

УДК 621.365.5

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОГО НАГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ МЕЛКОКАЛИБЕРНЫХ БОЕПРИПАСОВ

П.А. Баскаков¹, А.Б. Кувалдин²

¹ОАО «Красноармейский научно-исследовательский институт механизации»
141292, Россия, Московская обл., г. Красноармейск, пр-т Испытателей, 8

²Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14

Рассматриваются вопросы разработки конструкции индукционно-резистивного нагревателя для уничтожения мелкокалиберных боеприпасов с использованием математического моделирования сопряженных электромагнитных и тепловых процессов. Использование специфического обмоточного провода с металлической защитной оболочкой требует подбора оптимального соотношения размеров провода и параметров многослойной обмотки, обеспечивающих требуемые параметры нагрева локализатора для стабильного уничтожения боеприпасов. Геометрия конструкции и наличие нелинейных зависимостей в распределении электромагнитных и тепловых полей делают основным инструментом исследования численные модели, которые для упрощения задавались в двухмерной постановке.

Ключевые слова: *индукционно-резистивный нагреватель, уничтожение боеприпасов, локализатор, многослойная обмотка, кабель с металлической защитной оболочкой.*

В настоящее время одной из насущных проблем предприятий оборонной промышленности является наличие большого количества боеприпасов с истекшим сроком хранения, а также попавших в класс сокращаемых и запрещенных вооружений, часть их которых опасна в служебном обращении или находится в аварийном состоянии. Проблема утилизации крупнокалиберных боеприпасов решена – разработано много способов, основанных на вымывании или выплавлении взрывчатого вещества из корпуса боеприпаса. Однако до настоящего времени не решен вопрос утилизации мелкокалиберных боеприпасов и их составных частей (взрыватель, средства воспламенения, капсюль-детонатор и т. д.). Использование методов разборки экономически невыгодно из-за широкой номенклатуры боеприпасов и малого содержания в них «полезных» веществ [1].

Наиболее универсальным способом уничтожения является нагрев взрывчатого вещества внутри боеприпаса до температуры начала взрывчатого превращения, которая составляет 150–230 °С. Для уничтожения взрывателей предложены установки нагрева с использованием электрической дуги, лазера, газового, резистивного и индукционного способов [2, 3]. Общим недостатком всех установок является то, что они не имеют защиты от поражающих факторов взрыва и предназначены для уничтожения узкой номенклатуры боеприпасов с максимальной массой взрывчатого вещества не более 0,05 кг в тротиловом эквиваленте.

Для реализации промышленной технологии уничтожения мелкокалиберных

*Павел Александрович Баскаков, ведущий инженер-конструктор, аспирант.
Александр Борисович Кувалдин (д.т.н., проф.), профессор.*

боеприпасов оборудование должно обеспечивать полное и гарантированное уничтожение боеприпасов, содержащих различные взрывчатые материалы с массой до 0,7 кг в тротиловом эквиваленте, иметь возможность полной автоматизации процесса уничтожения, обладать высоким эксплуатационным ресурсом, энергоэффективностью, взрыво- и коррозионнотойкостью.

При разработке нагревателя, отвечающего заданным требованиям, рассматривались различные способы нагрева и в результате предложен индукционно-резистивный нагреватель (ИРН) со сменным локализатором (рис. 1). Основное отличие ИРН от существующих аналогов заключается в том, что нагрев боеприпаса осуществляется внутри локализатора за счет теплопередачи. Для этого локализатор выполнен в виде трубы из ферромагнитной стали, во внутреннее отверстие которой помещается уничтожаемый боеприпас. Снаружи локализатор охватывает многослойная обмотка, при этом его нагрев происходит индукционным полем и резистивным теплом, выделяющимся в обмотке. Из-за невозможности использования традиционных высокотемпературных (до 400 °С) обмоточных проводов при интенсивных динамических нагрузках и воздействии коррозионно-активных сред для обмотки выбран жаростойкий кабель с минеральной изоляцией и защитной оболочкой из нержавеющей стали.

