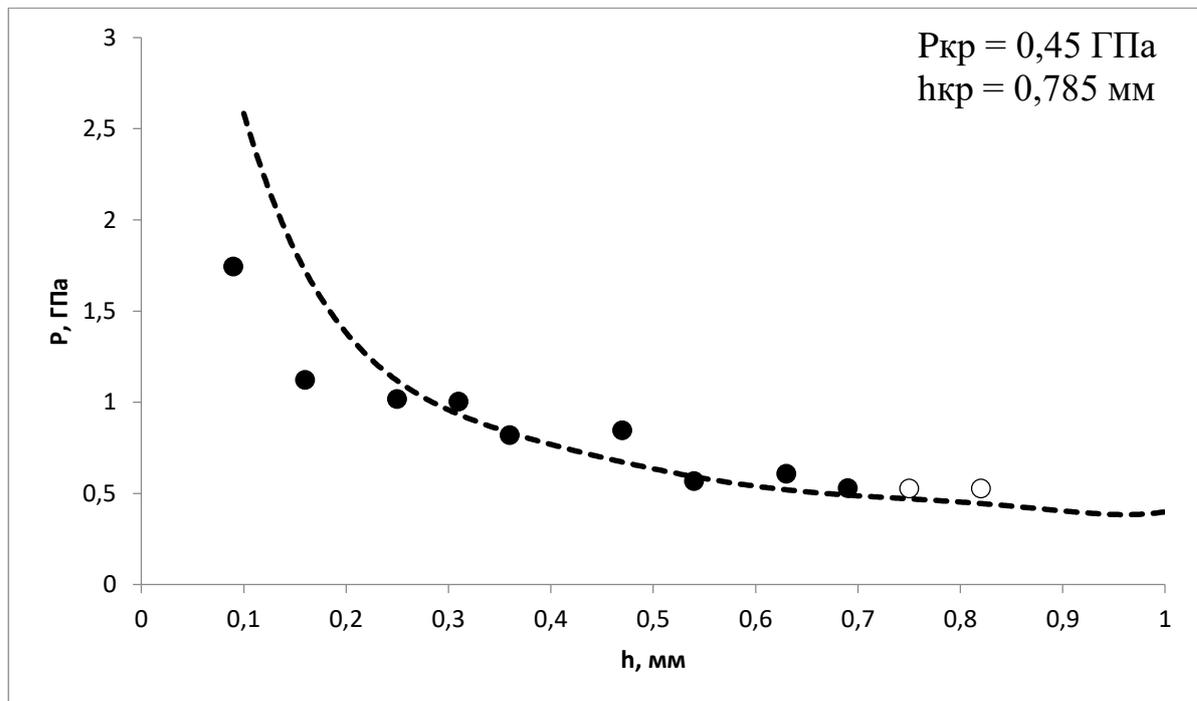


Рисунок 106 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом железа (III) и сажей. Содержание оксида железа (III) в смеси 10%, сажи 5%

Таблица 99 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид меди (II)/сажа в соотношении 88%/10%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,41	24,5	0,09	41,25	1,222	0,055	0,121
24,42	24,54	0,12	42,66	1,263	0,074	
24,41	24,63	0,22	30,47	0,9025	0,092	
24,39	24,66	0,27	30,47	0,9025	0,111	
24,4	24,79	0,39	28,13	0,833	0,140	
24,38	24,8	0,42	23,44	0,694	0,124	
24,41	24,91	0,5	23,44	0,694	0,143	
24,39	24,95	0,56	17,34	0,513	0,115	
24,4	25,01	0,61	22,03	0,6525	0,157	
24,35	25,02	0,67	21,56	0,640	0,165	
24,41	25,16	0,75	18,75	0,555	0,155	

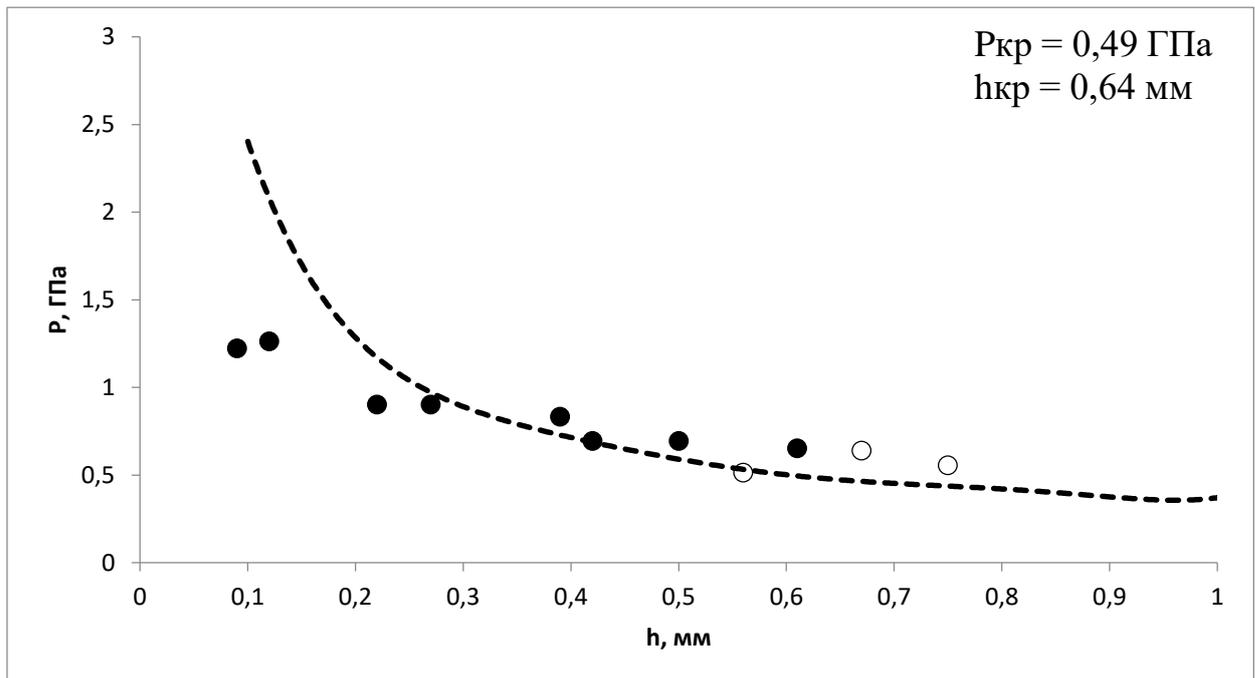


Рисунок 107 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом меди (II) и сажей. Содержание оксида меди (II) в смеси 10%, сажи 2%

Таблица 100 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид меди (II)/сажа в соотношении 85%/10%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,41	24,48	0,07	54,84	1,6435	0,057	0,121
24,42	24,57	0,15	41,25	1,236	0,090	
24,41	24,65	0,24	23,44	0,702	0,078	
24,39	24,69	0,3	32,81	0,983	0,132	
24,4	24,78	0,38	26,72	0,800	0,132	
24,38	24,83	0,45	23,91	0,716	0,136	
24,41	24,95	0,54	16,41	0,492	0,107	
24,39	25,01	0,62	16,41	0,492	0,120	
24,4	25,08	0,68	19,22	0,576	0,150	
24,35	25,09	0,74	19,22	0,576	0,160	
24,41	25,23	0,82	15,94	0,477	0,142	
24,42	25,29	0,87	15	0,450	0,140	

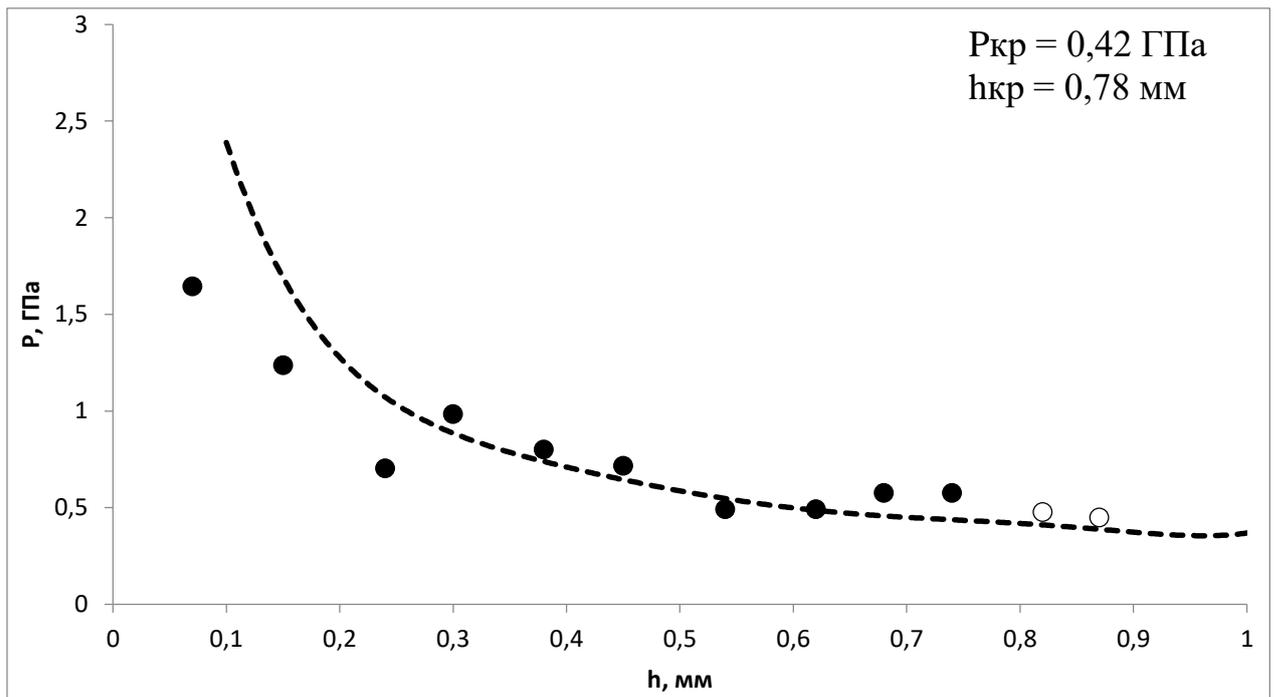


Рисунок 108 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом меди (II) и сажей. Содержание оксида меди (II) в смеси 10%, сажи 5%

Таблица 101 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид меди (II)/оксид цинка (II) в соотношении 88%/10%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,45	0,09	63,75	1,961	0,087	0,138
24,37	24,52	0,15	46,88	1,442	0,104	
24,39	24,62	0,23	35,16	1,081	0,115	
24,34	24,64	0,3	35,16	1,082	0,149	
24,37	24,72	0,35	27,19	0,8365	0,128	
24,35	24,78	0,43	29,06	0,894	0,163	
24,38	24,88	0,5	24,84	0,764	0,157	
24,37	24,92	0,55	22,97	0,706	0,157	
24,36	24,99	0,63	19,69	0,606	0,149	
24,32	24,99	0,67	18,28	0,562	0,145	
24,36	25,06	0,7	19,69	0,606	0,161	

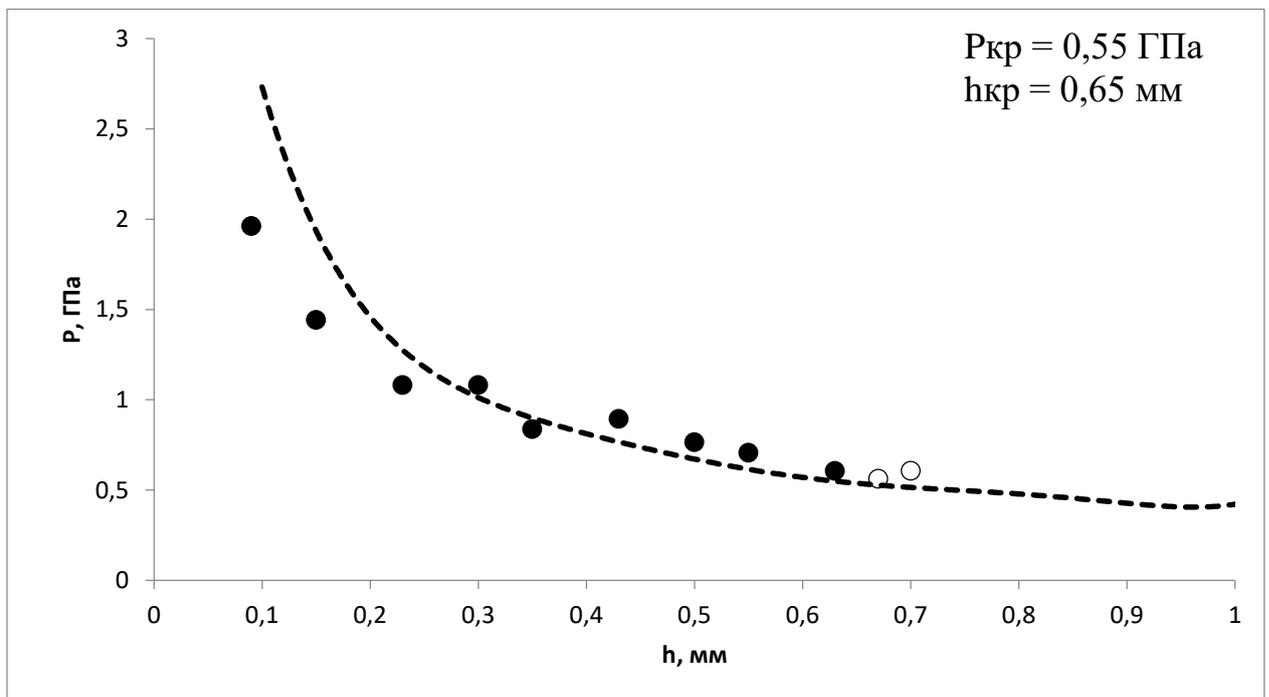


Рисунок 109 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом меди (II) и оксидом цинка (II).  
Содержание оксида меди (II) в смеси 10%, оксида цинка (II) 2%

Таблица 102 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид меди (II)/оксид цинка (II) в соотношении 85%/10%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,43	0,07	64,22	2,186	0,076	0,163
24,37	24,5	0,13	57,19	1,947	0,123	
24,39	24,6	0,21	42,19	1,436	0,141	
24,34	24,63	0,29	37,5	1,277	0,167	
24,37	24,71	0,34	34,69	1,181	0,177	
24,35	24,77	0,42	31,41	1,069	0,1915	
24,38	24,87	0,49	25,78	0,877	0,178	
24,37	24,9	0,53	25,31	0,861	0,186	
24,36	24,96	0,6	20,63	0,702	0,167	
24,32	24,98	0,66	21,09	0,718	0,183	
24,36	25,08	0,72	13,59	0,462	0,126	
24,37	25,15	0,78	15	0,510	0,147	

