

На правах рукописи

СОЛОВЬЁВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ
ГЛУБОКООХЛАЖДЕННЫХ РЕЗИН И РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ
ИЗДЕЛИЙ.**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 1997

Работа выполнена в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете

Научный руководитель -

доктор технических наук,
профессор Курец В.И.

Официальные оппоненты -

доктор технических наук,
профессор Каляцкий И. И.;
доктор технических наук,
Юшков Ю.Г.

Ведущая организация -

ОАО Научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и техноло-
гический кабельный институт

Защита диссертации 29 октября 1997 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета К 063.80.05 при Томском политехническом университете по адресу: 634004, г. Томск, пр. Ленина,30.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского Государственного университета.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
Диссертационного Совета,
д.т.н., профессор

А.А. Дульзон

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. Постоянное накопление резиновых и полимерных отходов, включая резинотехнические изделия, требует поиска эффективных методов их переработки с целью возврата в производство ценного сырья и улучшения экологического состояния территорий. В настоящее время в развитых странах перерабатывается не более 20 % резинотехнических и полимерных отходов, что связано с высокой трудоемкостью и дороговизной процесса, поэтому поиск эффективного способа дезинтеграции резинотехнических изделий, как основной операции в процессе переработки, является актуальной задачей.

На сегодняшний день наиболее перспективной является переработка отходов резиновой промышленности и изношенных резинотехнических изделий, включающая их предварительное измельчение, что позволяет в большем объеме использовать ценные свойства каучукового вещества. Необходимым условием реализации этого направления переработки и использования отходов является разработка рациональных способов получения из них резиновой крошки различной степени дисперсности.

В последние 10-15 лет все большее развитие находит техника криогенного измельчения, реализующая разрушение материала, охлажденного до температуры хрупкости, в механических установках.

Общим недостатком механических методов измельчения является то, что при переработке резино-металлических отходов их использование либо затруднено, из-за существенного износа рабочих инструментов, либо вообще является невозможным, когда толщина металлических включений превышает 2-3 мм (детали машин, конвейерные ленты и др.).

Нами для решения задачи дезинтеграции резиновых и полимерных отходов и изделий, включая изделия, армированные металлом, предполагается совмещение известных операций и методов, такие как глубокое охлаждение сырья и разрушение его импульсными электрическими разрядами, известном под названием «электроимпульсный способ». Рабочим инструментом при этом являются импульсные электрические разряды, формирующиеся внутри

материала, а разрушение осуществляется за счет ударных сдвиговых и растягивающих усилий, возникающих при расширении канала разряда. Применение электрической искры в качестве рабочего инструмента, вследствие незначительного износа разрушающего инструмента ($\sim(3.5 \div 6.0) \cdot 10^{-4}$ г/имп), определяющегося электрической эрозией электродов, а также возможности регулирования процесса разрушения за счет варьирования величины энергии импульса и времени его выделения, является перспективным для утилизации резиновых и резино-металлических отходов, а также при приготовлении резиновой крошки заданной степени дисперсности.

Работа выполнялась в рамках государственной научно-технической программы "Синхронное излучение, лучевые применения", тема 2.3.4. "Исследование путей использования импульсных и СВЧ пробоев для разрушения композиционных материалов и очистки металлических поверхностей" (1993-1997г.); региональной программы "Прогресс и регион", тема "Разработка установки для утилизации полимерных отходов электрическими импульсными разрядами" (1995-1997 г.); единого госбюджетного заказ-наряда НИИ ВН при ТПУ, тема 4.5.96. "Исследование особенностей воздействия электрических разрядов на разрушение эластичных материалов" (1996 г.).

Цель работы: Исследование закономерностей электроимпульсного разрушения глубокоохлажденных резин и резинотехнических изделий, разработка рекомендаций для создания установок по их дезинтеграции.

Основные задачи работы:

1. Исследовать импульсные пробивные характеристики жидкого азота, как принципиально новой изоляционной среды при электроимпульсном разрушении глубокоохлажденных резин.

2. Исследовать импульсные пробивные характеристики резин с различными наполнителями при изменении степени их охлаждения и выбрать амплитуду и форму высоковольтного импульса, обеспечивающих внедрение канала разряда в разрушаемый материал.

3. Изучить энергосодержание в канале разряда при пробое глубокоохлажденных резин, имеющих различные наполнители. Определить

закономерности их разрушения и выбрать энергетические параметры высоковольтного импульса, обеспечивающие наиболее эффективное разрушение.

4. Определить закономерности разрушения глубокоохлажденных резиновых образцов, имеющих металлическую составляющую.

5. Исследовать основные энергетические закономерности при массовом разрушении глубокоохлажденных резин, а также резинотехнических изделий, армированных металлом.

6. Выбрать конструкционные материалы, работающие в условиях низких температур и ударных нагрузок. Разработать порционные установки для дробления и измельчения резин и резинотехнических изделий.

7. Провести технико-экономический анализ и выбрать наиболее эффективные области использования предлагаемого способа дезинтеграции резин и резинотехнических изделий.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

- определены параметры высоковольтного импульса, обеспечивающие внедрение канала разряда в глубокоохлажденные резины при использовании в качестве изоляционной среды жидкого азота;

- установлено влияние наполнителей и времени охлаждения на пробивные импульсные характеристики глубокоохлажденных резин;

- изучен характер энерговыделения в канале разряда, сформированного в глубокоохлажденных резинах. Определены параметры импульса, обеспечивающие эффективное разрушение данного сырья;

- предложен механизм и определены характеристики отделения глубокоохлажденных резин от металлической составляющей в резинотехнических изделиях, имеющих плоскую металлическую вставку;

- установлены закономерности электроимпульсного разрушения глубокоохлажденных резин и резинотехнических изделий.