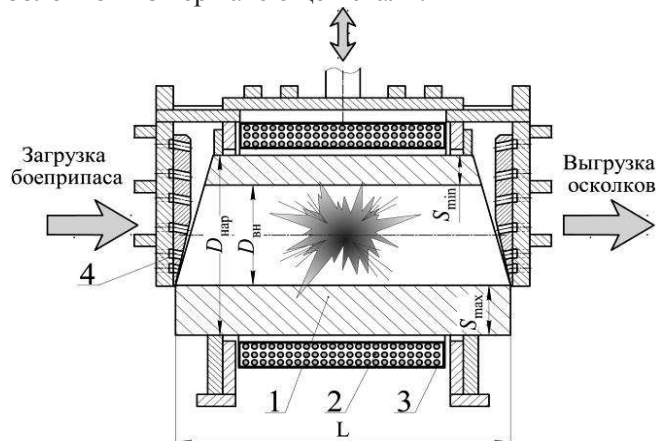


Рис. 1. Индукционно-резистивный нагреватель:
1 – локализатор; 2 – обмотка; 3 – кожух; 4 – отбойник

Локализатор сдерживает поражающие факторы взрыва, к которым относятся ударная и детонационные волны, высокоскоростные осколки, и тем самым защищает обмотку от разрушения. Для предотвращения разлета осколков из локализатора предусмотрен отбойник с возможностью вертикального перемещения, который опускается при загрузке боеприпаса в локализатор. При многократном уничтожении боеприпасов происходит постепенный износ локализатора, поэтому он выполнен сменным.

На основании анализа различных материалов для локализатора выбрана жаропрочная сталь 15ХМ, которая имеет хорошие магнитные свойства и при дополнительной термообработке приобретает высокие механические свойства, а за счет легирования молибденом обладает коррозионной стойкостью при температурах до 500 °С.

С целью уничтожения широкой номенклатуры боеприпасов выбраны следующие размеры локализатора: длина $L = 700$ мм, наружный $D_{нар} = 430$ мм и внутренний $D_{вн} = 250$ мм диаметры. Для увеличения ресурса локализатора он выпол-

нен с переменной толщиной стенок – максимальной $S_{\max} = 120$ мм в месте наибольшего разрушения под боеприпасом и наименьшей $S_{\min} = 60$ мм с противоположной стороны.

Экспериментально установлено [4], что для полного уничтожения боеприпасов ИРН температура внутри локализатора должна составлять 450 ± 20 °С, при этом перепад температуры по длине не должен превышать 40 °С. Перегрев локализатора выше 500 °С недопустим, так как ведет к снижению прочностных свойств материала и быстрому его разрушению.

Проектирование ИРН включает определение не только конструктивных параметров, таких как внутренний и внешний диаметр, длина обмотки, количество слоев, но и мощности, тока и напряжения в обмотке, коэффициента мощности. Кроме того, необходимо разработать систему регулирования температуры и исследовать режимы работы ИРН. Анализ всех вопросов одновременно невозможен, требуется многократное уточнение параметров при более детальном рассмотрении различных аспектов.

Реализация такой нестандартной конструкции ИРН требует решения ряда задач, связанных с исследованием взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в локализаторе и обмотке. Сложность моделирования электротепловых процессов обусловлена неоднородной составной структурой обмотки, различными условиями теплообмена, наличием внутренних источников тепла, неравномерно распределенных по объему локализатора. Моделирование процесса сводится к решению двух взаимосвязанных задач – электромагнитной и тепловой, которые описываются дифференциальными уравнениями Максвелла и Фурье соответственно. Решение системы уравнений для конкретной модели может быть осуществлено программно с использованием программного комплекса ANSYS.

Задача рассматривается в нелинейной постановке. Основными причинами нелинейности модели являются: зависимость электро- и теплофизических свойств материалов от температуры и напряженности электромагнитного поля; сложный характер теплообмена, т. е. одновременное протекание процессов радиационного, конвективного и кондуктивного.