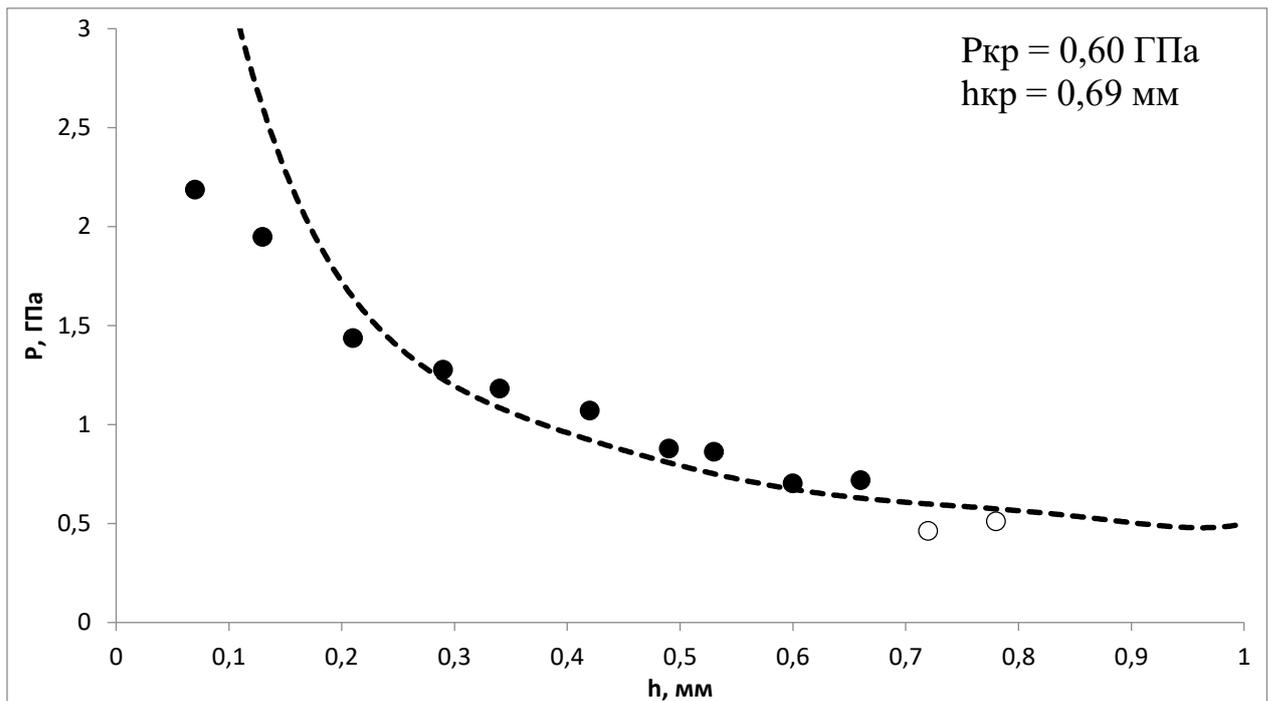


Рисунок 110 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом меди (II) и оксидом цинка (II). Содержание оксида меди (II) в смеси 10%, оксида цинка (II) 5%

Таблица 103 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид титана (IV)/сажа в соотношении 88%/10%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,48	0,12	44,06	1,5265	0,090	0,156
24,37	24,55	0,18	40,78	1,413	0,121	
24,39	24,65	0,26	39,84	1,380	0,164	
24,34	24,68	0,34	30	1,039	0,156	
24,37	24,79	0,42	29,53	1,023	0,183	
24,35	24,82	0,47	26,72	0,925	0,181	
24,38	24,92	0,54	23,91	0,828	0,1815	
24,37	24,97	0,6	21,56	0,747	0,177	
24,36	25,04	0,68	18,28	0,633	0,165	
24,32	25,07	0,75	14,53	0,503	0,141	

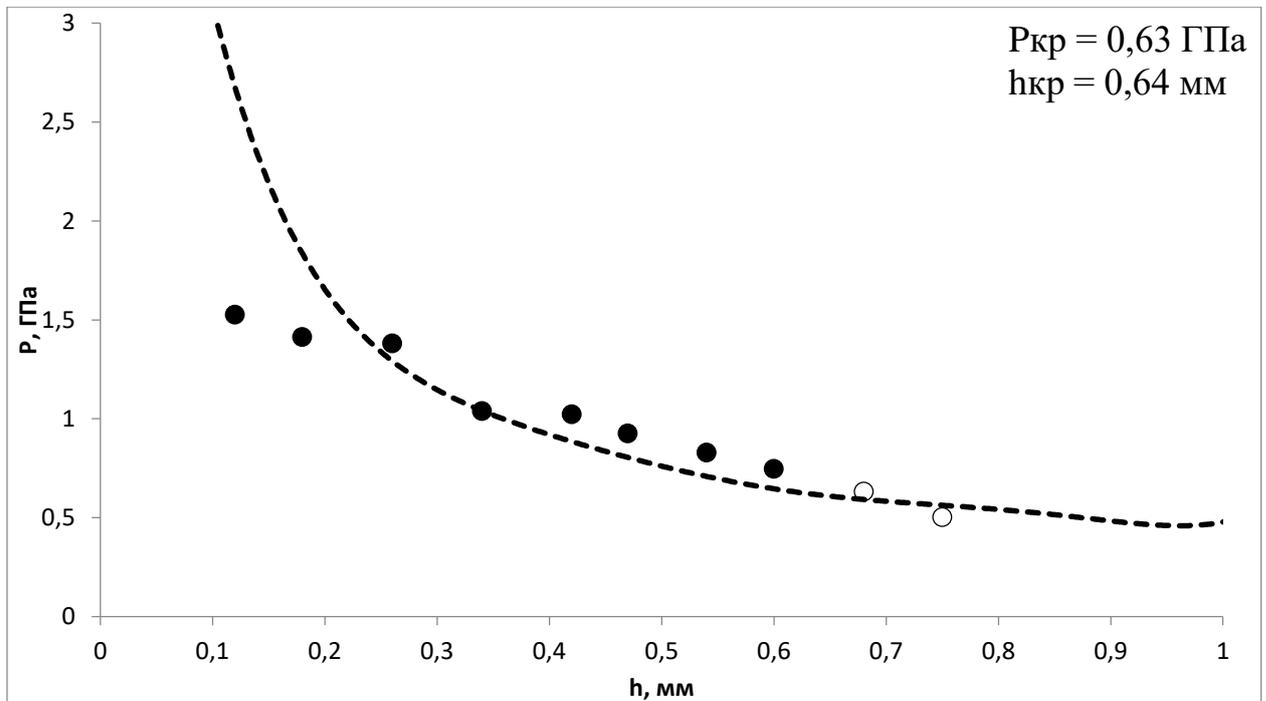


Рисунок 111 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом титана (IV) и сажей. Содержание оксида титана (IV) в смеси 10%, сажи 2%

Таблица 104 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид титана (IV)/сажа в соотношении 85%/10%/5%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,48	0,12	54,38	1,884	0,110	0,150
24,37	24,58	0,21	34,69	1,202	0,118	
24,39	24,66	0,27	29,06	1,006	0,124	
24,34	24,7	0,36	26,25	0,909	0,143	
24,37	24,82	0,45	23,91	0,828	0,157	
24,35	24,85	0,5	27,66	0,958	0,197	
24,38	24,95	0,57	19,69	0,682	0,156	
24,37	25,01	0,64	18,75	0,650	0,162	
24,36	25,08	0,72	17,81	0,617	0,168	
24,32	25,1	0,78	15,47	0,536	0,154	
24,36	25,17	0,81	15,47	0,536	0,159	

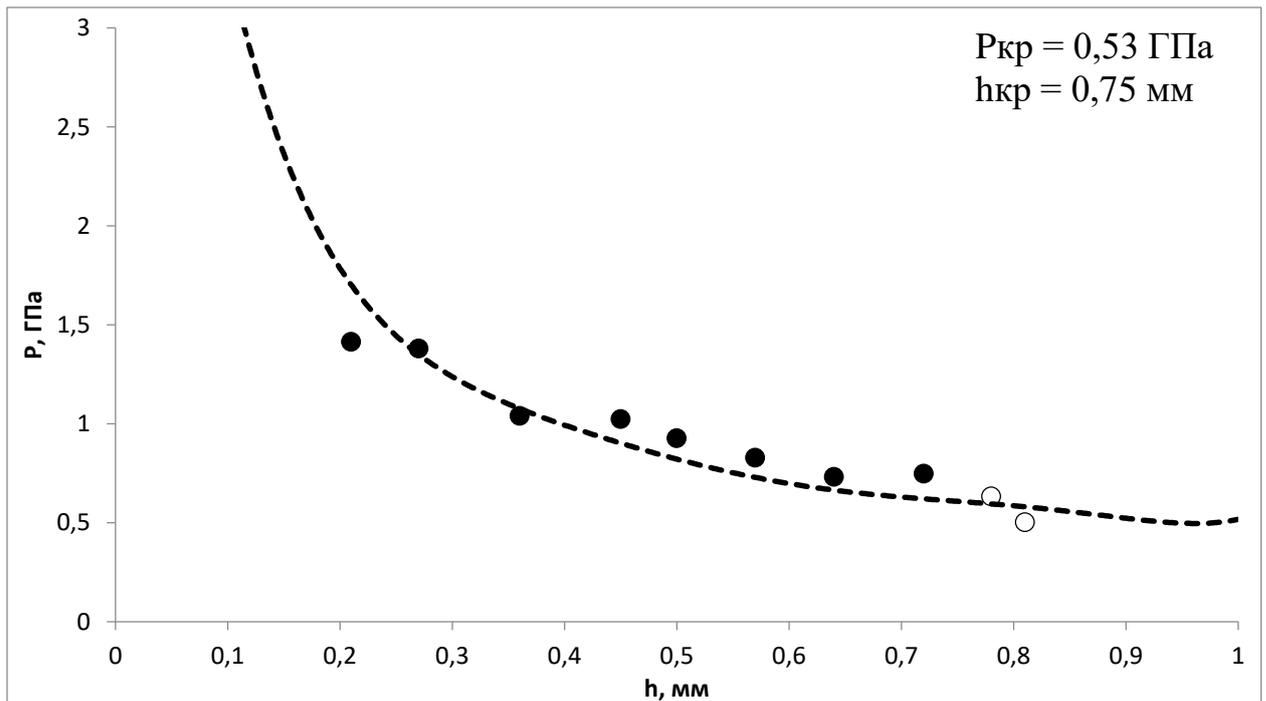


Рисунок 112 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом титана (IV) и сажей. Содержание оксида титана (IV) в смеси 10%, сажи 5%

Таблица 105 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид титана (IV)/ нанотрубки (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в соотношении 88%/10%/2%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
24,36	24,4	0,04	66,56	2,356	0,0480	0,122
24,37	24,47	0,1	45,47	1,610	0,0795	
24,39	24,57	0,18	37,5	1,327	0,113	
24,34	24,57	0,23	37,03	1,311	0,140	
24,37	24,74	0,37	23,91	0,8465	0,136	
24,35	24,75	0,4	23,91	0,846	0,145	
24,38	24,85	0,47	19,22	0,680	0,1335	
24,37	24,88	0,51	18,75	0,6644	0,139	
24,36	24,96	0,6	17,81	0,630	0,150	
24,32	24,97	0,65	14,53	0,514	0,130	

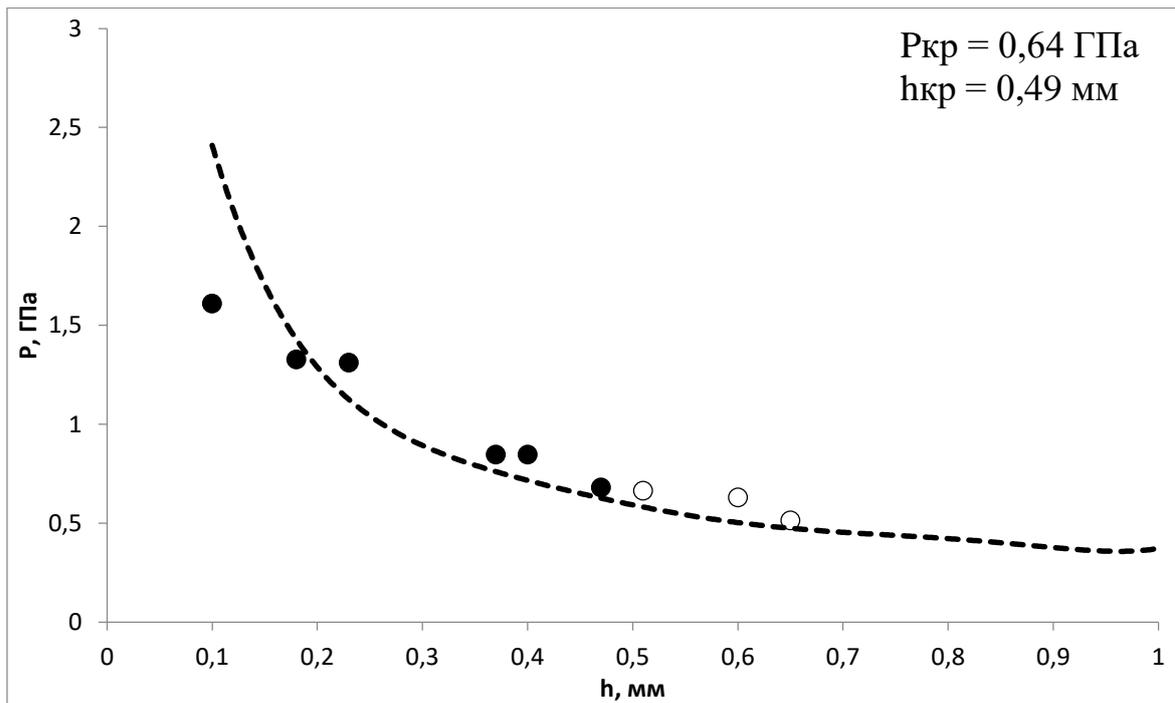


Рисунок 113 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом титана (IV) и нанотрубками (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Содержание оксида титана (IV) в смеси 10%, нанотрубок (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 2%

Таблица 106 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/оксид титана (IV)/ нанотрубки (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в соотношении 85%/10%/5%

h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
24,36	24,4	0,04	52,03	1,713	0,034	0,107
24,37	24,47	0,1	46,88	1,544	0,076	
24,39	24,56	0,17	37,5	1,235	0,100	
24,34	24,58	0,24	31,88	1,050	0,116	
24,37	24,68	0,31	27,66	0,910	0,126	
24,35	24,72	0,37	20,63	0,679	0,1095	
24,38	24,84	0,46	22,5	0,741	0,143	
24,37	24,89	0,52	17,34	0,571	0,121	
24,36	24,95	0,59	15	0,494	0,116	
24,32	24,97	0,65	15	0,494	0,125	
24,36	24,4	0,04	52,03	1,713	0,035	