Автор защищает:

- значения пробивных градиентов (вольт-секундные характеристики) жидкого азота в сантиметровом диапазоне толщин, используемого в качестве

изоляционной среды при электроимпульсном пробое материала;

- закономерности изменения пробивных градиентов резин и резинотехнических изделий, имеющих металлическую составляющую, от степени охлаждения, вида наполнителя и времени приложения напряжения;

- параметры импульса, обеспечивающие внедрение канала разряда в разрушаемый материал и эффективное разрушение глубокоохлажденных резин различного состава, полученные на базе исследований энергоснабжения в канале разряда;

- стохастическую модель массового измельчения глубокоохлажденных резин и значения оптимальных показателей электроимпульсного измельчения, а также параметры и режимы дезинтеграции резинотехнических изделий, имеющих плоскую металлическую вставку;

- конструкцию электроимпульсной порционной рабочей камеры, где в качестве изоляционной среды используется жидкий азот;

- технико-экономическое сравнение электроимпульсного и механического измельчения резин и дезинтеграции резинотехнических изделий с металлической составляющей. Область наиболее эффективного использования электроимпульсного способа измельчения резинотехнических изделий.

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций гарантирована необходимым объемом экспериментальных данных, обеспечивающих статистический анализ результатов, использованием современных методик измерения и соответствующей аппаратуры, адекватностью расчетных и экспериментальных данных по показателям разрушения глубокоохлажденных резин, а также успешной эксплуатацией уже разработанных и созданных установок, включая аппараты, работающие за рубежом.

Практическая значимость и реализация работы.

Расширение возможностей применения электроимпульсного способа для дробления и измельчения глубокоохлажденных резин и резинотехнических изделий.

Определены оптимальные режимы массового разрушения глубокоохлажденных резин, а также резинотехнических изделий, армированных металлом.

Выбраны и испытаны материалы и конструкции электродных систем электроимпульсных установок, работающих в условиях низких температур и ударных нагрузок.

На основании полученных результатов разработана и создана электроимпульсная порционная установка производительностью до 20 кг/ч при измельчении продукта до крупности 1 мм (Контракт № 105/20007886/INR от 01.10.95 г.). В настоящее время установка эксплуатируется в Исследовательском центре (Forschungszentrum) г. Карлсруэ (Германия).

Проведены сравнительные испытания электроимпульсного и механического способов разрушения глубокоохлажденных эластомеров, которые показали, что при криогенном разрушении резин электроимпульсный способ может успешно конкурировать с механическим способом (дробление на вальцах), имея близкие энергозатраты ($(0.16 \div 0.2)$ кВт·ч/кг при измельчении до крупности - 1 мм), а также возможность регулирования выхода тонких классов крупностью менее 0.5 мм за счет изменения параметров разрядного контура и специальных технологических мероприятий.

При разрушении комбинированных резинотехнических изделий, армированных металлом, установлена возможность полного отделения резины от металла при энергоемкости процесса ($4 \div 14$) кВт·ч/т (без учета энергии на производство жидкого азота) при производительности ($100 \div 500$) кг/ч. Разработано техническое задание на создание непрерывнодействующей опытной установки по разрушению элементов конвейерной ленты (танковых траков) в среде жидкого азота производительностью до 500 кг/ч (Контракт по кооперации между Центром научных исследований и развития "Nord" фирмы "Рейн-Металл" (Унтерлюс, Германия) и Томским политехническим университетом, от 20.02.95 г.).

Установлено, что областью наиболее рационального использования

электроимпульсного способа разрушения глубокоохлажденных эластомеров является применение его для утилизации комбинированных резинотехнических изделий, армированных металлом.

Апробация работы: Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на областной научно-практической конференции молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям (Томск, 1995 г.), на второй и третьей областных научно-практических конференциях молодежи и студентов "Современные техника и технология" (Томск, 1996, 1997 г.), на международной конференции "Экологически чистые технологические процессы в решении проблем охраны окружающей среды" (Иркутск, 1996 г.), на VIII научной школе "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах" (Николаев, 1997 г.), на научных семинарах НИИ высоких напряжений.

Публикации: Основное содержание работы и ее результаты опубликованы в 7 работах.

Объем и структура работы: Диссертационная работа изложена на 221 страницах основного текста, содержит 67 рисунков, 37 таблиц; состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографии, включающей 106 источников и 6 приложений на 20 страницах. Общий объем работы 250 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность тематики исследований, определена цель исследований, сформулирована научная новизна результатов, отражена их практическая ценность, дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены основные методы и проблемы переработки резиновых, резинотехнических и полимерных отходов. Наиболее перспективной является переработка отходов, включающая их предварительное измельчение, и дальнейшее использование резиновой крошки в качестве сырья для приготовления резиновых смесей. Проведен анализ различных механических методов измельчения резин и резинотехнических изделий как в высокоэластичном состоянии, так и охлажденных до температур хрупкости. Установлено, что общими

недостатками механических методов измельчения при переработке резиновых и резино-металлических отходов является:

- низкая степень измельчения ($i \approx 2.5$);
- существенный износ режущих тел (~ 100 кг/т);
- низкая степень отделения резины от металла (~ 60 %).

Рассмотрены основные закономерности электроимпульсного разрушения твердых тел, предложенного для решения задач дезинтеграции глубокоохлажденных резин и резинотехнических изделий, включая изделия, армированные металлом.

В заключительном разделе главы сформулирована цель и задачи настоящих исследований.

Вторая глава посвящена методике проведения экспериментальных исследований, описанию объектов исследований, применению планирования экспериментов и методов математической статистики при обработке опытных данных.