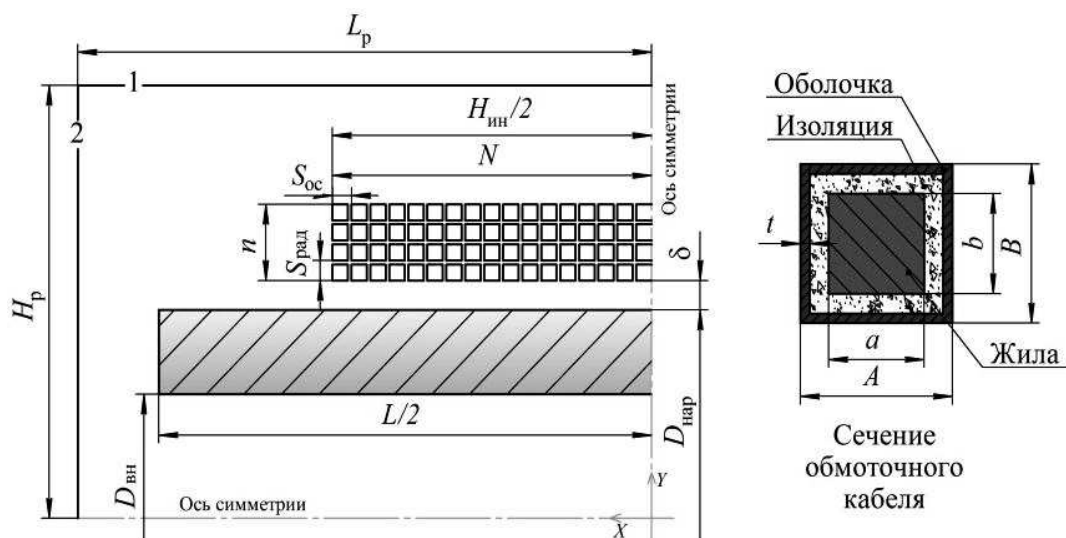


Рис. 2. Расчетная модель ИРН с многослойной обмоткой

Расчетные модели (рис. 2) для электромагнитной и тепловой задач выполнены одинаковыми и представляют собой двухмерную область с локализатором и обмоткой, симметричную относительно оси вращения X и оси Y , проходящей через центр масс локализатора. При решении электромагнитной задачи переменная толщина стенок локализатора не учитывалась, так как она намного больше глубины проникновения электромагнитной волны в материал. Для учета распределения температуры по толщине локализатора тепловая задача решалась при разных толщинах стенки.

В электромагнитной задаче приняты допущения: расчет выполняется для первой гармоники тока, электромагнитное поле принимается квазистационарным, не учитываются потери на гистерезис при нагреве ферромагнитных тел, в расчете не учитывается влияние выводов обмотки и защитного кожуха.

В модели задавались экспериментально полученная кривая намагничивания $B(H)$ закаленной стали 15ХМ и магнитная проницаемость ($\mu = 2,5$) оболочки кабеля, а также зависимости удельного электрического сопротивления $\rho(t)$ от температуры. Теплофизические свойства материалов задавались функциями температуры, полученными аппроксимацией справочных данных. В электромагнитной модели задавались следующие граничные условия (см. рис. 2): на границах расчетной области 1, 2 – условие Дирихле $A = 0$; на осях симметрии X, Y – условие Неймана $\partial A / \partial n = 0$. В тепловой модели задавались: граничное условие первого рода – начальная температура в модели, равная $20\text{ }^\circ\text{C}$, второго рода – условие равенства производной температуры по нормали к плоскостям симметрии, третьего рода – коэффициент черноты $\varepsilon = 0,93$ для лучистого теплообмена и коэффициент конвективной теплоотдачи, полученной при решении газодинамической задачи естественной конвекции в *ANSYS CFX* [5]. Анализ изменения коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры $\alpha = f(T)$, выявил, что в локализаторе можно выделить четыре области (рис. 3) с одинаковыми условиями теплоотдачи: внутренняя поверхность (4), торцы (3), центральная часть (1), охваченная индуктором, и края (2).