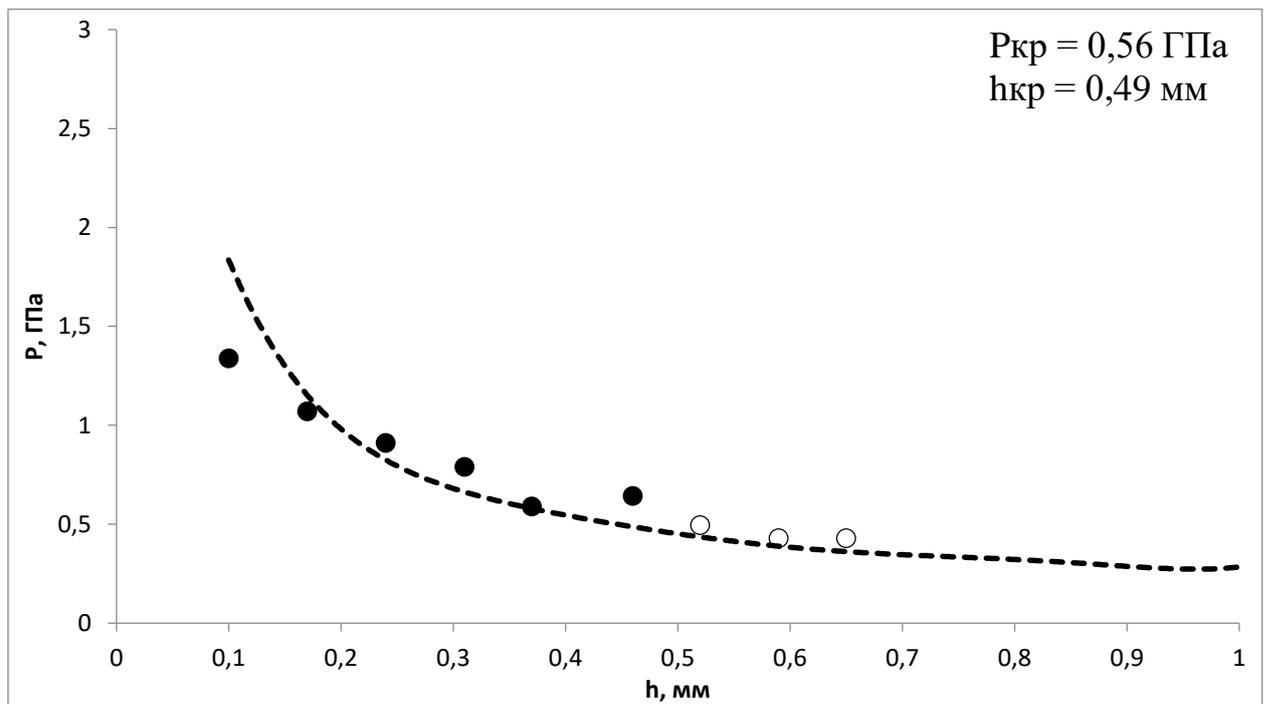


Рисунок 114 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с оксидом титана (IV) и нанотрубками (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Содержание оксида титана (IV) в смеси 10%, нанотрубок (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 5%

Таблица 107 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/нанотрубки (Mn/Ni) в соотношении 99%/1%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,39	0,03	66,09	2,188	0,0335	0,110
24,37	24,47	0,1	44,06	1,458	0,072	
24,39	24,56	0,17	39,84	1,319	0,107	
24,34	24,59	0,25	33,28	1,101	0,126	
24,37	24,7	0,33	23,91	0,791	0,116	
24,35	24,76	0,41	20,16	0,667	0,117	
24,38	24,85	0,47	22,5	0,745	0,146	
24,37	24,92	0,55	14,53	0,481	0,107	
24,36	24,97	0,61	16,41	0,543	0,130	
24,32	24,98	0,66	16,88	0,559	0,142	

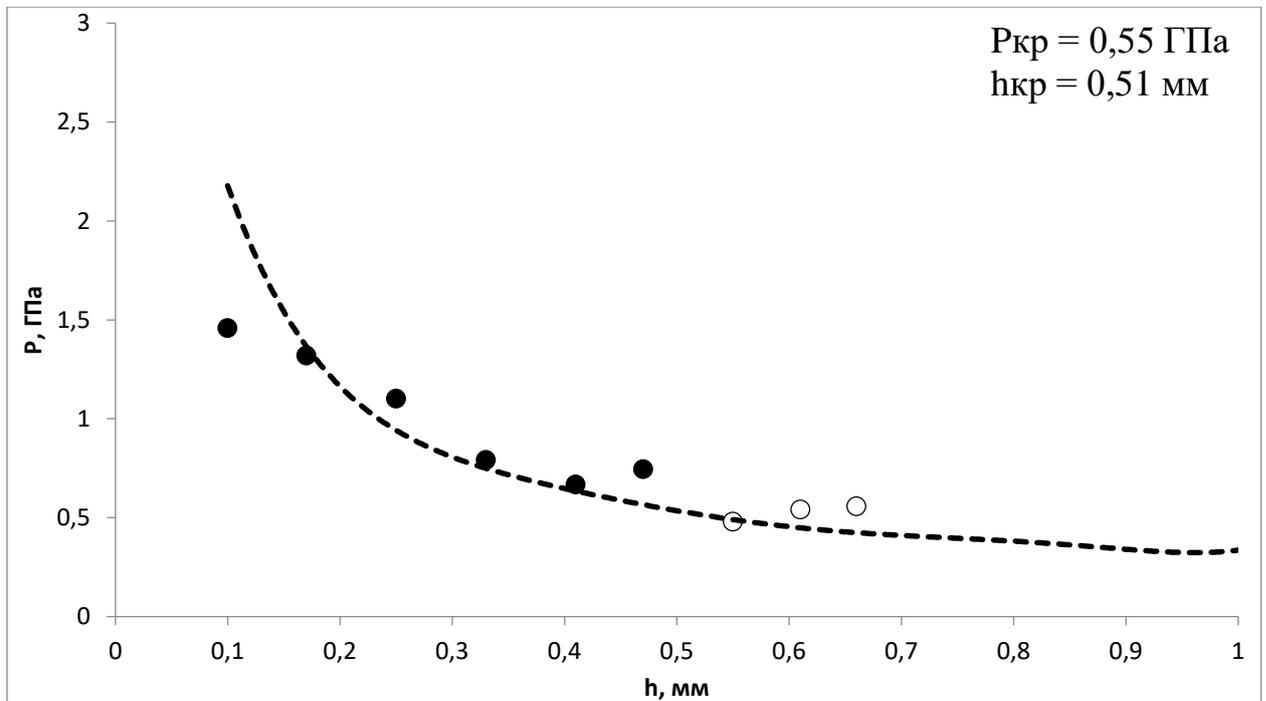


Рисунок 115 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с нанотрубками (Mn/Ni). Содержание нанотрубок (Mn/Ni) в смеси 1%

Таблица 108 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/нанотрубки (Mn/Ni) в соотношении 99%/2%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,36	24,39	0,03	67,03	2,179	0,033	0,097
24,37	24,47	0,1	41,72	1,356	0,067	
24,39	24,56	0,17	36,09	1,173	0,100	
24,34	24,59	0,25	26,72	0,869	0,092	
24,37	24,7	0,33	20,16	0,6555	0,093	
24,35	24,76	0,41	20,16	0,6555	0,112	
24,38	24,85	0,47	14,53	0,472	0,092	
24,37	24,92	0,55	17,81	0,579	0,125	
24,36	24,97	0,61	15	0,488	0,117	
24,32	24,98	0,66	16,41	0,5335	0,136	

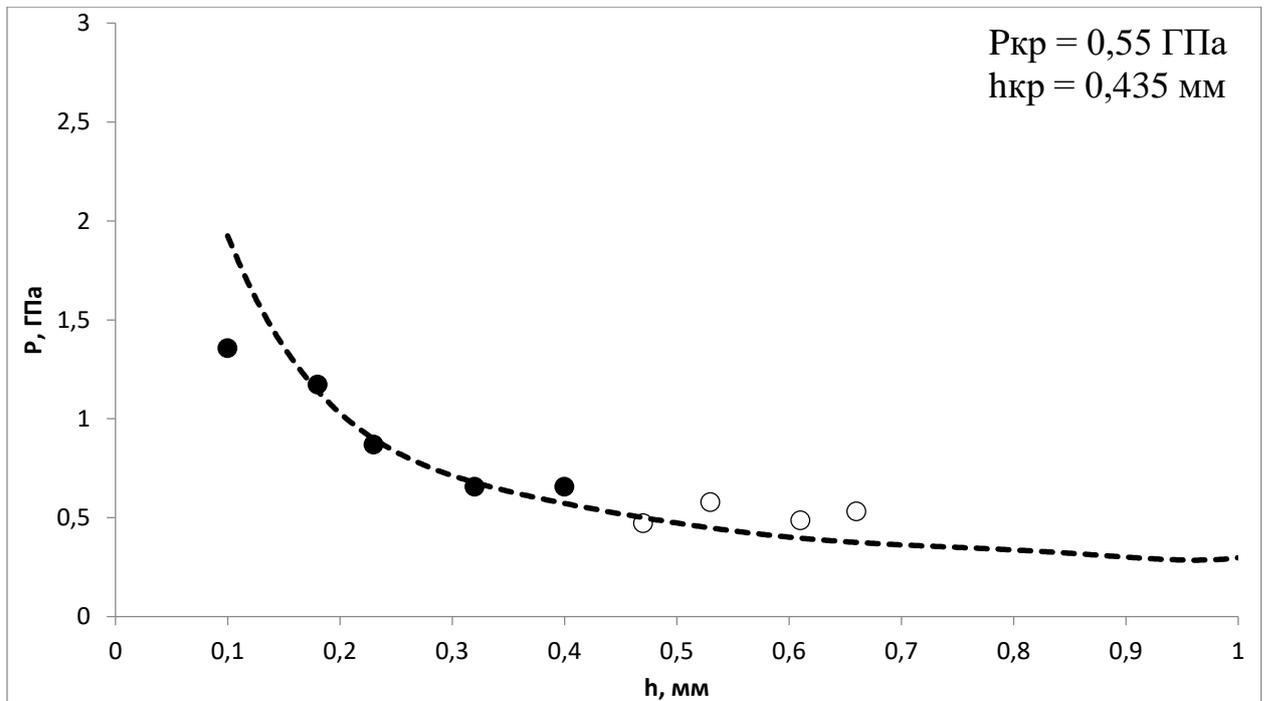


Рисунок 116 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смесей окфол-3,5 с нанотрубками (Mn/Ni). Содержание нанотрубок (Mn/Ni) в смеси 2%;

Приложение 4  
Смесь окфол-3,5/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблица 109 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в соотношении 90%/10%

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
10	24,26	24,35	0,09	48,75	1,534	0,069	0,125
20	24,17	24,35	0,18	47,34	1,490	0,127	
30	24,33	24,55	0,22	46,41	1,460	0,150	
40	24,23	24,55	0,32	14,06	0,442	0,063	
40	24,23	24,5	0,27	22,97	0,723	0,089	
50	24,31	24,7	0,39	28,59	0,900	0,152	
50	24,31	24,75	0,44	17,34	0,546	0,102	
60	24,17	24,6	0,43	10,31	0,324	0,059	
60	24,17	24,6	0,43	23,91	0,752	0,137	
60	24,17	24,61	0,44	14,53	0,457	0,085	
70	24,32	24,85	0,53	17,34	0,546	0,118	
70	24,32	24,85	0,53	19,69	0,620	0,134	
70	24,32	24,85	0,53	11,25	0,354	0,076	
80	24,29	24,9	0,61	27,19	0,856	0,206	
80	24,29	24,86	0,57	17,81	0,560	0,128	
90	24,05	24,65	0,6	27,19	0,856	0,203	
90	24,05	24,7	0,65	20,63	0,649	0,164	
90	24,05	24,64	0,59	29,19	0,919	0,216	
100	24,34	25,05	0,71	16,88	0,531	0,143	
100	24,34	25	0,66	15,47	0,487	0,124	
100	24,34	25,01	0,67	17,34	0,546	0,141	
110	24,26	24,95	0,69	14,06	0,442	0,117	
120	24,17	24,91	0,74	8,91	0,280	0,078	
130	24,33	25,18	0,85	11,72	0,369	0,113	

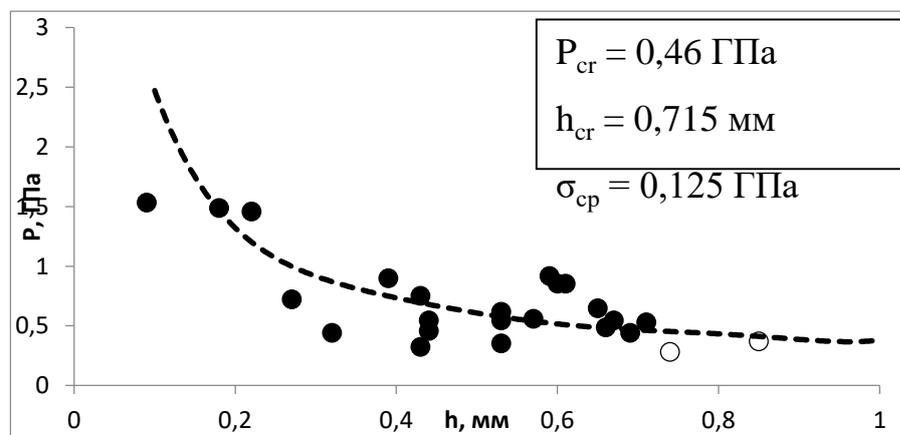


Рисунок 117 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом железа. Содержание оксида железа в смеси 10%

Таблица 110 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в соотношении 80%/20%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P_{\text{эксп}}$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
10	24,21	24,29	0,08	92,81	2,037	0,071	0,143
20	24,2	24,3	0,1	56,72	1,697	0,100	
30	24,29	24,47	0,18	56,25	1,594	0,157	
40	24,16	24,4	0,24	35,63	1,402	0,167	
50	24,21	24,54	0,33	48,28	0,974	0,131	
60	24,11	24,49	0,38	27,19	1,269	0,171	
70	24,2	24,67	0,47	25,78	1,343	0,207	
80	24,22	24,71	0,49	34,69	1,077	0,174	
90	24,01	24,52	0,51	23,44	0,915	0,164	
100	24,28	24,91	0,63	19,22	0,753	0,153	
110	24,21	24,88	0,67	20,16	0,635	0,135	
120	24,2	24,93	0,73	25,78	0,531	0,129	
130	24,29	25,08	0,79	25,78	0,664	0,171	
140	24,16	25,02	0,86	19,22	0,517	0,141	

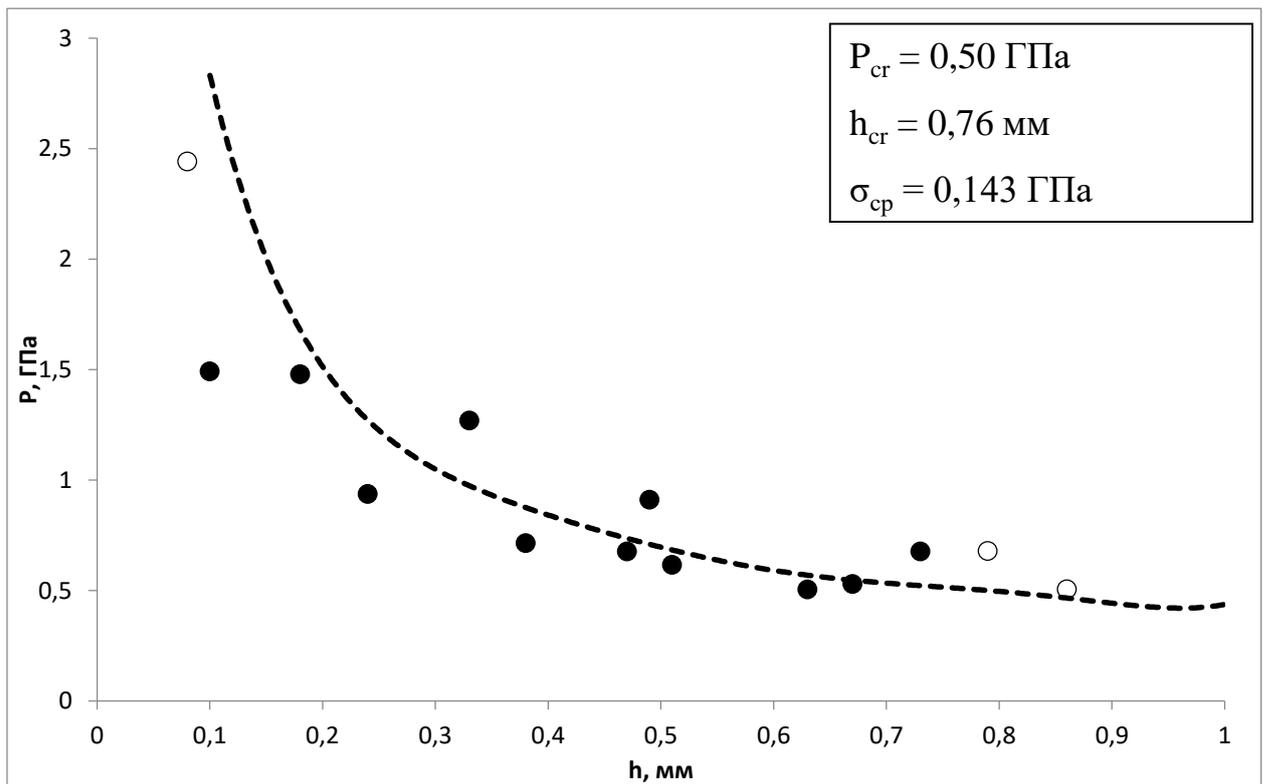


Рисунок 118 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом железа. Содержание оксида железа в смеси 20%