Исследования выполнены на двух экспериментальных установках, одна из которых укомплектована аппаратурой для регистрации тока в разрядной цепи и напряжения на нагрузке и предназначена для исследования пробивных характеристик резин и жидкого азота, а также однократного разрушения образцов. На другой установке проводились технологические эксперименты по массовому дроблению глубокоохлажденных резин и резинотехнических изделий. Используемое оборудование позволяло варьировать параметры импульса в интервалах, имеющих место в электроимпульсной (ЭИ) технологии:

- амплитуда импульса до 300 кВ;
- разрядная емкость от $(5 \div 20) \cdot 10^{-9}$ Ф (при однократном воздействии) и от $(16.6 \div 33.4) \cdot 10^{-9}$ Ф при массовом дроблении;
- индуктивность разрядного контура изменялась включением в цепь индуктивностей величиной $(30 \div 600) \cdot 10^{-6}$ Гн.

Для регистрации параметров импульсов высокого напряжения и тока использовались осциллограф ОК-19М, омический делитель напряжения типа

Раске-Балыгина, токовый шунт Роговского.

Для исследования пробивных и электрических характеристик жидкого азота и глубокоохлажденных резин, характеристик разрушения единичных образцов глубокоохлажденных резин использовались специальные криогенные рабочие камеры.

Исследования проводились на образцах резин марок ШБТМ-40, ШВП-50 с наполнителями технический углерод и каолин и образцах резин марок ТСШ-33, ТСШМ-35 с наполнителями мел и тальк, а также на специально изготовленных модельных образцах резины с металлической вставкой. Образцы изготовлены на опытном производстве Научно-исследовательского кабельного института (г. Томск). Резины ШБТМ-40, ШВП-50 используются в кабельной промышленности в качестве защитной оболочки кабелей, резины ТСШ-33, ТСШМ-35 в качестве изоляции кабелей. Выбор данных резин обусловлен тем, что эти резины охватывают достаточно широкий спектр физико-механических свойств резин, применяемых в промышленности.

Исследования по массовому разрушению резин проводились на образцах упомянутых марок резин и различных резинотехнических изделий.

Для исключения и уменьшения систематических ошибок при обработке опытных данных использовались методы математической статистики.

В третьей главе изложены результаты исследований энергетических характеристик разрушения единичных образцов глубокоохлажденных резин.

Использование жидкого азота в качестве принципиально новой изоляционной среды требует изучения его электрических пробивных характеристик. В результате проведенных исследований установлено, что жидкий азот в процессе электроимпульсного разрушения всегда представляет собой кипящую жидкость. Уровни пробивных напряжений жидкого азота в таком состоянии ниже уровней пробивного напряжения технической воды и трансформаторного масла в одинаковых условиях.

Увеличение крутизны приложенного импульса напряжения приводит к увеличению электрической прочности жидкого азота. При пробое жидкого

азота не наблюдается деформации приложенного импульса напряжения ни по амплитуде, ни по крутизне фронта импульса. Средние пробивные градиенты напряжения жидкого азота в сантиметровом диапазоне промежутков при температуре ~ 78 °К составляют величину $(12 \div 16)$ кВ/мм.

Важной характеристикой процесса разрушения резин является время, необходимое для перехода их в хрупкое состояние в процессе охлаждения. Известно, что эти температуры зависят от состава резин и лежат в пределах от 150 до 210 °К. Нами проведен типовой теплофизический расчет по скорости охлаждения резины. Результаты расчета температур в центре прямоугольных резиновых фрагментов различной толщины в зависимости от времени охлаждения представлены на рис. 1.

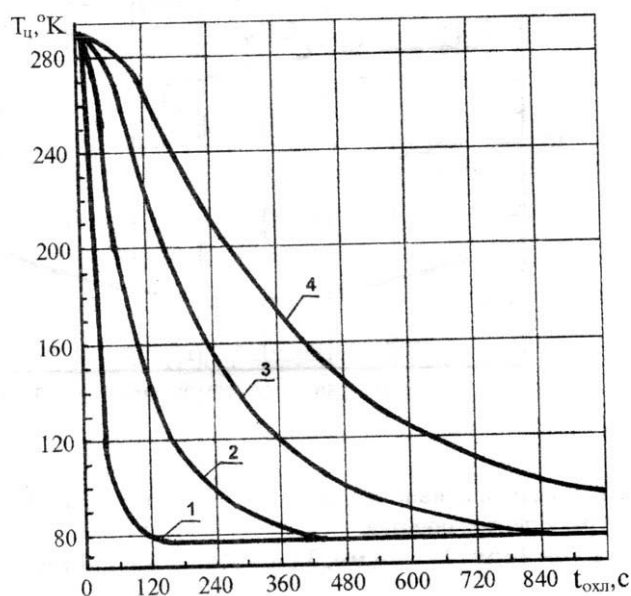


Рис. 1 Зависимость температуры в центре резинового фрагмента различной толщины (d) от времени охлаждения в среде жидкого азота.

1 - $d=4$ мм; 2 - $d=8$ мм; 3 - $d=12$ мм; 4 - $d=16$ мм.

На рис. 2 представлены зависимости пробивного напряжения резины марки ТСШ-33 от температуры в центре образца, полученной по данным

теплового расчета при различном времени охлаждения. Установлено, что в процессе охлаждения пробивное напряжение падает на 15-20 %, затем восстанавливается, причем конечные пробивные напряжения ниже на 5-10 % $U_{пр}$ резин при комнатной температуре. Минимум $U_{пр}$ находится для всех толщин образцов в одном и том же диапазоне температур ($170 \div 230$ °K).