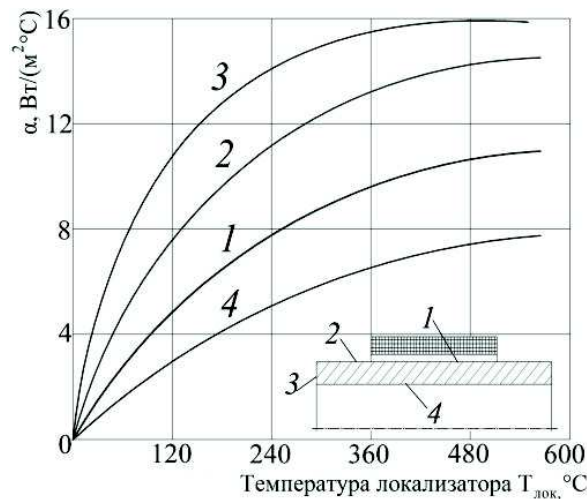


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры локализатора

Поиск оптимальной конструкции ИРН сопряжен с исследованием влияния многих факторов, таких как геометрические размеры обмотки и провода, элек-

трофические свойства материалов и т. д. Для упрощения процедуры создания модели в среде *Borland Delphi 6* разработана подпрограмма *MultilayerCoil*, позволяющая создавать расчетную модель по заданным геометрическим параметрам обмотки и локализатора. Подпрограмма генерирует командный файл, который передается в программу *ANSYS* для вычислений, на основании полученного файла результатов вычисляет потери, активную, реактивную мощности в каждом витке обмотки для жилы и оболочки провода в отдельности (рис. 4).

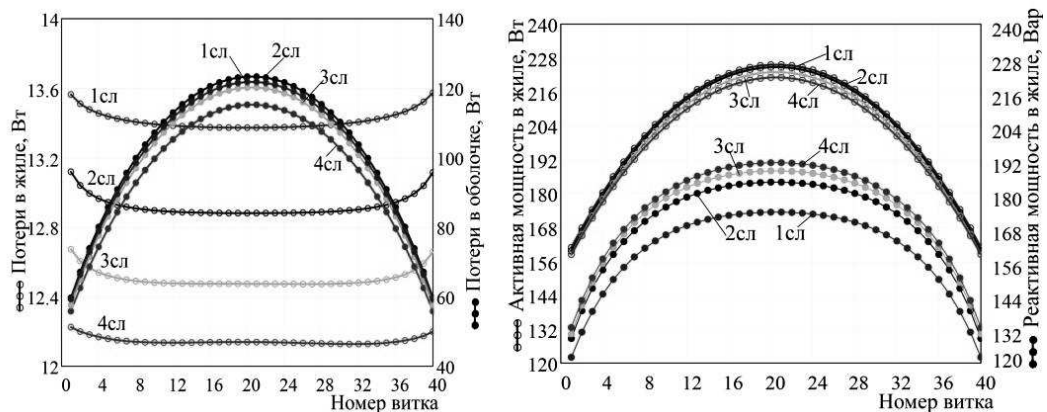


Рис. 4. Потери в оболочке и жиле провода (слева), реактивная и активная мощность (справа) в каждом витке многослойной обмотки

Как показали расчеты, электрический КПД нагревателя составляет $\eta_{эл} = 0,45$, что говорит о том, что половина потребляемой энергии идет на потери в жиле и нержавеющей оболочке провода, при этом суммарные потери в оболочке в 10 раз больше, чем в жиле. Однако эти потери идут на дополнительный нагрев локализатора, и тепловой КПД нагревателя составляет $\eta_{т} = 0,65$. Положительным моментом использования данного провода является высокий $\cos \varphi = 0,78$, что не требует использования в системе питания устройств компенсации реактивной мощности.

Исследования показали, что для достижения данных энергетических параметров лучше всего подходит обмотка с четырьмя слоями (рис. 5, а) при питании от промышленной сети частотой 50 Гц (рис. 5, б). Оптимальными параметрами питания являются: в режиме нагрева локализатора сила тока 110–130 А, в режиме поддержания температуры – 60 А при напряжении 250 В (рис. 5, в).

Оценка влияния конструкции обмоточного провода на энергетические характеристики показала, что оптимальным является квадратное сечение провода размером 10 мм и площадью токоведущей жилы 36 мм², при этом толщина оболочки должна составлять 0,3–0,4 мм (рис. 5, г). Дополнительного увеличения энергетических показателей можно достигнуть применением вместо нержавеющей оболочки никель-хромовых сплавов, имеющих более высокое электрическое сопротивление (рис. 5, д).