Таблица 111 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в соотношении 70%/30%

мг	h0, мм	hk, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,26	24,3	0,04	83,91	2,049	0,042	0,143
20	24,17	24,28	0,11	49,22	1,202	0,065	
30	24,33	24,47	0,14	69,38	1,694	0,115	
40	24,23	24,42	0,19	52,97	1,322	0,119	
50	24,31	24,58	0,27	44,06	1,100	0,135	
60	24,17	24,51	0,34	42,66	1,065	0,160	
70	24,32	24,75	0,43	31,41	0,784	0,143	
80	24,29	24,79	0,5	24,78	0,619	0,128	
90	24,05	24,56	0,51	38,91	0,971	0,203	
100	24,34	24,9	0,56	30,47	0,761	0,171	
110	24,26	24,88	0,62	25,31	0,632	0,154	
120	24,17	24,89	0,72	28,13	0,702	0,191	
130	24,33	25,09	0,76	19,69	0,491	0,139	
140	24,23	25,05	0,82	18,75	0,468	0,140	
150	24,31	25,19	0,88	20,63	0,515	0,162	
160	24,17	25,13	0,96	17,81	0,445	0,148	
170	24,2	25,2	1	14,06	0,351	0,120	

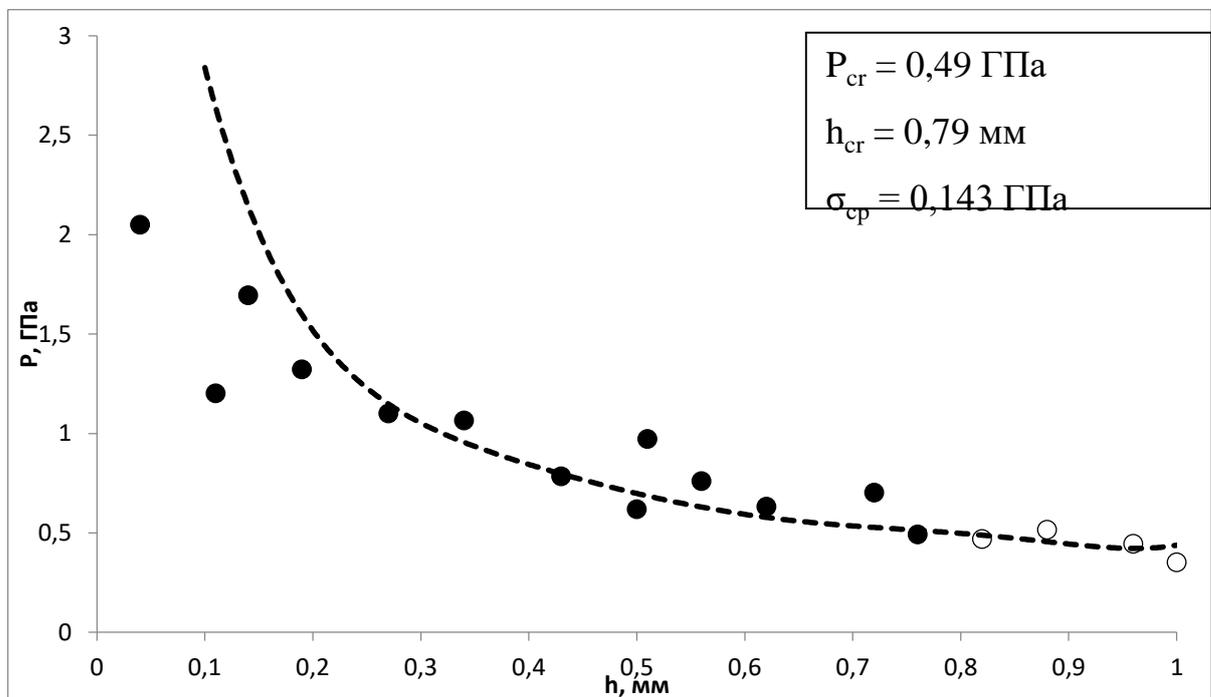


Рисунок 119 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом железа. Содержание оксида железа в смеси 30%

Таблица 112 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в соотношении 60%/40%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P_{\text{эксп}}$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
10	24,21	24,27	0,06	85,78	2,103	0,064	0,188
20	24,3	24,42	0,12	66,09	1,621	0,095	
30	24,29	24,47	0,18	83,91	2,058	0,176	
40	24,16	24,43	0,27	65,16	1,598	0,197	
50	24,21	24,58	0,37	62,34	1,529	0,247	
60	24,11	24,55	0,44	42,66	1,046	0,195	
70	24,2	24,7	0,5	35,16	0,862	0,178	
80	24,22	24,78	0,56	50,16	1,230	0,277	
90	24,01	24,6	0,59	42,19	1,035	0,243	
100	24,28	24,98	0,7	31,41	0,770	0,205	
110	24,21	24,93	0,72	24,84	0,609	0,166	
120	24,3	25,09	0,79	21,56	0,529	0,154	
130	24,29	25,15	0,86	17,81	0,437	0,135	
140	24,16	25,06	0,9	17,81	0,437	0,139	
150	24,21	25,25	1,04	26,25	0,644	0,226	

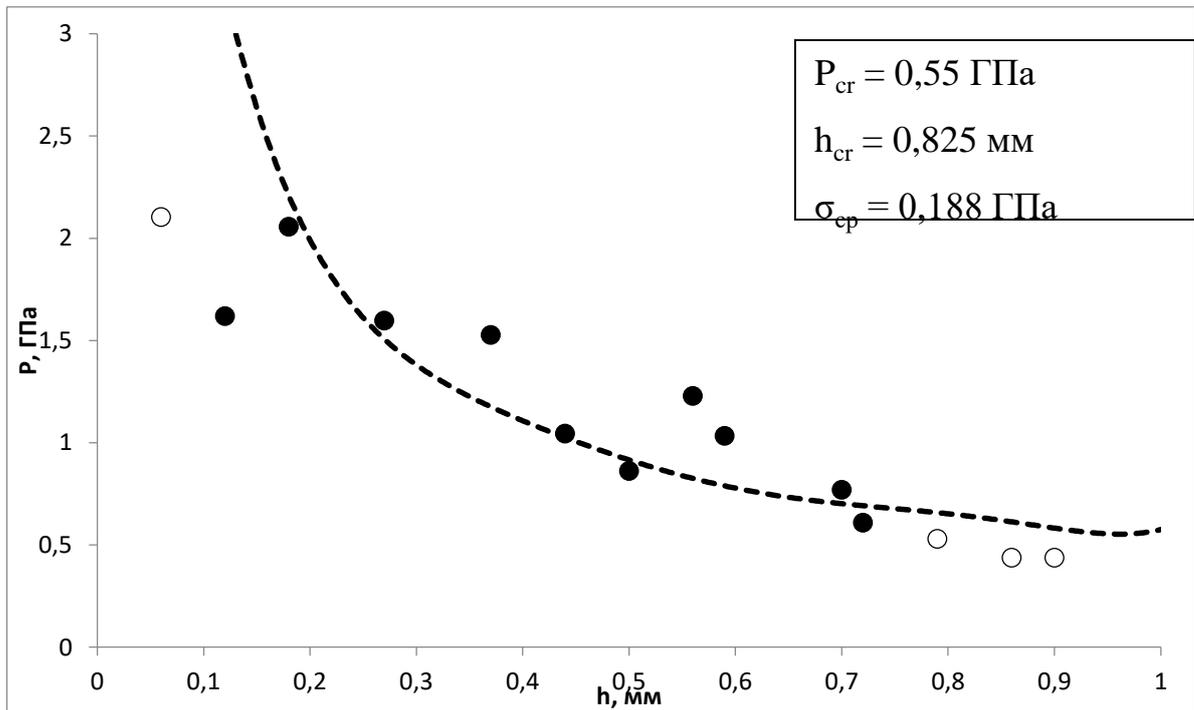


Рисунок 120 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом железа. Содержание оксида железа в смеси 40%

Таблица 113 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в соотношении 50%/50%

мг	h0, мм	hk, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,21	24,27	0,06	85,78	2,256	0,068	0,208
20	24,3	24,41	0,11	82,5	2,170	0,117	
20	24,3	24,4	0,1	80,16	2,108	0,104	
30	24,29	24,46	0,17	74,06	1,948	0,158	
40	24,16	24,43	0,27	67,03	1,763	0,217	
50	24,21	24,54	0,33	57,19	1,504	0,220	
50	24,21	24,55	0,34	57,19	1,504	0,226	
60	24,11	24,53	0,42	60,94	1,603	0,287	
70	24,2	24,67	0,47	36,09	0,949	0,186	
80	24,22	24,75	0,53	34,22	0,900	0,194	
90	24,01	24,57	0,56	33,75	0,888	0,200	
100	24,28	24,91	0,63	29,06	0,764	0,188	
110	24,21	24,87	0,66	37,97	0,999	0,255	
120	24,3	25,01	0,71	29,06	0,764	0,206	
130	24,29	25,05	0,76	31,41	0,826	0,234	
130	24,29	25,03	0,74	34,22	0,900	0,250	
140	24,3	25,05	0,75	23,44	0,616	0,173	
150	24,21	25,11	0,9	30	0,789	0,251	
160	24,11	25,09	0,98	27,19	0,715	0,241	
170	24,2	25,25	1,05	26,25	0,690	0,244	
180	24,22	25,32	1,1	18,28	0,481	0,175	
190	24,01	25,15	1,14	24,84	0,653	0,243	
200	24,28	25,47	1,19	22,97	0,604	0,231	
210	24,21	25,45	1,24	18,28	0,481	0,188	

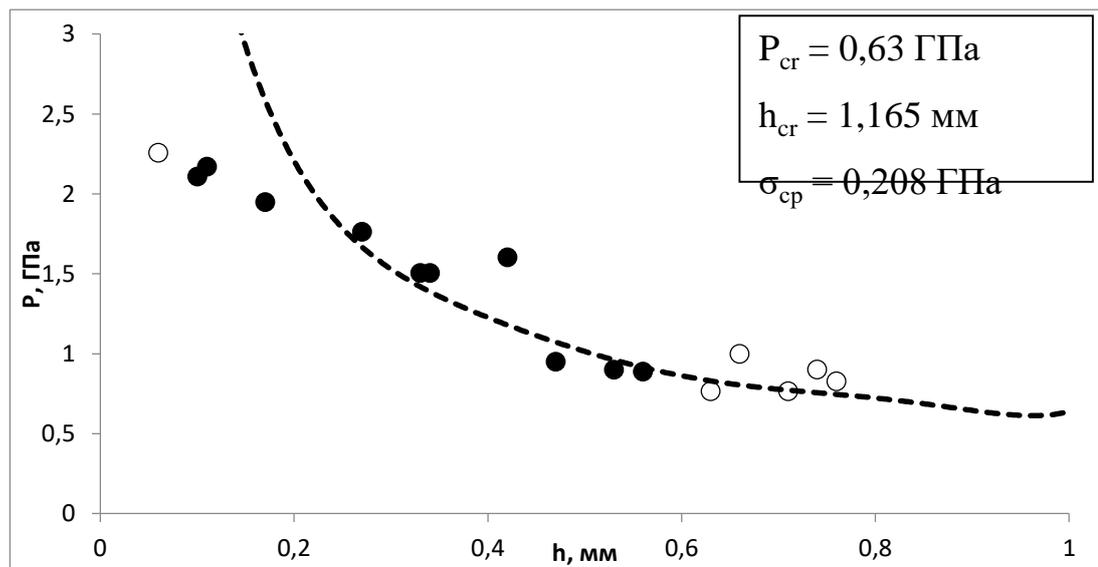


Рисунок 121 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом железа. Содержание оксида железа в смеси 50%

Смесь окфол- $\text{TiO}_2$ Таблица 114 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{TiO}_2$  в соотношении 90%/10%

мг	h0, мм	hk, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,3	24,4	0,1	42,66	1,404	0,069	0,108
20	24,24	24,35	0,11	52,97	1,852	0,100	
30	24,33	24,55	0,22	31,41	1,034	0,106	
40	24,23	24,5	0,27	37,03	1,219	0,150	
50	24,36	24,7	0,34	14,06	0,463	0,069	
50	24,36	24,65	0,29	27,19	0,950	0,124	
50	24,36	24,65	0,29	14,06	0,491	0,064	
60	24,17	24,6	0,43	11,25	0,393	0,072	
70	24,31	24,8	0,49	22,03	0,770	0,156	
80	24,35	24,9	0,55	11,25	0,393	0,087	
90	24,05	24,65	0,6	16,41	0,574	0,136	
90	24,05	24,65	0,6	16,41	0,574	0,136	
100	24,35	25	0,65	15	0,524	0,132	

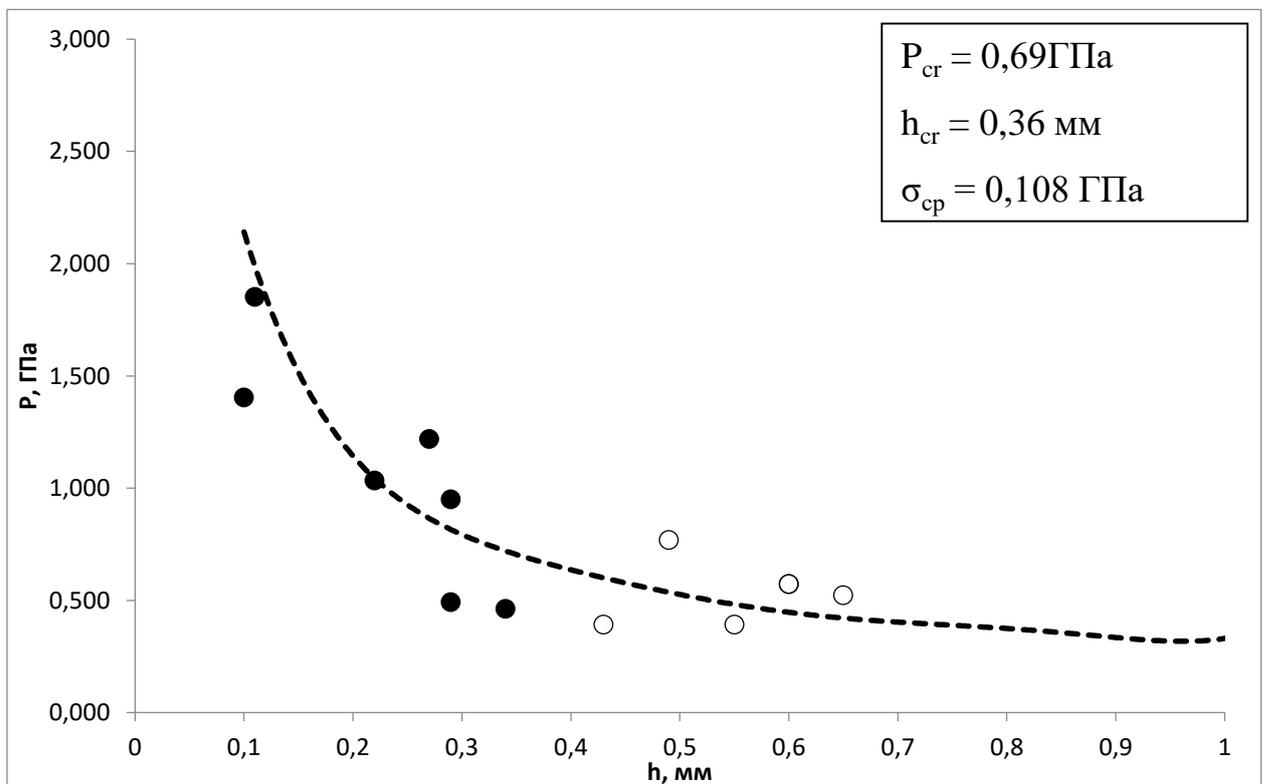


Рисунок 122 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфола-3,5 с оксидом титана. Содержание оксида титана в смеси 10%