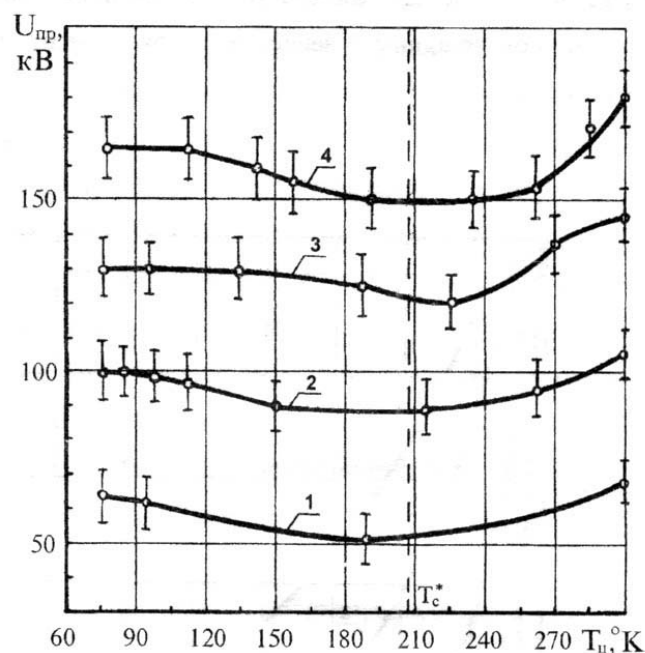


Рис. 2 Зависимость пробивного напряжения резины марки ТСШ-33 от температуры в центре образца.

1 - $d=4$ мм; 2 - $d=8$ мм; 3 - $d=12$ мм; 4 - $d=16$ мм.

Снижение пробивного напряжения можно объяснить изменением напряженного состояния наружных слоев образцов по мере уменьшения их температуры и перехода их в застеклованное состояние.

Используемые в исследованиях изоляционные (ТСШ-33, ТСШМ-35) и шланговые (ШБТМ-40, ШВП-50) резины перекрывают достаточно большой диапазон электрофизических характеристик используемых в практике резин. Отличия электрофизических свойств используемых в данной работе резин связаны с применением различных наполнителей.

Анализ осциллограмм напряжения при пробое резин, наполненных

мелом и тальком, показывает отсутствие деформации импульса, в то время как для резин, наполненных техническим углеродом, отмечается существенная деформация импульса по амплитуде в предпробивной стадии развития разряда (до 30 %). Причем деформация импульса не зависит от температуры образца, а связана с высоким значением электропроводности данного типа резин ($\sim 10^{-8}(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$).

В результате проведенных исследований установлено, что пробивные напряжения глубокоохлажденных резин слабо зависят от вида каучука, а в основном определяются типом наполнителя. Резины, наполненные мелом и тальком, имеют большие пробивные напряжения, чем резины, наполненные техническим углеродом.

Вольт-секундные характеристики различных марок глубокоохлажденных резин представлены на рис. 3. На них наложены соответствующие вольт-секундные характеристики жидкого азота. Вольт-секундные характеристики имеют различный наклон к оси абсцисс и пересекаются, что указывает на возможность реализации электроимпульсного способа из разрушения.

Таким образом, при выборе уровня напряжения высоковольтного импульса следует ориентироваться на градиенты напряжения $E_{\text{пр}}=9.5\div 13$ кВ/мм для резин, имеющих в качестве наполнителя технический углерод, и $E_{\text{пр}}=11\div 15$ кВ/мм для резин, имеющих инертный наполнитель (мел, тальк). Для реализации электроимпульсного способа необходимо использовать импульсы со скоростью нарастания напряжения не менее 400 кВ/мкс для резин типа ШБТМ-40, ШВП-50 и не менее 1000 кВ/мкс для резин типа ТСШ-33, ТСШМ-35.

Используя метод опорных точек по методике Вершинина, предложено уравнение для расчета электрической прочности резин (1) по их известному составу и количеству каучуков, в пределах изменения толщин образцов от 4 мм до 16 мм и времени воздействия от 0.05 мкс до 0.5 мкс.

$$E_{1\Phi} = 0.25(A_0^i)^{1'} \exp[8.5/(4.2 + \lg d) + 2.5/(8.33 + \lg T)], \quad (I)$$

где $E_{пр}$ - минимальная электрическая прочность резин, кВ/см;
 d - толщина образца, см; τ - время до пробоя, мкс;
 A_0^C - удельная работа каналообразования, ккал/см³, интегральная характеристика свойств материала в сильных электрических полях.

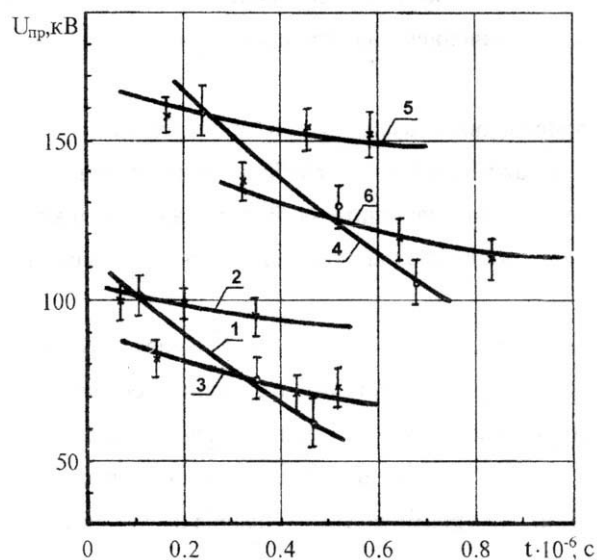


Рис. 3 Вольт-секундные характеристики глубокоохлажденных резин марок ТСШ-33, ТСШМ-35 (2, 5), ШБТМ-40, ШВП-50 (3, 6) и жидкого азота (1, 4).