Оптимальная ширина обмотки составляет 0,6–0,7 от длины локализатора (рис. 5, е), тем самым обеспечивается приемлемый перепад температуры по длине локализатора и максимальный электрический КПД. Установлено, что увеличение зазора между локализатором и обмоткой ведет к снижению КПД (рис. 5, ж), поэтому зазор должен составлять 15–20 мм для обеспечения оперативной замены изношенного локализатора после многократных подрывов.

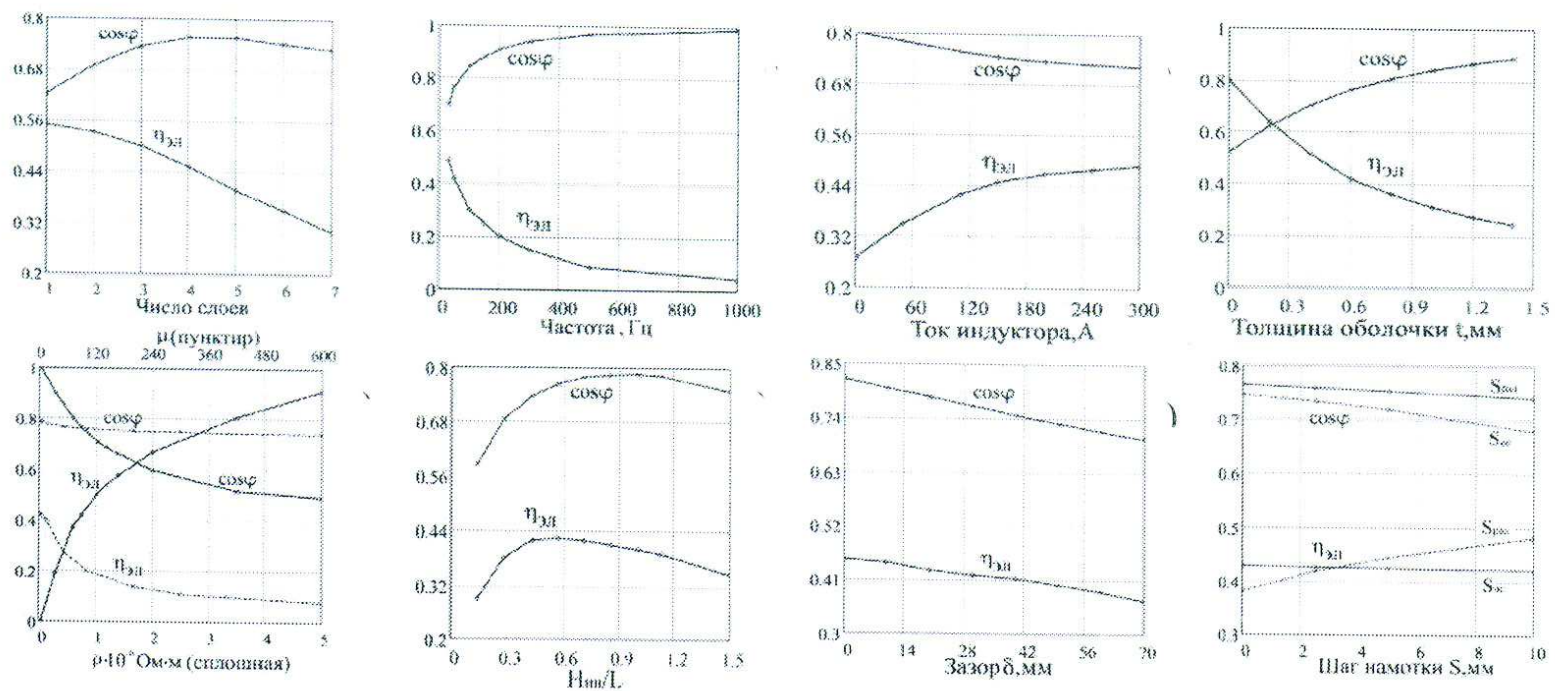


Рис. 5. Зависимости $\cos \varphi$ и $\eta_{эл}$ от количества слоев (а), частоты (б), тока (в), толщины оболочки (г), электрофизических свойств оболочки (д), ширины индуктора (е), зазора между локализатором и индуктором (ж), шага намотки (з)

Отмечено, что увеличение шага намотки кабеля в радиальном $S_{\text{рад}}$ и осевом $S_{\text{ос}}$ направлениях (рис. 5, з) ведет к снижению $\eta_{\text{эл}}$, поэтому шаг должен быть минимально необходимым $S_{\text{рад}} = S_{\text{ос}} = 2\text{--}3$ мм для прохода охлаждающего воздуха между витками.

