

А.Г.АНДРЕЕВ, канд.техн.наук, доцент НТУ «ХПИ»;
А.В.ЩЕПКИН, науч.сотр., НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРЯДКИ ДЕТОНАТОРОВ ПУТЕМ ИХ НАГРЕВА С ПОМОЩЬЮ ИНУ

Робота присвячена розробці методу утилізації детонаторів артилерійських снарядів шляхом їхнього нагрівання до температури не нижче 300°. Для цього детонатори розміщують у ємність з немагнітного матеріалу й нагрівають за допомогою індукційно-нагрівального пристрою. Технологічний режим повинен забезпечувати оптимальні витрати енергії при дотриманні температурних і часових вимог.

The work is devoted to development of method of shell detonator unloading by their heating to temperature not below 300°. For this purpose detonators place in a capacity from a unmagnetized material and heat up by approach of inductive-heating device. The technological mode should ensure the optimum costs of energy and observance of temperature and temporary conditions.

Актуальность темы. Происходящие в последние годы инциденты на складах боеприпасов, оставшихся на территории Украины после распада СССР, требуют утилизации боеприпасов, срок хранения которых истек. В связи с этим возникает необходимость разработки таких способов утилизации, которые сочетали бы ряд требований, среди которых – безопасность, экономичность, технологичность, эффективность.

Наиболее перспективным представляется использование нагрева изделий с помощью индукционно-нагревательных устройств [1, 2], которые обеспечивают высокую экономичность, легко встраиваются в автоматическую линию, позволяют выдерживать требуемый температурный режим, достаточно экономичны.

Постановка задачи. Для утилизации детонаторов применяют их нагревание до температуры не ниже 300°. Детонаторы размещают в емкость цилиндрической формы из немагнитного материала и нагревают с помощью индукционно-нагревательного устройства (ИНУ). Технологический режим должен обеспечивать оптимальные затраты энергии при соблюдении температурных и временных условий. При этом следует учитывать, что размещение детонаторов случайным образом приводит к осложнению задачи обеспечения требуемой температуры во всех без исключения деталях.

Для решения температурной задачи был применен метод конечных элементов [3]. Поскольку предполагается, что в рассматриваемых деталях температура не зависит от окружной координаты θ , то для решения нестационарной температурной задачи удобно использовать уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{K}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где T – температура, K – коэффициент теплопроводности, Q – поток тепла от источника внутри тела (считается положительным, если тепло подводится к телу), ρ – плотность, c – удельная теплоемкость материала детали, t – время.

В качестве граничных условий может быть задана:

температура на некоторой части поверхности тела S :

$$T = T_S(S); \quad (2)$$

плотность теплового потока q на части поверхности тела S_1 :

$$K \frac{\partial T}{\partial r} l_r + K \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q = 0; \quad (3)$$

конвективный теплообмен на части границы S_2 :

$$K \frac{\partial T}{\partial r} l_r + K \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_0) = 0, \quad (4)$$

где q – поток тепла через поверхность тела (считается положительным, если тепло теряется телом), h – коэффициент теплообмена, T_0 – температура окружающей среды, l_r , l_z – направляющие косинусы между нормалью к поверхности и осями координат.

Функционал, связанный с уравнением (1) и граничными условиями (2)–(4) имеет вид [5]:

$$\begin{aligned} \chi = & \int_V \frac{1}{2} \left[K \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + K \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2T \left(Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] dV + \\ & + \int_{S_1} q T ds + \int_{S_2} \frac{h}{2} (T - T_0)^2 ds. \end{aligned} \quad (5)$$

Для решения вариационного уравнения использован МКЭ с применением тороидальных конечных элементов треугольного поперечного сечения с тремя узлами. В качестве неизвестной функции принята температура T . Если разбить тело на КЭ и проводить интегрирование по отдельным элементам, то процесс минимизации функционала приводит к следующей системе линейных алгебраических уравнений:

$$[C] \frac{\partial \vec{T}}{\partial t} + [K] \vec{T} = \vec{F}, \quad (6)$$

где $[C]$ – матрица демпфирования тела, состоящая из матриц демпфирования КЭ следующего вида:

$$[c^e] = \int_{V^e} \rho c [N]^T [N] dV = \frac{\pi \rho c \Delta}{30} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где Δ – площадь поперечного сечения КЭ в плоскости rz , матрица $[N]$ содержит функции формы, $[K]$ – матрица теплопроводности, состоящая из матриц для КЭ:

$$\begin{aligned} [k^e] &= \int_{V^e} [B]^T [D][B] dV^e + \int_{S_{23}} h[N]^T [N] dS_{23} = \\ &= \frac{\pi r_c K}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} + \frac{\pi h L_{23}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3r_2 + r_3 & r_2 + r_3 \\ 0 & r_2 + r_3 & r_2 + 3r_3 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

где r_c – центр тяжести поперечного сечения КЭ в плоскости rz . Второе слагаемое в (8) приведено для частного случая вычисления интеграла по поверхности КЭ между узлами 2, 3; L_{23} – расстояние между ними.