1, 2, 3 - d - 8 мм; 4, 5, 6 - d = 16 мм .

При исследовании пробивных напряжений резино-металлических образцов установлено, что при выборе уровня амплитуды напряжения и оценке электрической прочности образцов глубокоохлажденных резин, армированных металлом, следует ориентироваться на пробивные градиенты глубокоохлажденных резин без металла.

Характер и величина энерговклада в канале разряда при прочих равных условиях определяет степень разрушения материала.

В табл. 1 представлены значения доли энергии (W_1), выделившейся в канале разряда за первый полупериод колебаний разрядного тока, относительно энергии, запасаемой в генераторе (W_3) при варьировании толщины образцов, величины перенапряжения на рабочем промежутке и индуктивности разрядного контура для глубокоохлажденных резин ТСШ и ШБТМ.

Таблица 1

Толщина (d), мм		4 мм			8 мм			12 мм			16 мм		
Марка резины	L, мкГн Среда	15	100	600	15	100	600	15	100	600	15	100	600
ТСШ-33,	$U_{пр}/U_{хх}$	~ 0.28			~ 0.45			~ 0.58			~ 0.74		
	жидкий азот	0.23	0.14	0.08	0.3	0.17	0.1	0.35	0.19	0.14	0.38	0.23	0.14
ТСШМ-35	масло	0.23	0.14	0.08	0.3	0.17	0.1	0.35	0.19	0.14	0.38	0.23	0.14
ШБТМ-40,	$U_{пр}/U_{хх}$	~ 0.23			~ 0.38			~ 0.53			~ 0.64		
	жидкий азот	0.4	0.35	0.26	0.66	0.6	0.5	0.72	0.63	0.58	0.78	0.73	0.63
ШВП-50	масло	0.35	0.3	0.2	0.42	0.36	0.24	0.53	0.44	0.3	0.55	0.48	0.33

Следует отметить, что качественный характер закономерностей энерговыделения в канале разряда за первый полупериод колебаний разрядного тока аналогичен закономерностям при электрическом пробое изоляционных твердых тел при температурах $\sim 20^\circ\text{C}$, при этом с увеличением толщины образцов соотношение W_1/W_3 увеличивается.

Пробой резины типа ШБТМ с техническим углеродом в качестве наполнителя имеет характер электротеплового, что приводит к увеличению сопротивления канала разряда, а также к тому, что "энерговыделение для резины типа ШБТМ с техническим углеродом в качестве наполнителя в 2 раза превышает энерговыделение в резинах типа ТСШ, имеющих наполнитель мел и тальк, для одинаковых толщин образцов.

В экспериментах на единичных образцах в качестве критерия разрушения выбрана поверхность образовавшихся магистральных трещин

($S_{тр}$). Учесть поверхность образовавшихся трещин в зоне переизмельчения не удается вследствие малых размеров данной зоны.

В результате исследований характеристик разрушения образцов глубокоохлажденных резин при однократном воздействии установлено:

- разрушение резин различных типов следует проводить при температуре в центре образца не выше температуры стеклования каучуков, входящих в состав резин;
- увеличение индуктивности разрядного контура приводит к уменьшению числа магистральных трещин и увеличению их длины, то есть варьированием индуктивности разрядного контура можно получить фугасный или бризантный тип разрушения образцов;
- для каждой толщины образцов существует оптимальный градиент энергии на рабочем промежутке с точки зрения характеристик разрушения, причем с увеличением толщины образцов его значения смещаются в сторону меньших величин и изменяется от 20 Дж/мм ($d=16$ мм) до 90 Дж/мм ($d=4$ мм);
- удельные характеристики разрушения резин, имеющих наполнитель технический углерод, ниже, чем у резин с нейтральными наполнителями;
- основными различиями между электроимпульсным разрушением горных пород и глубокоохлажденных резин является существенно меньшая зона переизмельчения, влияние проводимости наполнителя на характер распределения энергии в канале разряда.

В процессе проведенных исследований установлено, что разрушение электрическими разрядами глубокоохлажденных образцов резинотехнических изделий, имеющих в середине металлическую пластину, зависит от энергии единичного импульса, типа резинового покрытия и размеров металлической вставки. Механизм разрушения резинового покрытия определяется его расположением. Верхний слой резины разрушается радиальными трещинами за счет ударных волн, движущихся параллельно металлической вставке, а нижний слой разрушается за счет деформации металлической пластины при воздействии на нее электрического разряда и дальнейших ее свободных колебаний, а также за счет ударных сдвиговых усилий, возникающих при

электрическом пробое жидкого азота на границе с резиной.

Четвертая глава посвящена исследованию энергетических и размерных характеристик электроимпульсного дробления глубокоохлажденных резин, а также различных резинотехнических изделий, армированных металлом.

В связи с большим количеством переменных факторов, влияющих на энергетические характеристики процесса и нелинейностью исследуемых параметров, целесообразно использовать при проведении исследований ротатабельное планирование эксперимента второго порядка. В качестве функции отклика выбраны удельная производительность импульса и удельная энергоемкость процесса электроимпульсного дробления. Интервалы варьирования и значения варьируемых факторов, используемых в экспериментах представлены, в табл. 2.

Таблица 2.