Применение в ИРН внешнего магнитопровода нецелесообразно, так как ведет к снижению $\eta_{\text{эл}}$ за счет дополнительных потерь в самом магнитопроводе и возрастанию потерь в оболочке кабеля из-за увеличения плотности тока в крайних витках, кроме этого внешний магнитопровод усложняет конструкцию и увеличивает трудоемкость изготовления.

Исследования показали, что не все тепло, выделяющееся в обмотке, идет на нагрев локализатора. Поэтому для предотвращения ее перегрева необходимо дополнительное охлаждение, для которого лучше всего подходит сжатый воздух. Расчет параметров системы охлаждения показал, что для поддержания температуры обмотки 350 °С расход воздуха должен составлять 180 м³/час. Подача и распределение воздуха по слоям обмотки осуществляется с помощью системы коллекторов, выполненных из перфорированной трубки диаметром 10 мм. Для защиты обмотки от воздействия взрыва она размещена внутри герметичного защитного кожуха, внутри которого осуществляется циркуляция охлаждающего воздуха.

Поддержание постоянной температуры локализатора в процессе уничтожения боеприпасов и контроль за перегревом обмотки осуществляются при помощи двухконтурной системы регулирования с обратной связью по температуре (рис. 6). Аналоговый канал служит для регулирования мощности, подводимой к обмотке, пропорционально температуре локализатора, релейный – для отключения питания обмотки при ее нагреве выше 350 °С. Измерение температуры обмотки и наружной поверхности локализатора осуществляется контактными датчиками температуры.

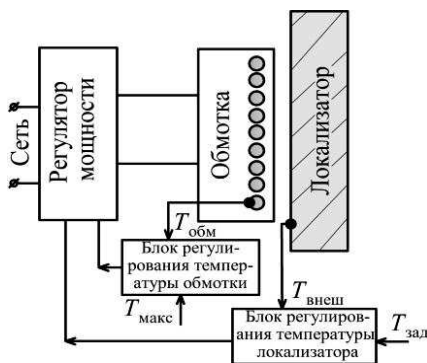


Рис. 6. Структурная схема системы регулирования

Для исследования электрических и тепловых параметров ИРН и режимов его работы разработан испытательный стенд (рис. 7), включающий ИРН, систему регулирования температуры, систему воздушного охлаждения, включающую компрессор ВК-20А и блок подготовки воздуха, систему замера электрических (анализатор Qualistar Plus С.А. 8335) и тепловых параметров (датчики температуры ДТКк, тепловизор FLIR T250, пирометр Fluke66).

С использованием стенда получены данные об изменении электрических параметров ИРН, таких как ток, напряжение, мощность, коэффициент мощности в процессе нагрева. Тепловыделение в обмотке определялось методом калориметрирования с использованием данных о расходе, начальной и конечной температурах охлаждающего воздуха. Изучены зависимости нагрева локализатора с переменной толщиной стенок, расчетные и экспериментальные графики нагрева локализатора представлены на рис. 8.

С использованием стенда получены данные об изменении электрических параметров ИРН, таких как ток, напряжение, мощность, коэффициент мощности в процессе нагрева. Тепловыделение в обмотке определялось методом калориметрирования с использованием данных о расходе, начальной и конечной температурах охлаждающего воздуха. Изучены зависимости нагрева локализатора с переменной толщиной стенок, расчетные и экспериментальные графики нагрева локализатора представлены на рис. 8.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных приведены в таблице. Сопоставление интегральных параметров ИРН, полученных на стенде, с

параметрами, полученными при моделировании, подтверждает высокую точность численного расчета, погрешность которого не превышает 10 %. Данная погрешность определяется допущениями, принятыми при моделировании.