Таблица 115 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{TiO}_2$  в соотношении 80%/20%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,26	24,29	0,03	90,47	2,422	0,037	0,140
20	24,17	24,3	0,13	81,56	2,184	0,138	
30	24,33	24,5	0,17	48,28	1,293	0,105	
40	24,23	24,45	0,22	39,38	1,054	0,108	
50	24,31	24,57	0,26	39,38	1,054	0,125	
60	24,17	24,52	0,35	39,38	1,054	0,162	
70	24,32	24,71	0,39	31,88	0,854	0,144	
80	24,29	24,75	0,46	24,38	0,653	0,126	
90	24,05	24,57	0,52	30,47	0,816	0,174	
100	24,34	24,92	0,58	28,59	0,766	0,177	

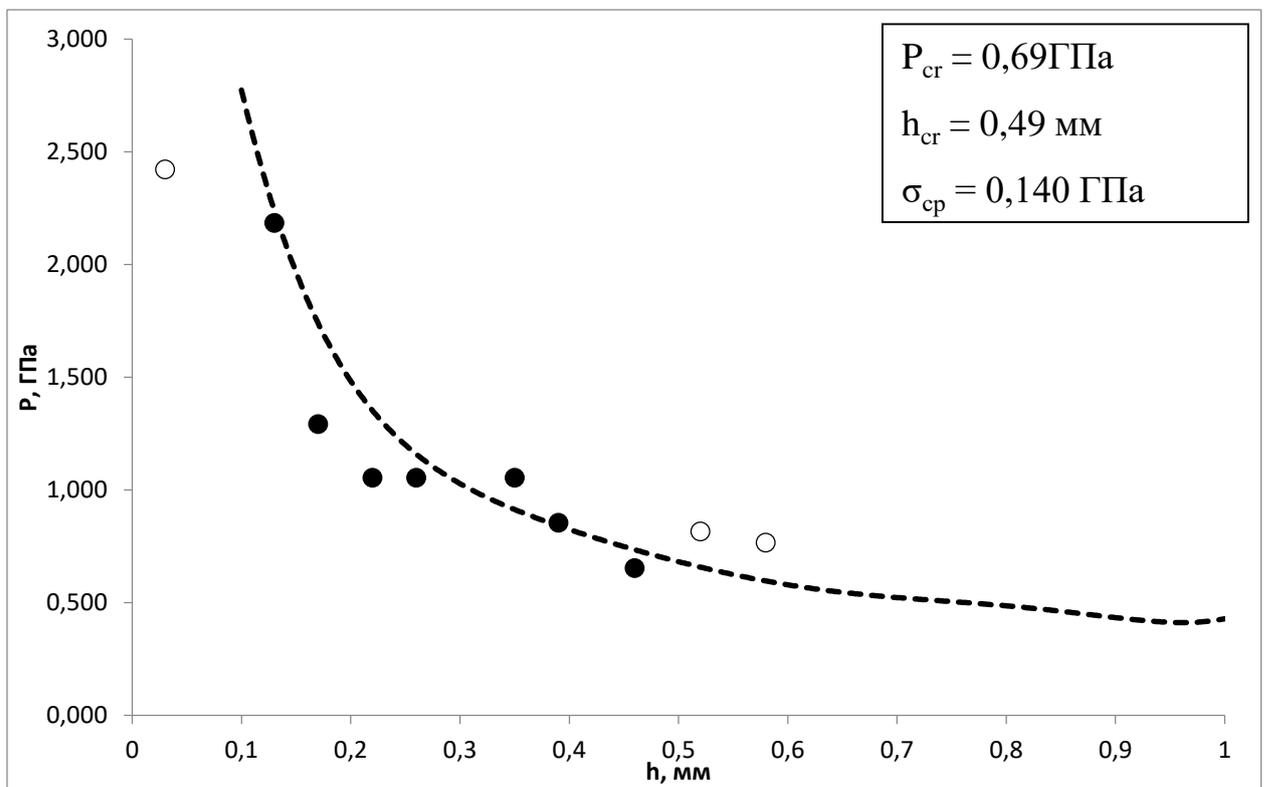


Рисунок 123 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом титана. Содержание оксида титана в смеси 20%

Таблица 116 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{TiO}_2$  в соотношении 70%/30%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P_{\text{эксп}}$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
10	24,21	24,26	0,05	84,84	2,141	0,054	0,140
20	24,28	24,37	0,09	76,41	1,928	0,086	
30	24,28	24,45	0,17	70,78	1,786	0,145	
40	24,31	24,55	0,24	55,31	1,396	0,155	
50	24,16	24,43	0,27	45,94	1,159	0,143	
60	24,17	24,54	0,37	22,5	0,568	0,092	
70	24,23	24,66	0,43	24,84	0,627	0,114	
80	24,26	24,78	0,52	24,84	0,627	0,133	
90	24,03	24,59	0,56	30	0,757	0,171	
100	24,31	24,97	0,66	21,09	0,532	0,136	
110	24,21	24,9	0,69	28,13	0,710	0,187	
120	24,28	25,04	0,76	24,84	0,627	0,177	
130	24,28	25,12	0,84	17,81	0,449	0,137	

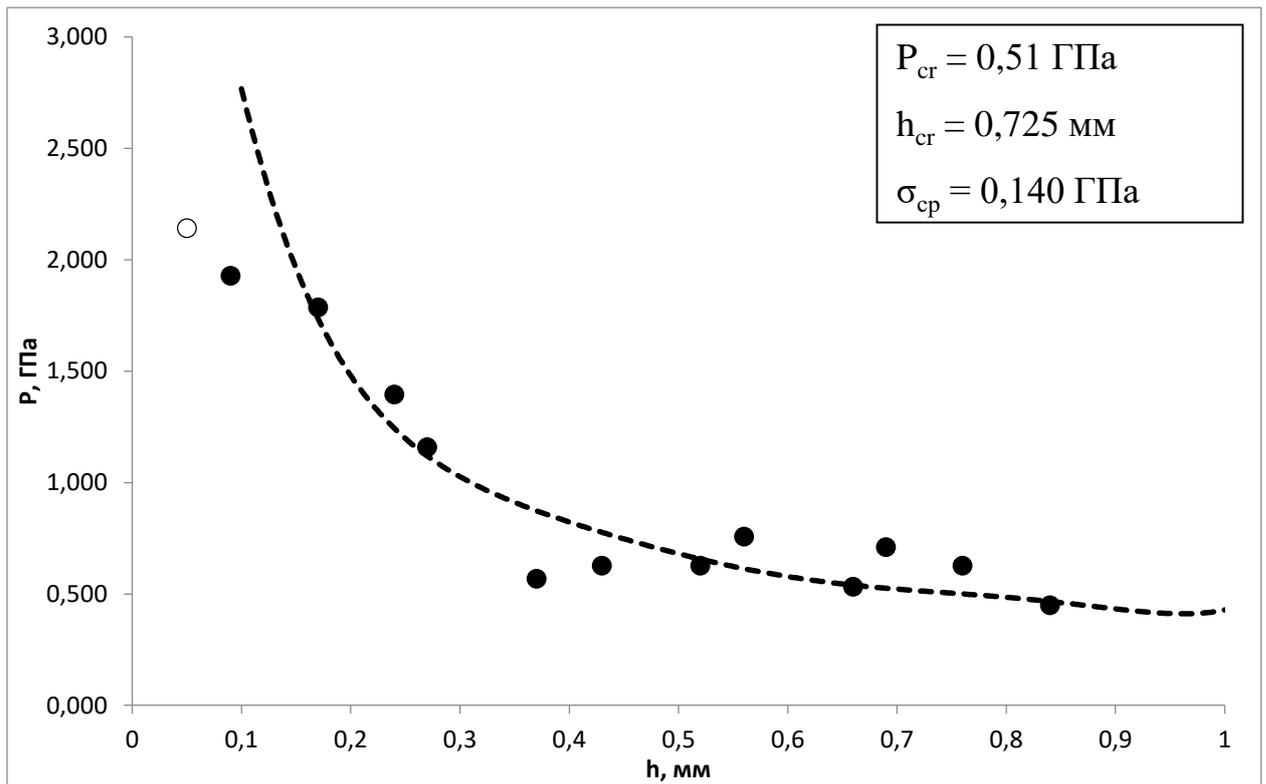


Рисунок 124 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом титана. Содержание оксида титана в смеси 30%

Таблица 117 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{TiO}_2$  в соотношении 60%/40%

мг	h0, мм	hk, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,21	24,26	0,05	88,59	2,463	0,062	0,193
20	24,28	24,38	0,1	86,25	2,397	0,118	
30	24,28	24,44	0,16	81,09	2,254	0,173	
40	24,31	24,55	0,24	52,03	1,446	0,160	
50	24,16	24,42	0,26	57,19	1,590	0,189	
60	24,17	24,52	0,35	31,88	0,886	0,136	
70	24,23	24,69	0,46	36,09	1,003	0,194	
70	24,23	24,67	0,44	26,72	0,743	0,138	
80	24,26	24,74	0,48	37,03	1,029	0,205	
80	24,26	24,79	0,53	38,44	1,069	0,231	
90	24,03	24,56	0,53	38,44	1,069	0,231	
100	24,31	24,94	0,63	30	0,834	0,206	
100	24,31	24,96	0,65	35,16	0,977	0,247	
110	24,21	24,89	0,68	29,53	0,821	0,214	
120	24,28	25,02	0,74	21,56	0,599	0,166	
130	24,31	25,14	0,83	21,56	0,599	0,181	
140	24,31	25,19	0,88	24,84	0,690	0,217	
150	24,16	25,1	0,94	23,44	0,652	0,214	
160	24,17	25,16	0,99	25,78	0,717	0,243	
170	24,23	25,31	1,08	20,16	0,560	0,201	
180	24,26	25,41	1,15	17,81	0,495	0,185	
190	24,03	25,2	1,17	19,69	0,547	0,207	

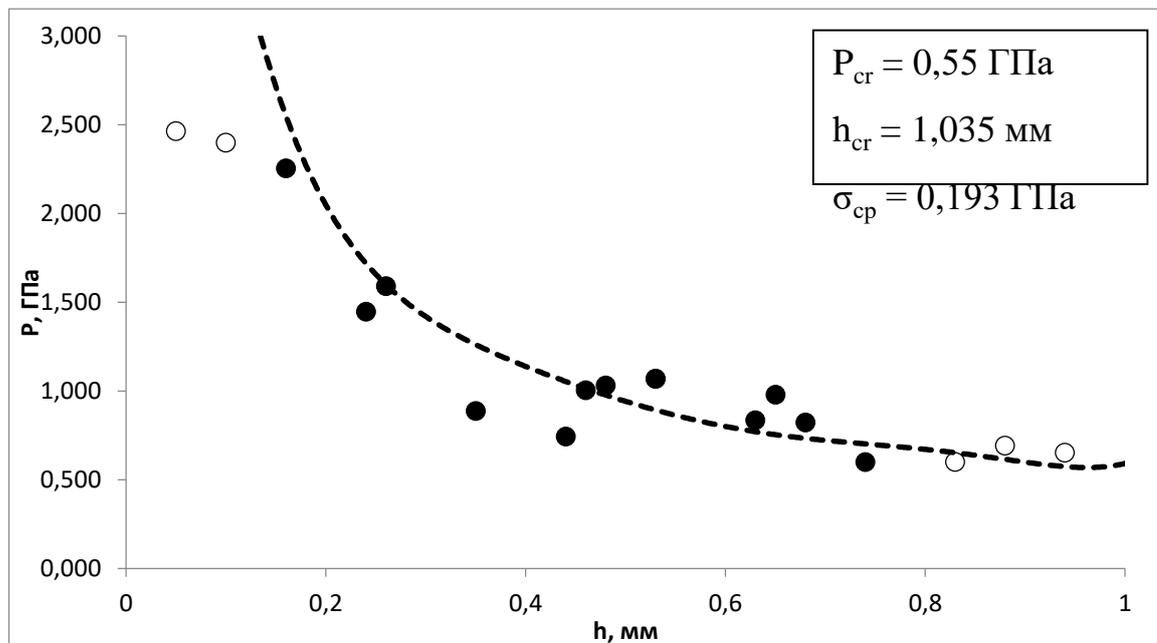


Рисунок 125 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом титана. Содержание оксида титана в смеси 40%

Таблица 118 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{TiO}_2$  в соотношении 50%/50%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
10	24,21	24,25	0,04	85,78	2,018	0,041	0,176
20	24,28	24,36	0,08	85,31	2,007	0,080	
30	24,28	24,44	0,16	67,97	1,599	0,123	
40	24,31	24,53	0,22	70,78	1,665	0,171	
50	24,16	24,45	0,29	59,06	1,390	0,182	
60	24,17	24,54	0,37	43,13	1,015	0,164	
70	24,23	24,64	0,41	58,59	1,379	0,242	
80	24,26	24,74	0,48	52,5	1,235	0,247	
90	24,03	24,52	0,49	41,25	0,971	0,197	
100	24,31	24,94	0,63	28,13	0,662	0,163	
100	24,31	24,95	0,64	10,78	0,254	0,063	
110	24,21	24,89	0,68	17,81	0,419	0,109	
120	24,28	25	0,72	31,88	0,750	0,204	
130	24,28	25,07	0,79	36,09	0,849	0,247	
140	24,31	25,17	0,86	23,91	0,563	0,174	
150	24,16	25,04	0,88	28,59	0,673	0,211	
160	24,17	25,09	0,92	26,25	0,618	0,200	
170	24,23	25,24	1,01	22,5	0,529	0,182	
180	24,26	25,35	1,09	20,16	0,474	0,172	
190	24,03	25,16	1,13	15,94	0,375	0,139	
200	24,31	25,53	1,22	16,88	0,397	0,154	