Наименование	Разрядная емкость генератора (C), пФ X_1	Межэлектродное расстояние (d), мм X_2	Напряжение генератора (U), кВ X_3
Интервал	5000	6	30
Нижний уровень (-1)	20000	10	170
Нулевой уровень (0)	25000	16	200
Верхний уровень (+1)	30000	22	230

Согласно разработанной матрице планирования проведены эксперименты по электроимпульсному дроблению глубокоохлажденных резин. В результате получены адекватные регрессионные уравнения (2)-(6), описывающие изменение удельной производительности электроимпульсного дробления для резин различных марок:

Для резин типа ШБТМ при дроблении до крупности - 5 мм:

$$Y_1 = 1.21 - 0.0743X_1^2 - 0.1678X_2^2 - 0.0902X_3^2 + 0.0882X_1 + 0.3376X_2 + 0.1371X_3 + 0.03X_1X_2 + 0.0425X_2X_3 - 0.0275X_1X_3; \quad (2)$$

до крупности - 2 мм:

$$Y_2 = 0.8267 - 0.0525X_1^2 - 0.123X_2^2 - 0.0719X_3^2 + 0.0682X_1 + 0.2347X_2 + 0.1011X_3 + 0.029X_1X_2 + 0.046X_2X_3 + 0.0215X_1X_3; \quad (3)$$

до крупности - 1 мм:

$$Y_3 = 0.5023 - 0.297X_1^2 - 0.0755X_2^2 - 0.042X_3^2 + 0.0324X_1 + 0.1454X_2 + 0.0576X_3 + 0.0113X_1X_2 + 0.0163X_2X_3 - 0.0137X_1X_3; \quad (4)$$

Для резин типа ТСШ при дроблении до крупности - 5 мм:

$$Y_4 = 0.9718 - 0.0607X_1^2 - 0.1348X_2^2 - 0.0713X_3^2 + 0.0691X_1 + 0.28X_2 + 0.127X_3 + 0.0288X_1X_2 + 0.0488X_2X_3 - 0.0237X_1X_3; \quad (5)$$

до крупности - 1 мм:

$$Y_5 = 0.0376 - 0.0123X_1^2 - 0.037X_2^2 - 0.0211X_3^2 + 0.034X_1 + 0.104X_2 + 0.035X_3 + 0.0226X_1X_2 + 0.0151X_2X_3 - 0.0024X_1X_3. \quad (6)$$

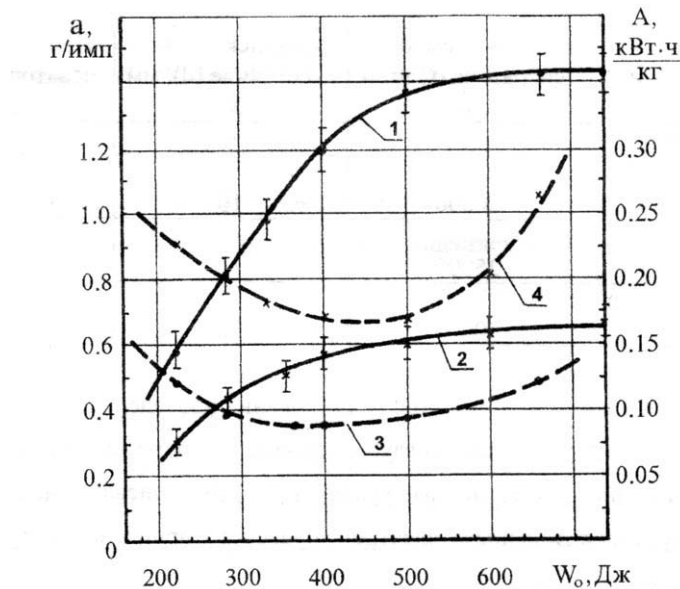


Рис. 4 Зависимости удельной производительности (1, 2) и удельных энергозатрат (3, 4) процесса электроимпульсного дробления резины типа ШБТМ от энергии единичного импульса напряжения.

1 - сито 5 мм; 2 - сито 1 мм.

На рис. 4 представлены зависимости удельной производительности и энергоемкости процесса электроимпульсного дробления от энергии импульса для резины типа ШБТМ на сите 1 и 5 мм, построенные с помощью полученных регрессионных уравнений.

Зависимости $a=f(W_0)$ для всех исследуемых материалов имеют два участка: нарастающий и область стабилизации, переход в которую зависит от крупности готового продукта. Уменьшение конечной крупности продукта смещает точку перегиба зависимости $a=f(W_0)$ в сторону больших энергий и приводит к уменьшению производительности процесса.

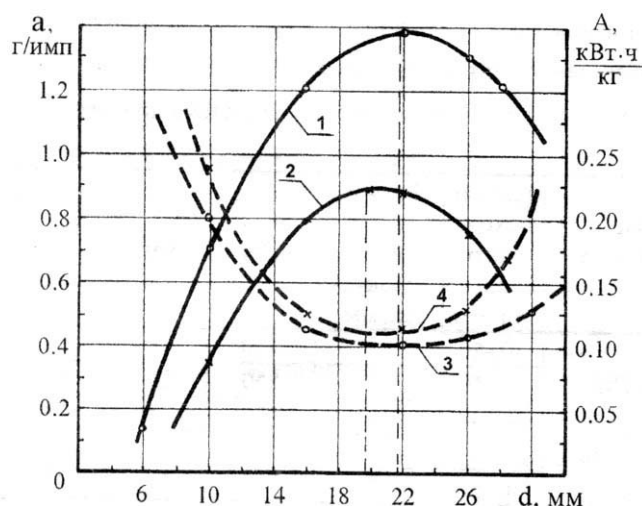


Рис.5 Зависимость удельной производительности (1,2) и удельных энергозатрат (3, 4) от длины межэлектродного промежутка при электроимпульсном дроблении резины типа ШБТМ на сите 5 мм.

1,3 - $W_3=500$ Дж; 2, 4 – $W_3=289$ Дж.

При дроблении резин, наполненных техническим углеродом, получают более высокие значения производительности импульса по сравнению с резинами типа ТСШ. Это обусловлено тем, что при пробое данных резин энергия, выделившаяся в канале разряда за первый полупериод колебаний разрядного тока существенно выше.