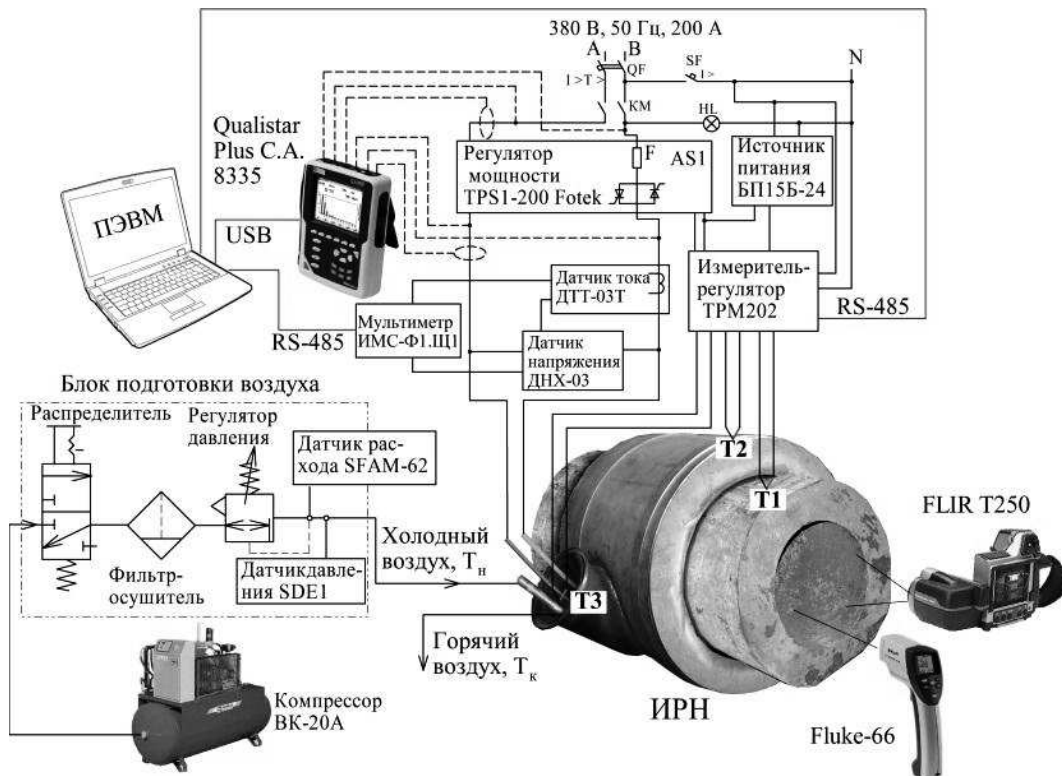


Рис. 7. Схема испытательного стенда

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных

Параметр	Эксперимент	Расчет
Ток в обмотке, А	125	118
Напряжение в обмотке, В	255	247
Время нагрева, ч	9	9,1
Активная мощность, кВт	24,5	25,2
Полная мощность, кВА	32,3	33,7
Электрический КПД	0,42	0,45
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,78	0,76
Тепловыделение в обмотке, кВт	9,3	9,0

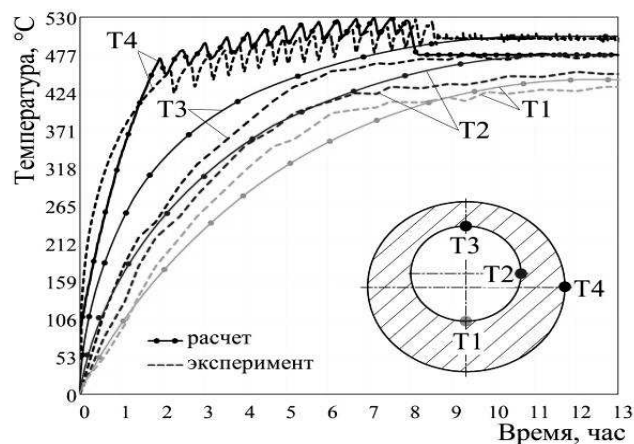


Рис. 8. Экспериментальные и расчетные графики нагрева локализатора в разных точках

На стенде проведены ресурсные испытания ИРН на стойкость к многократным подрывам. В результате подтверждено, что ИРН обеспечивает полное уничтожение боеприпасов с производительностью 5–6 шт/час. Экспериментально определенный ресурс локализатора составляет 5000 боеприпасов с массой взрывчатого вещества 0,1 кг, 2000 – с 0,4 кг и 300 – с 0,7 кг. Обмотка практически не подвержена воздействию взрывных нагрузок, поэтому ее ресурс составляет более 10000 подрывов.