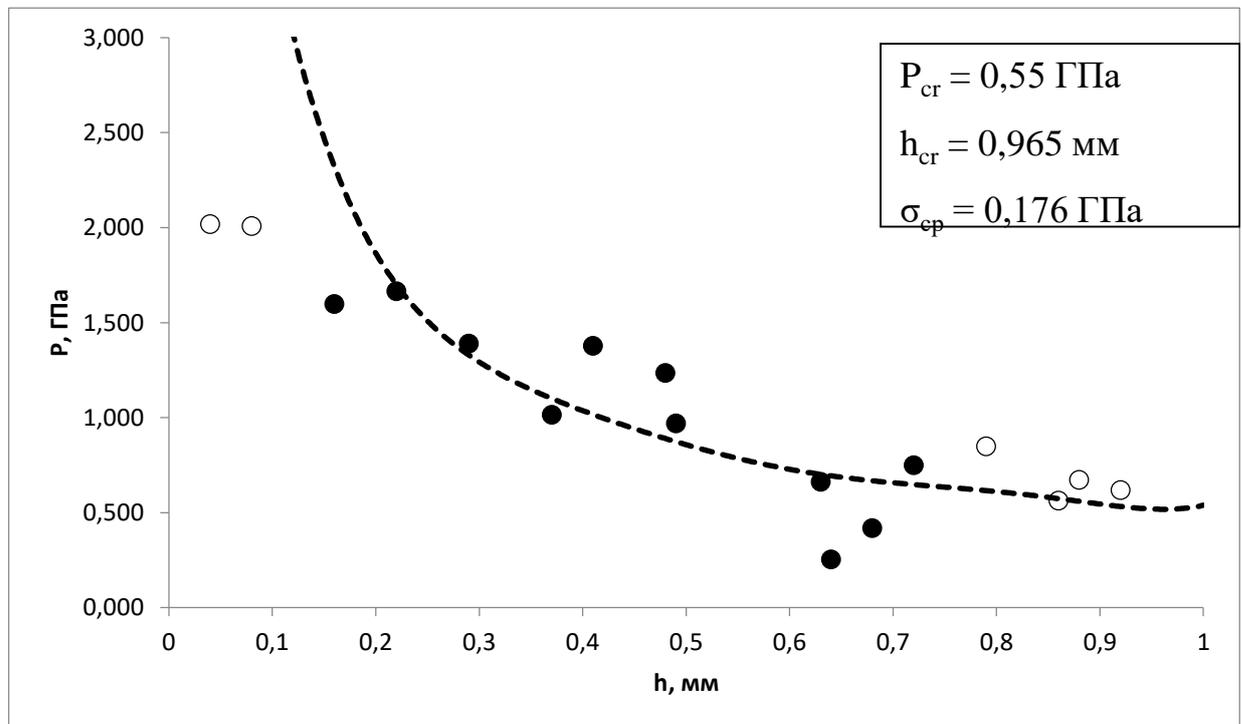


Рисунок 126 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом титана. Содержание оксида титана в смеси 50%

Таблица 119 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $\text{TiO}_2$  в соотношении 40%/60%

мг	$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,21	24,26	0,05	89,53	2,248	0,057	0,234
20	24,28	24,39	0,11	85,78	2,153	0,116	
30	24,28	24,44	0,16	86,72	2,177	0,167	
40	24,31	24,54	0,23	79,69	2,001	0,214	
50	24,16	24,49	0,33	67,97	1,706	0,250	
60	24,17	24,51	0,34	65,63	1,648	0,247	
70	24,23	24,65	0,42	51,56	1,294	0,232	
80	24,26	24,75	0,49	54,38	1,365	0,277	
90	24,03	24,54	0,51	37,5	0,941	0,197	
100	24,39	25,01	0,62	38,44	0,965	0,235	
110	24,21	24,86	0,65	39,38	0,989	0,250	
120	24,28	25	0,72	35,16	0,883	0,240	
130	24,28	25,05	0,77	37,5	0,941	0,269	
140	24,31	25,2	0,89	32,81	0,824	0,260	
150	24,16	25,06	0,9	30,94	0,777	0,247	
160	24,17	25,11	0,94	26,25	0,659	0,216	
170	24,23	25,21	0,98	26,25	0,659	0,222	
180	24,26	25,35	1,09	17,81	0,447	0,162	
190	24,03	25,18	1,15	25,84	0,649	0,243	
200	24,39	25,6	1,21	22,5	0,565	0,218	

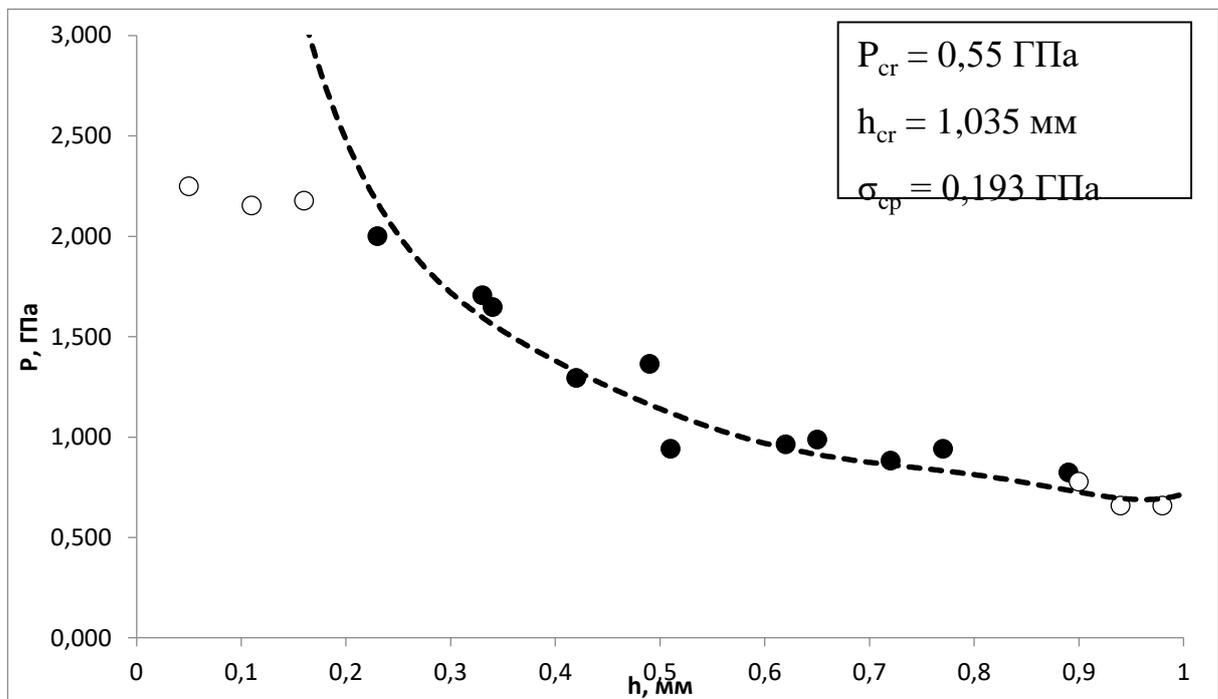


Рисунок 127 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом титана. Содержание оксида титана в смеси 60%

Смесь октоген- $V_2O_5$ Таблица 120 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/  $V_2O_5$  в соотношении 90%/10%

мг	h0, мм	hk, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,19	24,25	0,06	58,59	2,048	0,062	0,110
20	24,24	24,4	0,16	20,63	0,650	0,050	
30	24,33	24,6	0,27	26,72	0,841	0,104	
40	24,23	24,55	0,32	39,38	1,240	0,177	
50	24,36	24,65	0,29	13,13	0,413	0,054	
60	24,17	24,6	0,43	15,94	0,502	0,092	
70	24,31	24,8	0,49	22,5	0,708	0,144	
80	24,35	24,9	0,55	17,81	0,561	0,125	
90	24,05	24,65	0,6	21,56	0,679	0,161	
100	24,35	25,05	0,7	15,47	0,487	0,130	

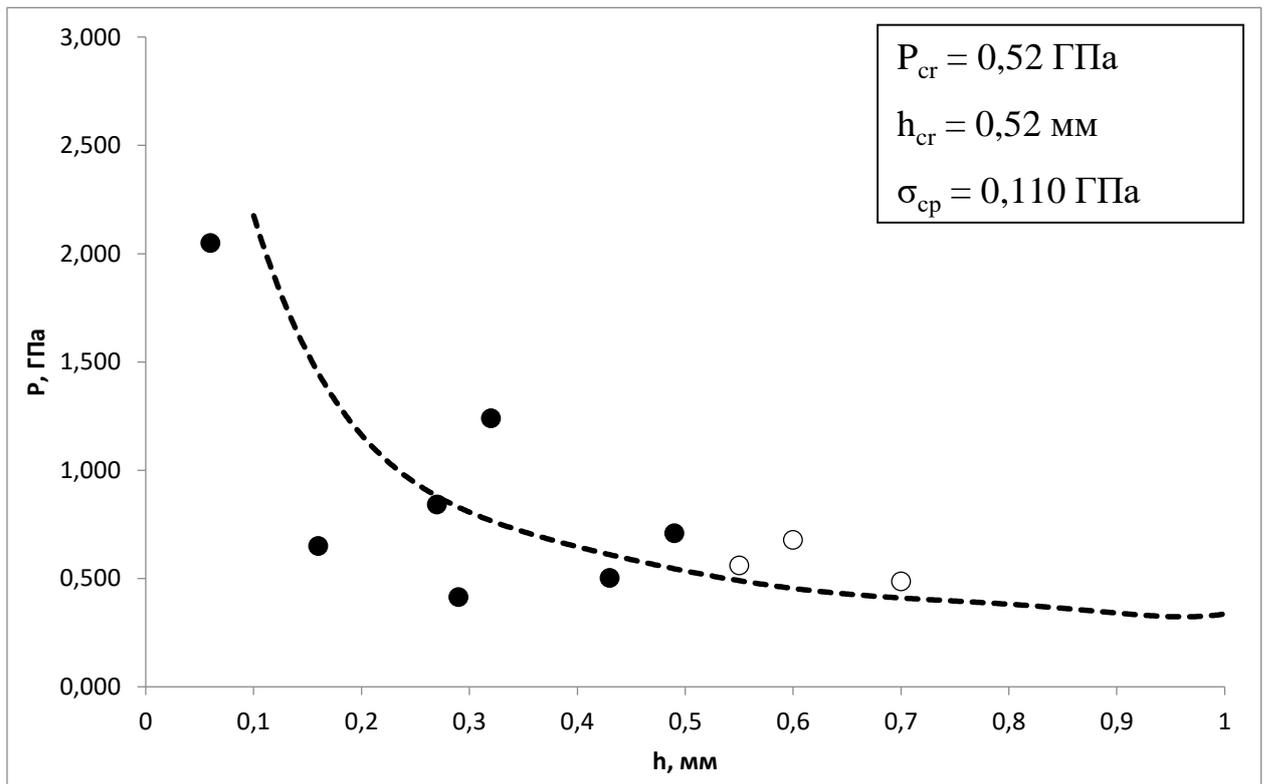


Рисунок 128 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом ванадия. Содержание оксида ванадия в смеси 10%

Таблица 121 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/ $V_2O_5$  в соотношении 80%/20%

h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P <sub>эксп</sub> , ГПа	σ, ГПа	σ <sub>ср</sub> , ГПа
24,3	0,04	63,75	2,048	0,042	0,100
24,27	0,1	36,56	1,276	0,063	
24,5	0,17	27,66	0,966	0,078	
24,45	0,22	26,72	0,933	0,096	
24,6	0,29	14,53	0,507	0,066	
24,53	0,36	17,81	0,622	0,098	
24,75	0,43	24,84	0,653	0,119	
24,79	0,5	25,31	0,666	0,137	
24,6	0,55	22,97	0,604	0,134	
24,96	0,62	9,38	0,247	0,060	
24,95	0,61	22,97	0,604	0,145	

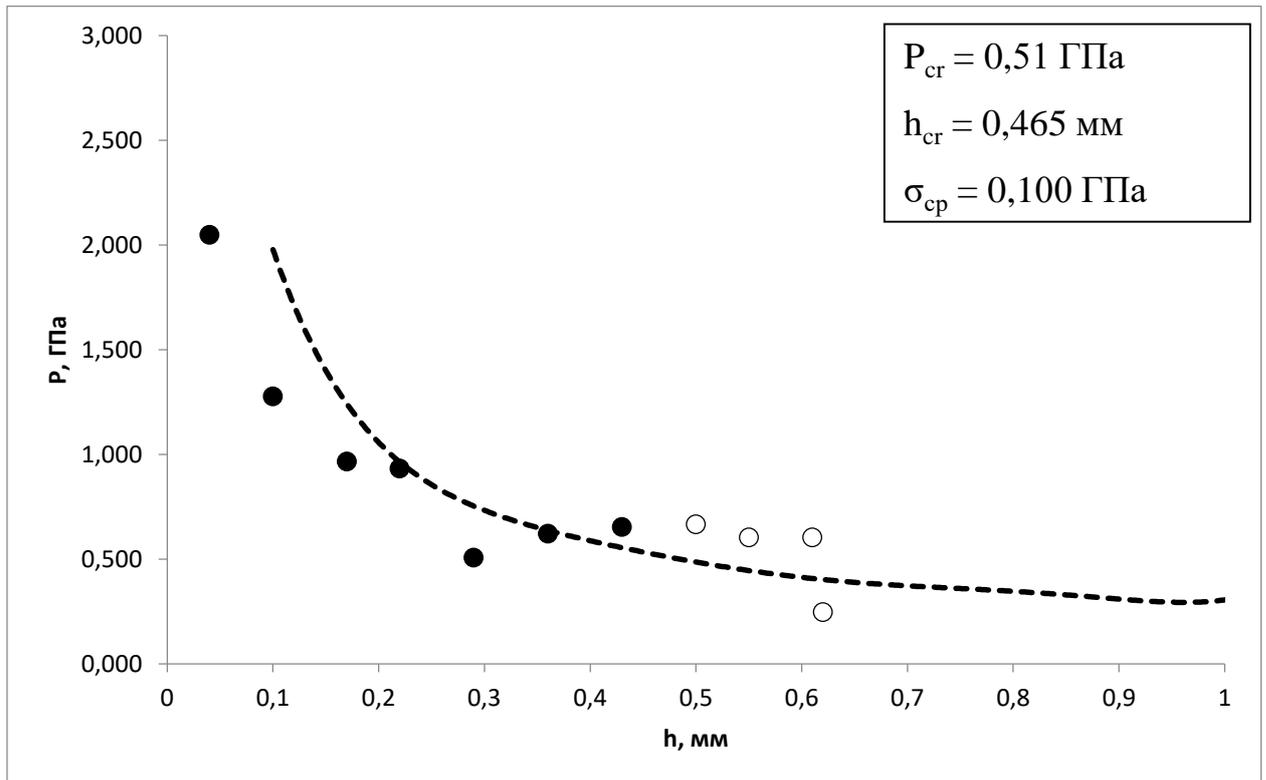


Рисунок 129 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом ванадия. Содержание оксида ванадия в смеси 20%

Таблица 122 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/  $V_2O_5$  в соотношении 70%/30%

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
10	24,21	24,25	0,04	84,84	2,140	0,044	0,160
20	24,28	24,39	0,11	66,09	1,667	0,090	
30	24,28	24,44	0,16	65,16	1,644	0,126	
40	24,31	24,55	0,24	52,5	1,324	0,147	
50	24,16	24,45	0,29	50,16	1,265	0,166	
60	24,17	24,55	0,38	37,03	0,934	0,154	
70	24,23	24,66	0,43	24,84	0,627	0,114	
80	24,26	24,74	0,48	34,22	0,863	0,172	
90	24,03	24,59	0,56	34,69	0,875	0,197	
100	24,31	24,95	0,64	28,59	0,721	0,180	
110	24,21	24,89	0,68	33,28	0,840	0,219	
120	24,28	25,01	0,73	30	0,757	0,208	
130	24,28	25,09	0,81	19,69	0,497	0,147	