На рис. 5 представлены зависимости удельной производительности им-

пульса (a) и удельных энергозатрат (A) при дроблении резины типа ШБТМ на сите 5 мм от величины межэлектродного промежутка.

Анализ регрессионных уравнений и зависимостей позволил установить наличие оптимальных значений энергии единичного импульса и рабочих промежутков при дроблении материала до определенной крупности, которая определяет дальнейшее применение резиновой крошки.

В табл. 3 представлены оптимальные значения параметров: энергии импульса (W_0) и межэлектродного промежутка ($d_{\text{опт}}$), необходимых для наиболее эффективного дробления глубооохлажденных резин, и значения удельной производительности и энергоемкости, соответствующие этим

Таблица 3.

Тип материала	Размер исходного продукта, мм	Размер конечного продукта, мм	$W_{\text{опт}}$, Дж	$d_{\text{опт}}$, мм	a , г/имп	Π , кг/ч	A , кВт·ч/кг
Резина марки ШБТМ	30÷50	-5	450	21	1.33	38.8	0.085*
	30÷50	-2	550	22	1.01	28.8	0.1*
	30÷50	-1	630	23	0.63	18.1	0.16*
Резина марки ТСШ	30÷50	-5	580	22	1.15	33.12	0.102*
	30÷50	-1	700	22	0.47	13.5	0.275*

Установлено, что оптимальная частота посылки импульсов на один электрод составляет 6-8 имп/с и ограничивается газовыделением в зоне образования канала разряда. Расход жидкого азота при электроимпульсном дроблении в порционных рабочих камерах в установившемся тепловом режиме составляет $\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$ л/имп.

Зависимости удельных энергетических характеристик от параметров импульса, длины рабочего промежутка и диаметра отверстия в электродах-классификаторах при электроимпульсном разрушении (ЭИР) глубооохлажденных резин качественно совпадают с ЭИР горных пород, однако абсолютные значения удельных показателей разрушения горных пород на порядок выше, чем для глубооохлажденных резин. Значения

энергоемкости при ЭИР глубокоохлажденных резин сопоставимы со значениями энергоемкости при криогенном механическом измельчении резин и значительно меньше, чем энергоемкость при измельчении резин, находящихся в высокоэластичном состоянии.

В результате проведенных исследований по массовому разрушению различных резинотехнических изделий, армированных металлом (проводов с резиновой и полимерной изоляцией, фрагментов автомобильных шин и конвейерной ленты, отрезков напорных шлангов и других резино-металлических изделий, используемых в автомобилестроении), установлено:

- принципиальная возможность разрушения комбинированных (полимер-металл) изделий при энергоемкости процесса $(4 \div 14)$ кВт·ч/т без учета затрат энергии на производство жидкого азота при производительности $(0.1 \div 0.5)$ т/ч;

- наиболее эффективно разрушаются изделия из полимеров, содержащих металлическую составляющую;

- наличие текстильной составляющей в виде корда или ткани не позволяет дезинтегрировать весь материал, так как текстильная составляющая в процессе ЭИ разрушения в среде жидкого азота остается целой. Утилизацию таких изделий следует проводить в несколько стадий, причем текстильный остаток может быть переработан одним из известных способов, например резанием.

В пятой главе выбраны материалы и предложена конструкция изоляции высоковольтных электродов и рабочих камер, обеспечивающая надежную эксплуатацию оборудования в условиях низких температур и ударных нагрузок.

Криогенная камера должна состоять из следующих частей: внешнего корпуса, изготовленного из стеклотекстолита, внутренней емкости из нержавеющей стали (12X18H10T, 12X18H12T) и теплоизолирующего материала (мипоры, аэрогеля) между ними, причем толщина слоя теплоизоляции из условий теплоотдачи должна быть не менее 5 см. Для изготовления электродов (высоковольтного и заземленного) рекомендуется применять малоуглеродистые высоколегированные стали аустенитного класса:

12X18H10T, 12X18H12T, 08X18H10, 03X20H16AG6 и их аналоги, удовлетворяющие всем требованиям, предъявляемым при работе в условиях низких температур и ударных нагрузок. В качестве материала для изготовления изоляции высоковольтного электрода в установках для ЭИ дробления глубокоохлажденных эластомеров рекомендуется использовать стеклотекстолит марки СТЭФ, а также фторопласт для элементов, не испытывающих ударных нагрузок.

На основе проведенных исследований предложена конструкция изоляции высоковольтного электрода, состоящего из набора коаксиальных стеклотекстолитовых трубок. Данная конструкция обладает максимальной стойкостью к воздействию ударных нагрузок, достаточным запасом электрической прочности, равномерным охлаждением изоляции по всей толщине, что обеспечивает ресурс работы до 10^5 имп.

Создана электроимпульсная порционная установка производительностью до 20 кг/ч при измельчении глубокоохлажденных эластичных материалов до крупности - 1 мм (Контракт № 105/20007886/INR от 01.10.95 г.). В настоящее время эта установка эксплуатируется в Исследовательском центре (Forschungszentrum) г. Карлсруэ (Германия).

Разработано техническое задание по созданию непрерывнодействующей опытной установки для дезинтеграции элементов конвейерной ленты (танковых траков) в среде жидкого азота производительностью до 500 кг/ч (Контракт по кооперации между Центром научных исследований и развития "Nord" фирмы "Рейн-Металл" (Унтерлюс, Германия) и Томским политехническим университетом, от 20.02.95 г.).