На ИРН разработана конструкторская и технологическая документация, отработана технология изготовления. Для автоматизированного уничтожения боеприпасов на базе ИРН разработана установка уничтожения, на которую получен патент РФ [6].

Заключение

По результатам обзора выявлено, что существующие устройства не позволяют уничтожать боеприпасы с массой взрывчатого вещества до 0,7 кг из-за отсутствия защиты от взрыва. Предложена конструкция ИРН со сменным локализатором и многослойной обмоткой из провода с оболочкой из нержавеющей стали. Определены наиболее подходящие конструктивные параметры обмотки и провода, а также сила и частота тока, пропускаемого по обмотке. Эти параметры были выбраны исходя из соображений получения наибольшего КПД и $\cos \phi$. Управление температурой локализатора и обмотки осуществляется с использованием двухконтурной системы регулирования с обратной связью по температуре.

Экспериментально изучены электрические, тепловые параметры и режимы работы ИРН, определен ресурс работы локализатора при многократных подрывах. Работоспособность и эффективность ИРН подтверждена промышленной эксплуатацией на трех объектах по уничтожению химического оружия, где уничтожено более 80 000 реальных боеприпасов. Универсальность термического способа инициирования и конструкции ИРН позволяет уничтожать широкую номенклатуру боеприпасов и их составных частей, содержащих до 0,7 кг взрывчатых веществ, порохов и продуктов спецхимии в тротиловом эквиваленте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каталог технологического оборудования утилизации боеприпасов и переработки освобождаемых материалов / В.П. Винников, В.П. Глинский, В.С. Завьялов, Б.В. Мацевич. – ФГУП «КНИИМ», 2010. – 155 с.
2. *Довбыш В.Н.* Математическое моделирование системы индукционного нагрева линии по уничтожению взрывателей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2002. – № 16. – С. 184-187.
3. *Калашиников В.В., Данилушкин А.И., Мушкаев М.И., Пивоваров А.В.* Уничтожение взрывателей // Тезисы докл. 2-й Российской науч.-техн. конф. «Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов», г. Красноармейск, 1996. – С. 18.
4. *Баскаков П.А.* Исследование режимов нагрева боеприпаса, обеспечивающих его полное уничтожение // Тр. XV Всеросс. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – С. 61-65.
5. *Баскаков П.А., Кувалдин А.Б., Затрубщиков Н.Б.* Разработка и исследование индукционно-резистивного нагревателя // Вестник МЭИ. – 2014. – № 4. – С. 41-48.
6. Взрывозащитная локализирующая камера многоразового использования для уничтожения неразборных боеприпасов: Пат. RU 145207 U1:МПК F42В 33/00, 33/06/ Баскаков П.А. и др.; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2015 г.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INDUCTION-RESISTANCE HEATER FOR THE DESTRUCTION OF SMALL-CALIBER AMMUNITION

P.A. Baskakov¹, A.B. Kuvaldin²

¹OJSC “Scientific-Research Institute of Mechanization of Krasnoarmeysk”
8, Prospekt Ispytateley, Krasnoarmeysk, Moscow Region, 141292, Russia

²National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
14, Krasnokazarmennaya, Moscow, 111250, Russia

The results of study induction-resistance heater for destroying small-caliber ammunition using mathematical modeling coupled electromagnetic and thermal processes. Using specific winding wire with a stainless steel shell requires selecting the most optimal aspect ratio and parameters of a multi-layer wire winding, providing the required parameters for a stable heat localizer destruction of ammunition. The geometry of the structure and the presence of non-linear functions in the distribution of electromagnetic and thermal fields do basic research tool numerical models that were given in order to simplify two-dimensional formulation.

Key words: *induction-resistance heater, the destruction of ammunition, blast suppressor, multilayer coil, mineral insulated stainless steel sheathed cable.*

*Pavel A. Baskakov, Lead Design Engineer.
Alexander B. Kuvaldin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*