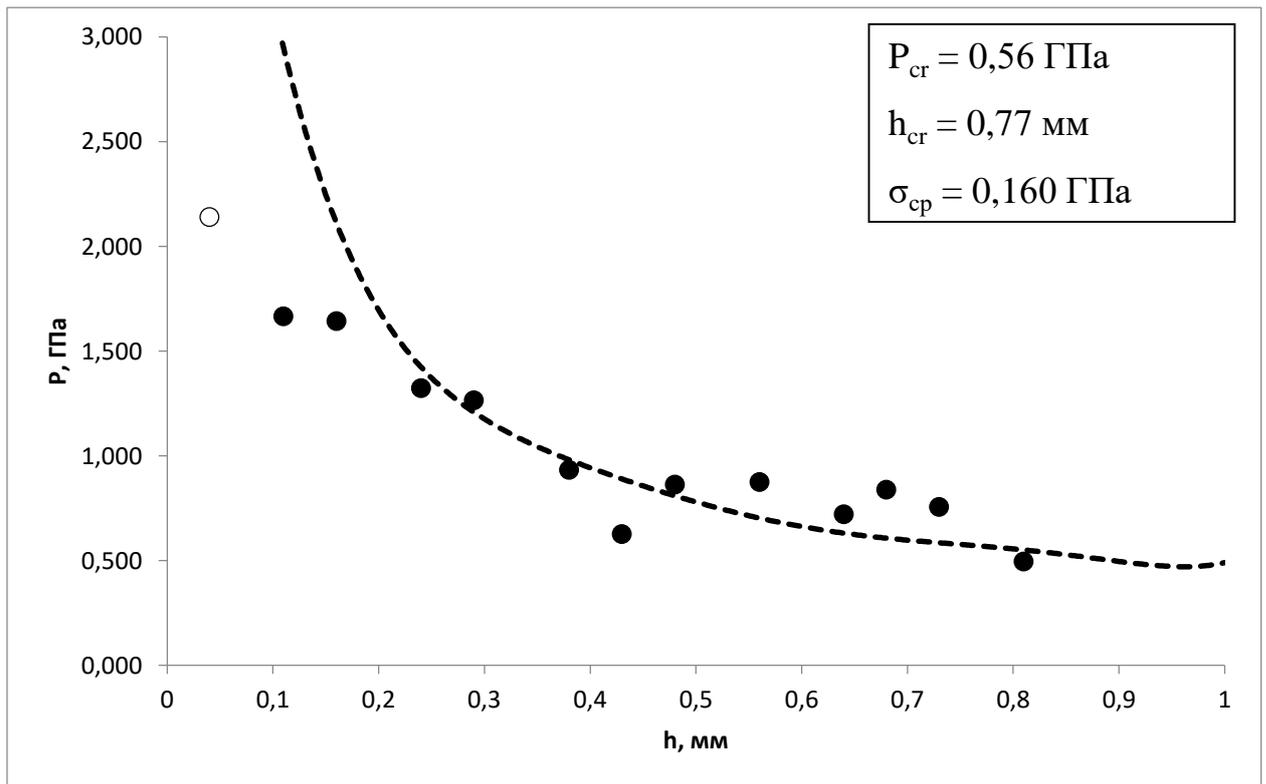


Рисунок 130 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом ванадия. Содержание оксида ванадия в смеси 30%

Таблица 123 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/  $V_2O_5$  в соотношении 60%/40%

мг	h0, мм	hk, мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
10	24,21	24,26	0,05	88,13	2,186	0,055	0,150
20	24,28	24,37	0,09	85,31	2,116	0,095	
30	24,28	24,44	0,16	54,84	1,360	0,104	
40	24,31	24,54	0,23	36,56	0,907	0,097	
50	24,16	24,47	0,31	39,84	0,988	0,137	
60	24,17	24,5	0,33	34,22	0,849	0,124	
70	24,23	24,66	0,43	44,06	1,093	0,200	
80	24,26	24,77	0,51	38,91	0,965	0,202	
90	24,03	24,58	0,55	30	0,744	0,165	
100	24,31	24,94	0,63	21,09	0,523	0,129	
110	24,21	24,89	0,68	29,06	0,721	0,188	
120	24,28	25,03	0,75	19,22	0,477	0,134	
120	24,28	25,03	0,75	20,16	0,500	0,140	
130	24,28	25,07	0,79	23,91	0,593	0,173	
140	24,31	25,15	0,84	22,5	0,558	0,170	
150	24,16	25,1	0,94	22,5	0,558	0,183	
160	24,17	25,18	1,01	16,41	0,407	0,140	
170	24,23	25,26	1,03	14,06	0,349	0,122	

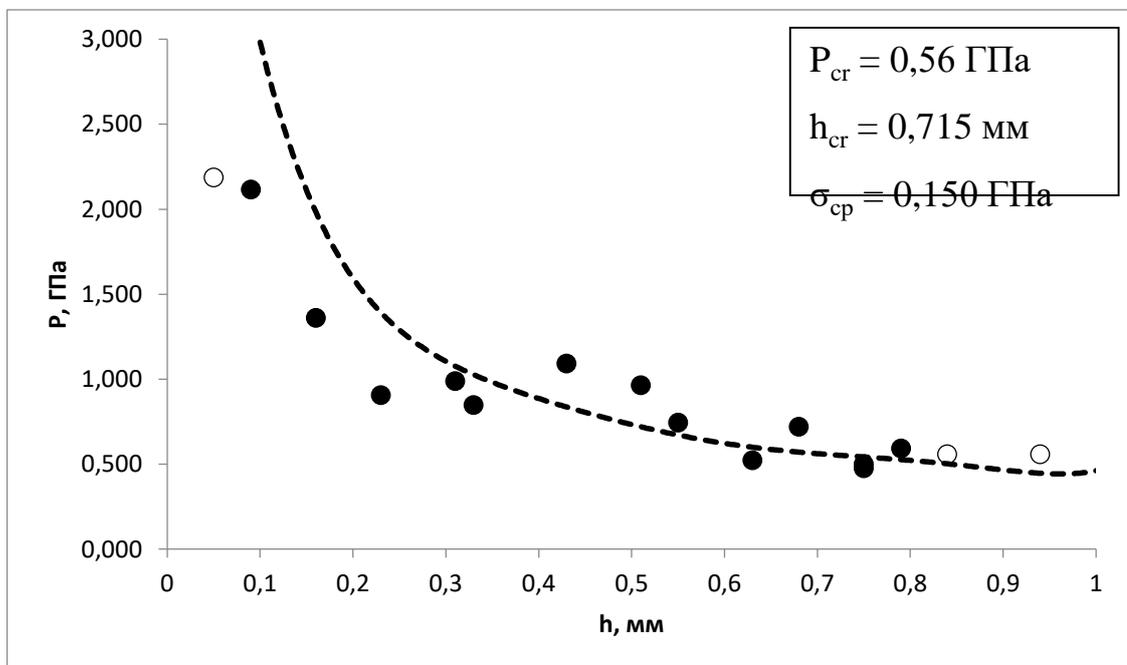


Рисунок 131 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом ванадия. Содержание оксида ванадия в смеси 40%

Таблица 124 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/  $V_2O_5$  в соотношении 50%/50%

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, мВ	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
10	24,21	24,25	0,04	85,31	1,950	0,040	0,180
20	24,28	24,36	0,08	85,78	1,961	0,078	
30	24,28	24,45	0,17	82,97	1,897	0,154	
40	24,31	24,55	0,24	57,19	1,307	0,145	
50	24,16	24,45	0,29	61,41	1,404	0,184	
60	24,17	24,52	0,35	36,09	0,825	0,127	
70	24,23	24,64	0,41	47,34	1,082	0,190	
80	24,26	24,74	0,48	41,72	0,954	0,190	
90	24,03	24,54	0,51	46,41	1,061	0,222	
100	24,31	24,91	0,6	37,03	0,846	0,201	
110	24,21	24,85	0,64	37,03	0,846	0,211	
120	24,28	24,96	0,68	33,28	0,761	0,199	
130	24,28	25,07	0,79	23,91	0,547	0,159	
140	24,31	25,15	0,84	28,59	0,654	0,199	
150	24,16	25,04	0,88	26,72	0,611	0,192	
160	24,17	25,12	0,95	21,56	0,493	0,163	
170	24,23	25,21	0,98	23,44	0,536	0,181	
180	24,26	25,36	1,1	22,5	0,514	0,187	
190	24,03	25,14	1,11	20,16	0,461	0,169	
200	24,31	25,52	1,21	19,69	0,450	0,174	

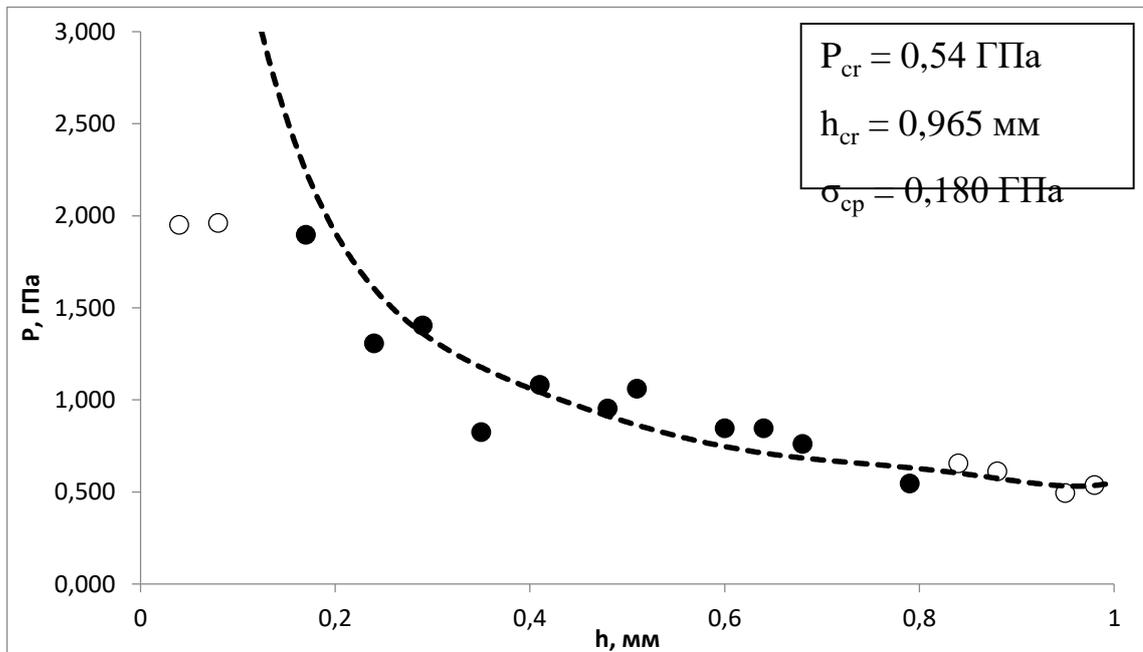


Рисунок 132 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом ванадия. Содержание оксида ванадия в смеси 50%

Таблица 125 – Результаты эксперимента со смесью окфол-3,5/  $V_2O_5$  в соотношении 40%/60%

мг	h <sub>0</sub> , мм	h <sub>к</sub> , мм	h, мм	V, mV	P эксп, ГПа	σ, ГПа	σ ср, ГПа
10	24,21	24,26	0,05	89,53	2,404	0,061	0,208
20	24,28	24,38	0,1	86,25	2,316	0,114	
30	24,28	24,44	0,16	83,91	2,253	0,173	
40	24,31	24,54	0,23	74,53	2,002	0,214	
50	24,16	24,45	0,29	82,97	2,228	0,292	
60	24,17	24,54	0,37	57,19	1,536	0,248	
70	24,23	24,65	0,42	45,94	1,234	0,221	
80	24,26	24,76	0,5	36,16	0,971	0,200	
90	24,03	24,54	0,51	38,44	1,032	0,216	
100	24,39	24,98	0,59	35,16	0,944	0,222	
110	24,21	24,85	0,64	35,16	0,944	0,236	
110	24,21	24,84	0,63	41,72	1,120	0,276	
120	24,28	24,97	0,69	28,59	0,768	0,203	
120	24,28	24,94	0,66	33,28	0,894	0,228	
120	24,31	24,98	0,67	23,44	0,629	0,163	
130	24,28	25,03	0,75	22,97	0,617	0,173	
130	24,28	25,03	0,75	17,34	0,466	0,131	
140	24,31	25,1	0,79	24,38	0,655	0,191	
150	24,16	25	0,84	22,97	0,617	0,187	
160	24,17	25,06	0,89	19,69	0,529	0,167	
170	24,23	25,2	0,97	24,38	0,655	0,219	
180	24,26	25,28	1,02	21,56	0,579	0,201	

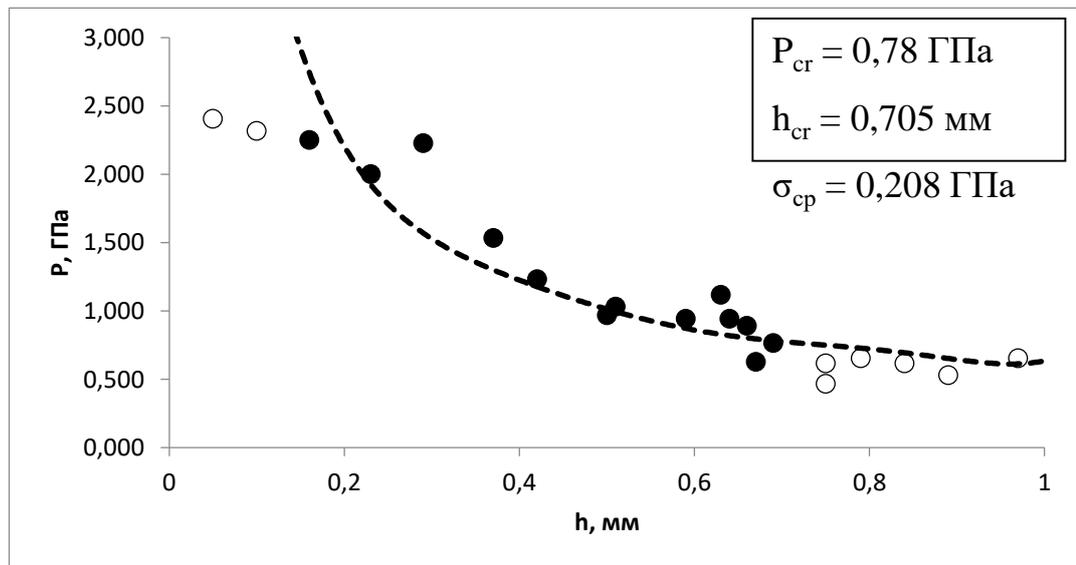


Рисунок 133 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины слоя смесей окфол-3,5 с оксидом ванадия. Содержание оксида ванадия в смеси 50%

## Приложение 5

Таблица 126 – Результаты эксперимента со смесью ПХА/окфол-3,5 в соотношении 50/50%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P$ эксп, ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma$ ср, ГПа
24,18	24,29	0,11	42,19	1,454	0,079	0,120
24,02	24,2	0,18	31,41	1,083	0,093	
24,12	24,36	0,24	38,44	1,325	0,147	
24,02	24,32	0,3	19,69	0,679	0,092	
24,17	24,55	0,38	20,63	0,711	0,117	
24,12	24,59	0,47	21,56	0,743	0,146	
23,86	24,37	0,51	19,22	0,663	0,139	
23,96	24,55	0,59	20,16	0,695	0,163	
24,12	24,78	0,66	7,97	0,275	0,070	
24,16	24,92	0,76	15,47	0,533	0,151	
24,18	25	0,82	11,72	0,404	0,121	
24,02	24,92	0,9	14,53	0,478	0,152	
24,12	25,04	0,92	10,31	0,339	0,110	
24,02	25,03	1,01	10,78	0,354	0,122	
24,17	25,27	1,1	8,91	0,293	0,107	
24,12	25,29	1,17	8,91	0,293	0,111	