Проведен технико-экономический анализ, согласно которому установлено, что областью наиболее рационального использования электроимпульсного способа разрушения глубокоохлажденных эластомеров является применение его для утилизации комбинированных резинотехнических изделий, армированных металлом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Впервые показана возможность применения электроимпульсного способа для дробления и измельчения резин, а также для дезинтеграции резинотехнических изделий в среде жидкого азота.

2. Показано, что в сантиметровом диапазоне рабочих промежутков в резко-неоднородном поле средние пробивные градиенты жидкого кипящего азота составляют $12 \div 16$ кВ/мм.

3. Установлено, что средние пробивные градиенты напряжения для глубооохлажденных резин в резконеоднородном поле слабо зависят от типа каучуков, входящих в состав резин, а в основном определяются видом наполнителя. При выборе уровня напряжения высоковольтного импульса следует ориентироваться на средние пробивные градиенты $E_{пр}=9.5 \div 13$ кВ/мм для резин, имеющих в качестве наполнителя технический углерод, и $E_{пр}=11 \div 15$ кВ/мм для резин, имеющих инертный наполнитель (мел, тальк). Для реализации электроимпульсного способа необходимо использовать импульсы со скоростью нарастания напряжения не менее 400 кВ/мкс для резин марок ШБТМ-40, ШВП-50 и не менее 1000 кВ/мкс для резин марок ТСШ-33, ТСШМ-35.

4. Уровни пробивных градиентов напряжений слабо зависят от степени охлаждения резин. Разрушение целесообразно проводить при переходе резин в хрупкое состояние, что характерно для $T = (170 \div 210) ^\circ\text{K}$.

5. Установлено, что характер энерговыведения в канале разряда за первый полупериод колебаний разрядного тока определяется видом наполнителя, входящего в состав резин. Так энерговыведение для резины типа ШБТМ с техническим углеродом в качестве наполнителя в 2 раза превышает энерговыведение в резинах типа ТСШ, имеющих наполнитель мел и тальк, для одинаковых толщин образцов. Для разрушения глубооохлажденных резин целесообразно использовать импульсы, обеспечивающие градиенты энергии на рабочем промежутке в диапазоне $20 \div 90$ Дж/мм, в зависимости от толщины резины и ее типа.

6. Электроимпульсная дезинтеграция резинотехнических изделий,

имеющих металлическую составляющую определяется типом, толщиной и расположением резинового покрытия. Механизм отделения резины от металла связан не только с воздействием ударных волн, но и со свободными колебаниями металлической вставки.

7. Установлено, что при массовом измельчении резин от 50 до 1 мм удельная производительность составляет ~ 0.63 г/имп, а энергоемкость ~ 0.16 кВт·ч/кг без учета затрат на производство жидкого азота. Удельные потери жидкого азота при электроимпульсном измельчении резин составляют $\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$ л/имп. Удельные показатели на отделение резины от металла при ЭИ дезинтеграции конвейерной ленты составляют: производительность 500 кг/ч, затраты энергии ~ 0.01 кВт·ч/кг.

8. Наличие текстильной составляющей в резинотехнических изделиях не позволяет полностью отделить резину, так как при температурах жидкого азота физические свойства текстильного корда не изменяются.

9. Выбраны конструкционные материалы, работающие в условиях низких температур и ударных нагрузок. Создана порционная установка для дробления и измельчения эластичных материалов в среде жидкого азота производительностью до 20 кг/ч при измельчении до крупности 1 мм, а также разработано техническое задание на создание непрерывнодействующей электроимпульсной установки для дезинтеграции резины от металла с элементов конвейерной ленты производительностью до 500 кг/ч.

10. Проведенный технико-экономический анализ показал, что областью наиболее рационального использования электроимпульсного способа разрушения в среде жидкого азота является применение его для утилизации комбинированных резинотехнических изделий, армированных металлом.

Автор выражает благодарность к.т.н. Филатову Г.П. (НИИ ВН), к.т.н. Таракановскому Э.Н. (НИИ ВН), к.т.н. Алексеевой Т.И. (НИИ ВН), а также сотрудникам отдела № 5 НИИ ВН за оказанную помощь, ценные советы и консультации при выполнении работы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Соловьев М.А., Филатов Г.П. Импульсный пробой жидкого азота и глубоководных резин.// Тез. докл. второй обл. научно-практ. конфер. мол. и студ. - Томск.- 1996. - С. 4-5.

2. Соловьев М.А., Филатов Г.П. Электроимпульсное разрушение глубоководных резин.// Тез. докл. междунар. конфер. "Экотехнология - 96". - Иркутск.- 1996.-С. 200-201.

3.Алексеева Т.И., Курец В.И., Соловьев М.А., Филатов Г.П. Исследование пробивных напряжений электротермически обработанных твердых непроводящих тел.// Изв. Вузов. Физика,- 1996.- № 4.- С.97-99.

4. Соловьев М.А. Исследование электрической импульсной прочности электротермически обработанных образцов.// Тез. докл. обл. научно-практ. конфер. мол. и студ. - Томск.- 1995. - С. 36.

5. Курец В.И., Соловьев М.А., Филатов Г.П. Импульсные пробивные напряжения глубоководных резин.// Изв. Вузов. Физика.- 1997. - № 8. - С. 86-90.

6. Соловьев М.А., Филатов Г.П. Влияние времени охлаждения на уровни пробивных напряжений глубоководных резин.// Тез. докл. 3-ей обл. научно-практ. конфер. студ., асп. и мол. ученых. "Современные техника и технологии". - Томск, 1997. - С. 13-14.

7. Курец В.И., Соловьев М.А., Филатов Г.П. Исследование энергетических характеристик электроимпульсного дробления глубоководных резин.// Высоковольтная техника и электротехнология: Межвуз. сб. науч. тр. Иванов. юс. энергетического ун.-та. - Иваново, 1997.- С. 135-137.