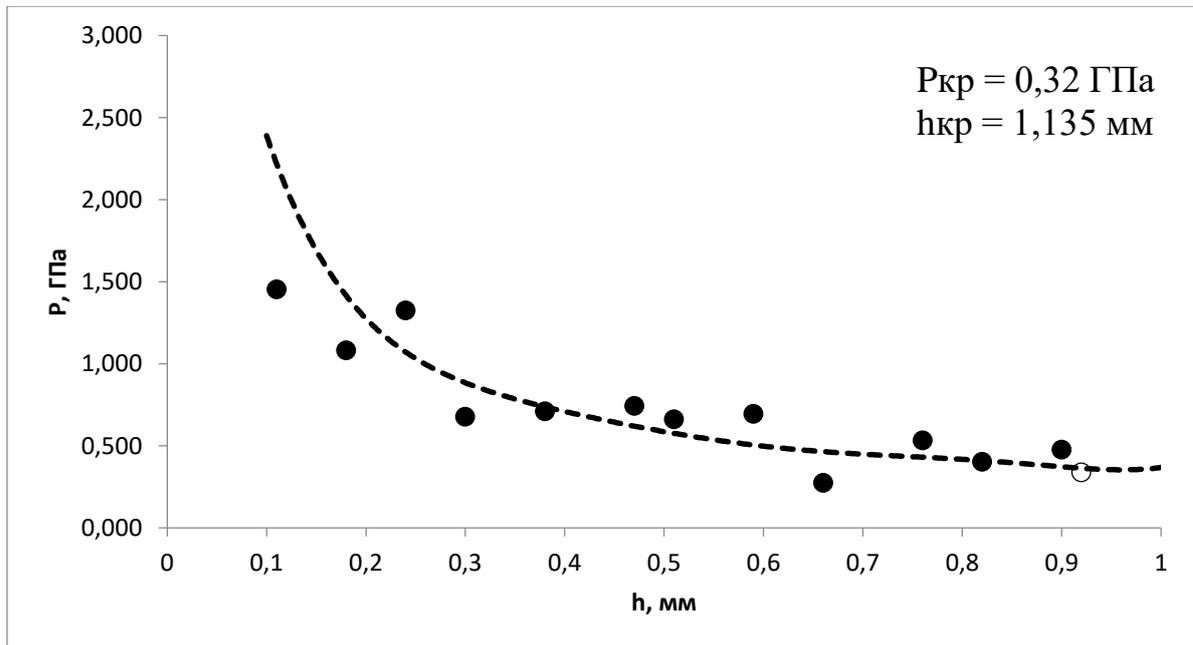


Рисунок 134 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смеси ПХА/окфол-3,5. Содержание окфола-3,5 в смеси 50%

Таблица 127 – Результаты эксперимента со смесью ПХА/ЭД-20 в соотношении 80/20%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P_{\text{эксп}}$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
24,14	24,18	0,04	58,59	1,760	0,036	0,041
24,16	24,28	0,12	24,38	0,732	0,043	
23,98	24,16	0,18	13,13	0,394	0,034	
24,07	24,31	0,24	28,13	0,845	0,094	
24	24,28	0,28	8,91	0,268	0,034	
24,17	24,32	0,15	15	0,451	0,033	
24,1	24,42	0,32	6,09	0,183	0,026	
23,75	24,05	0,3	7,97	0,239	0,032	
23,87	24,29	0,42	7,5	0,225	0,040	

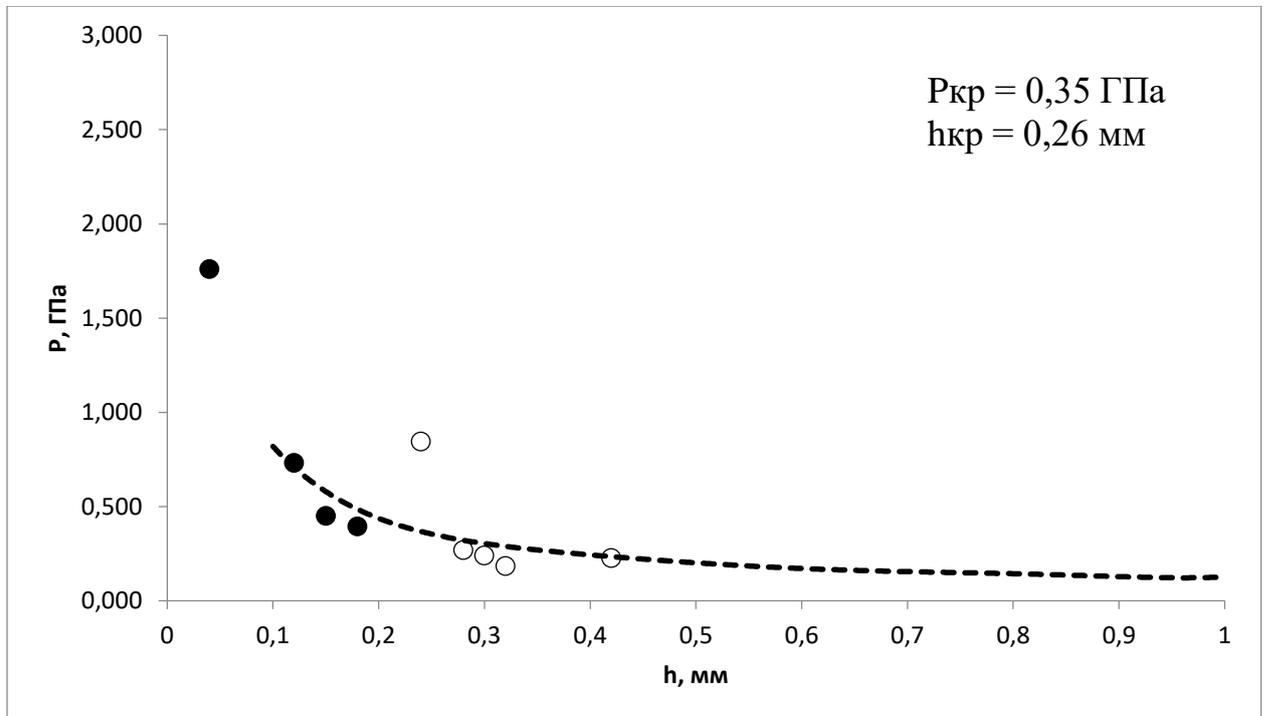


Рисунок 135 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смеси ПХА/ЭД-20. Содержание ЭД-20 в смеси 20%

Таблица 128 – Результаты эксперимента со смесью ПХА/окфол-3,5/ЭД-20 в соотношении 40/40%/20%

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , mV	$P_{\text{эксп}}$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
24,14	24,18	0,04	58,59	1,912	0,039	0,045
24,16	24,25	0,09	24,38	0,796	0,036	
23,98	24,13	0,15	13,13	0,429	0,031	
24,07	24,19	0,12	28,13	0,918	0,054	
24	24,28	0,28	8,91	0,291	0,037	
24,17	24,55	0,38	15	0,490	0,081	
24,1	24,45	0,35	6,09	0,199	0,031	
23,75	24,25	0,5	7,97	0,260	0,054	
23,87	24,29	0,42	7,5	0,245	0,044	

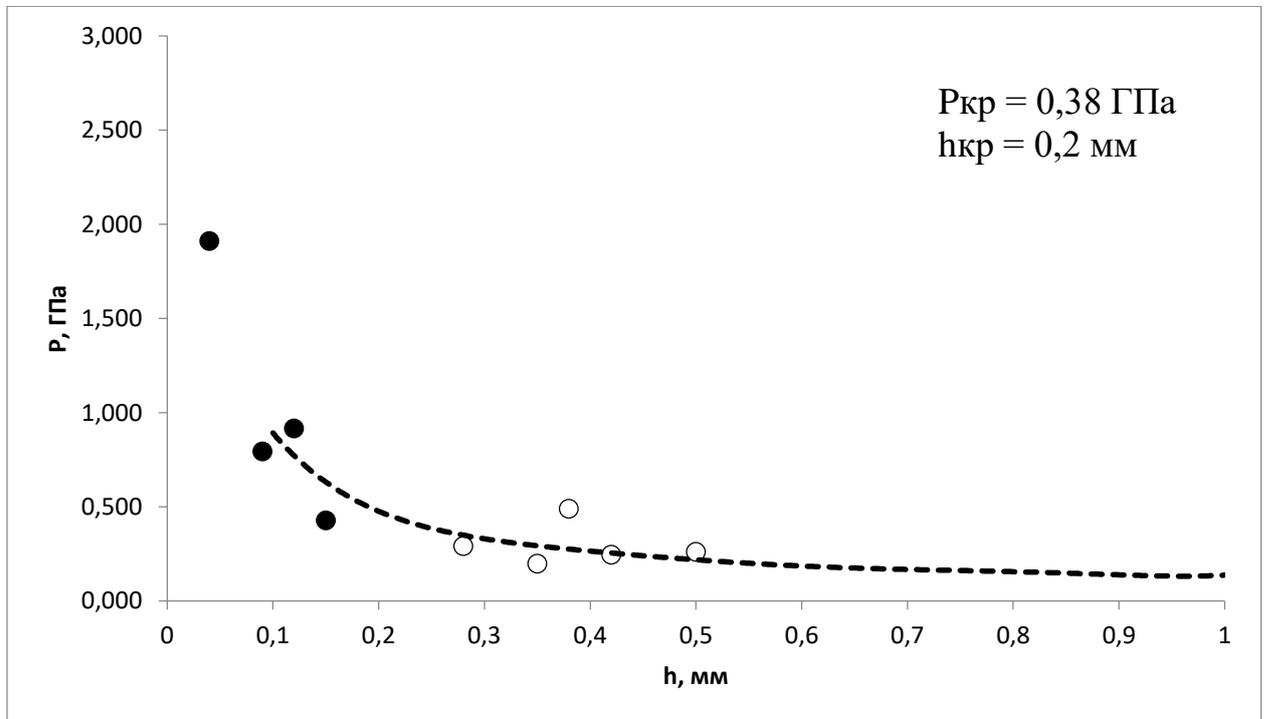


Рисунок 136 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смеси ПХА/окфол-3,5/ЭД-20. Содержание ЭД-20 в смеси 20%, окфола-3,5 40%

Таблица 129 – Результаты эксперимента со смесью ПХА/окфол-3,5/алюминий/ЭД-20 в соотношении 40/20%/20%/20%.

$h_0$ , мм	$h_k$ , мм	$h$ , мм	$V$ , мВ	$P_{\text{эксп}}$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа	$\sigma_{\text{ср}}$ , ГПа
24,26	24,29	0,03	58,59	2,003	0,031	0,033
24,16	24,22	0,06	24,38	0,833	0,025	
23,98	24,05	0,07	13,13	0,449	0,016	
24,07	24,15	0,08	28,13	0,962	0,038	
24	24,08	0,08	8,91	0,305	0,012	
24,17	24,47	0,3	15	0,513	0,069	
24,1	24,31	0,21	6,09	0,208	0,020	
23,75	24,21	0,46	7,97	0,272	0,053	

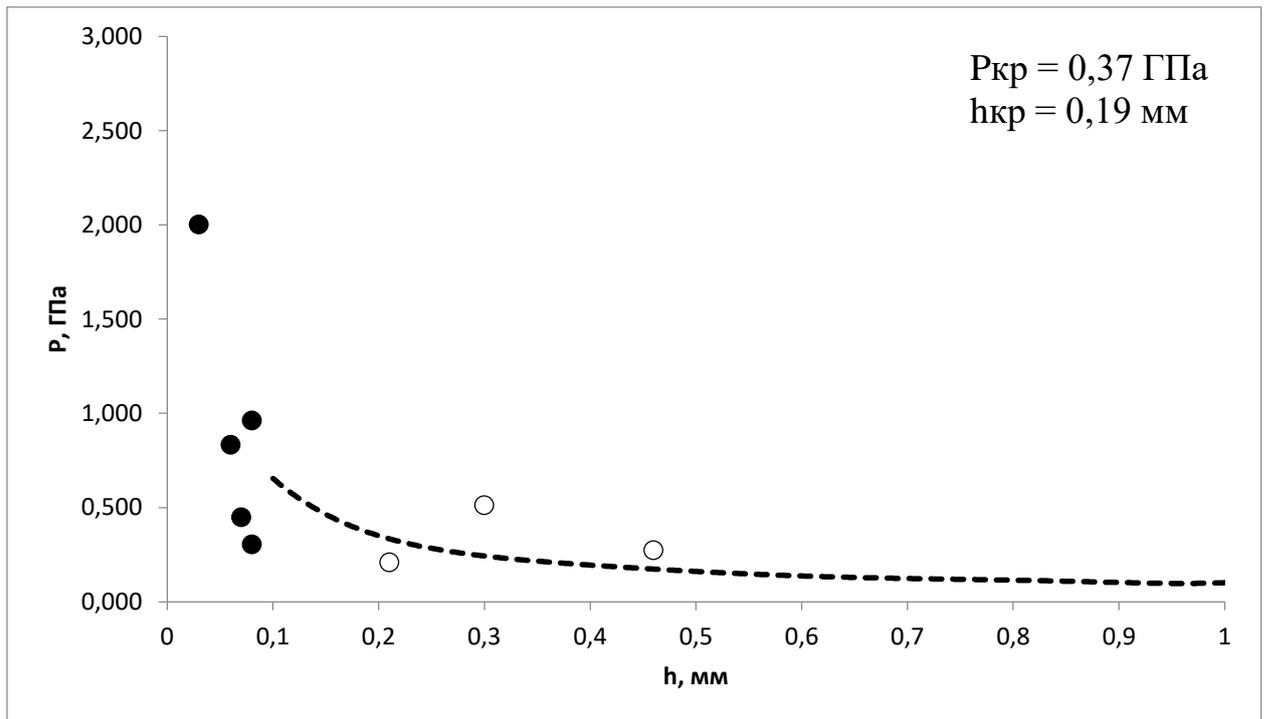


Рисунок 137 – Зависимость давления разрушения образцов от толщины заряда смеси ПХА/алюминий/окфол-3,5/ЭД-20. Содержание ЭД-20 в смеси 20%, окфола-3,5 20%, алюминия 20%

## Приложение 6

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Генеральный директор  
 ООО «ТЕХНЭГРУПП»  
 Фадеев В.Ю  
 2025 г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Дмитриева Н.В.  
 «Влияние дисперсных добавок на чувствительность  
 высокоэнергетических веществ к удару, выдвинутой на соискание  
 учёной степени кандидата технических наук.

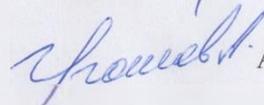
Результаты экспериментальных исследований, выполненных Дмитриевым Н.В., по определению влияния дисперсных добавок на чувствительность к внешним механическим воздействиям энергонасыщенных материалов на основе аммиачной селитры использованы при создании нового взрывчатого вещества повышенной мощности и безопасности применения для горной промышленности с добавкой вторичного порошка алюминия. Результаты учтены при выборе и корректировке рецептуры смеси и оценке безопасности создаваемого ВВ в соответствии с требованиями Технологического Регламента Таможенного Союза 028/2012.

Разработанный взрывчатый состав «Гранулит Х» подвергнут полному циклу испытаний, экспертной оценке безопасности и, в настоящее время, проходит процедуру допуска к постоянному применению в подземных горных выработках рудников и шахт не опасных по газу или пыли, в соответствии с техническими условиями ТУ 20.51.11-010-45334661-2024.

Заместитель ген. директора  
 кандидат технических наук

 Н.В. Сенько

Главный технолог

 А.В. Игошев