Вектор-столбец правых частей \vec{F} состоит из векторов для КЭ следующего вида:

$$\begin{aligned} \vec{f}^e &= \int_{V^e} Q[N]^T dV^e - \int_{S_{12}^e} q[N]^T dS_{12}^e + \int_{S_{23}^e} hT_0[N]^T dS_{23}^e = \\ &= \frac{\pi}{3} \left(\frac{Q\Delta}{2} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} - L_{12}q \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + L_{23}hT_0 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

Формула приведена для частного случая: поток тепла q действует между узлами КЭ 1,2; конвекция – между узлами 2,3, L_{12} , L_{23} – расстояние между соответствующими узлами в плоскости rz .

При решении стационарной задачи уравнение (6) приобретает вид:

$$[K]\vec{T} = \vec{F}. \quad (10)$$

При решении нестационарной задачи частная производная по времени заменяется ее конечно-разностным аналогом с применением центральной разностной схемы [5]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T^{(1)} - T^{(0)}}{\Delta t}, \quad (11)$$

откуда

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \vec{T}^{(1)} = \left(\frac{2}{\Delta t} [C] - [K] \right) \vec{T}^{(0)} + \vec{F}^{(0)} + \vec{F}^{(1)}, \quad (12)$$

где $\Delta t = t^{(1)} - t^{(0)}$ – шаг по времени, $\vec{T}^{(0)}$, $\vec{F}^{(0)}$, $\vec{T}^{(1)}$, $\vec{F}^{(1)}$ – векторы-столбцы температурных полей и правых частей уравнения (6) в момент времени $t^{(0)}$ и $t^{(1)}$ соответственно.

Также может быть использована конечно-разностная схема Кранка-Николсона, где вычисляются также производные по времени от \vec{T} . Предпо-

лагая, что

$$\frac{d\bar{T}^{(0)}}{dt} + \frac{d\bar{T}^{(1)}}{dt} = \frac{2(\bar{T}^{(1)} - \bar{T}^{(0)})}{\Delta t}, \quad (13)$$

получаем систему уравнений

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \bar{T}^{(1)} = [C] \left(\frac{2}{\Delta t} \bar{T}^{(0)} + \frac{d\bar{T}^{(0)}}{dt} \right) + \bar{F}^{(cp)}, \quad (14)$$

где $\bar{F}^{(cp)}$ – вектор-столбец правой части уравнения (10) в момент времени $(t^{(1)} - t^{(0)})/2$. Алгоритм этой схемы состоит в последовательном решении уравнения (14) и нахождении $d\bar{T}^{(1)}/dt$ из (13).

Для обращения матрицы и вычисления распределения температур применен метод квадратного корня [6], что учитывает ленточную структуру матрицы жесткости конструкции. Описанный алгоритм реализует программа на языке Fortran.

Схематический вид типичного поперечного сечения емкости с детонаторами представлен на рис. 1, разбивка на МКЭ – на рис. 2. Для упрощения расчета смежные в окружном направлении детонаторы условно представлены в виде одного тела тороидальной формы, но, поскольку распространение тепла происходит симметрично относительно оси вращения всей конструкции, такое изменение формы в окружном направлении не меняет распределение температур.

Источником тепла в детонаторах является электрический ток, создаваемый в поверхностном слое деталей переменным электромагнитным полем, которое возбуждается ИНУ. Для более точной имитации конвективных процессов между деталями, на КЭ были разбиты не только детонаторы и емкость, но и воздух между ними.

Разрядка детонаторов может быть также осуществлена путем их нагрева в металлической емкости (рис. 3), нагреваемой электрическим нагревателем.

Характеристики материала детонаторов и корпуса (использованы данные для стали):

- коэффициент линейного расширения $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹;
- плотность $\rho = 7800$ кг/м³;
- удельная теплоемкость $c = 460$ Дж/кг · град.;
- коэффициент теплопроводности $K = 50$ Вт/м · град.

Характеристики воздуха, использованные в расчете:

- плотность $\rho = 1,293$ кг/м³;
- удельная теплоемкость $c = 1004$ Дж/кг · град.;
- коэффициент теплопроводности $K = 0,026$ Вт/м · град.

Контактное сопротивление между деталями, деталями и корпусом при теплопередаче [4, 7] имитируется сниженным коэффициентом теплопроводности в КЭ вблизи зон контакта. Кроме того, между некоторыми деталями отсутствует контакт (см. рис. 1). Начальная температура всей конструкции

составляет 20 °С. Зона выделения тепла показана на рис. 1, при этом мощность потока тепла на боковой поверхности детонаторов постоянна, а на их верхней и нижней поверхностях уменьшается по линейному закону с удалением от ИНУ. Мощность потока тепла q задается, исходя из мощности ИНУ.

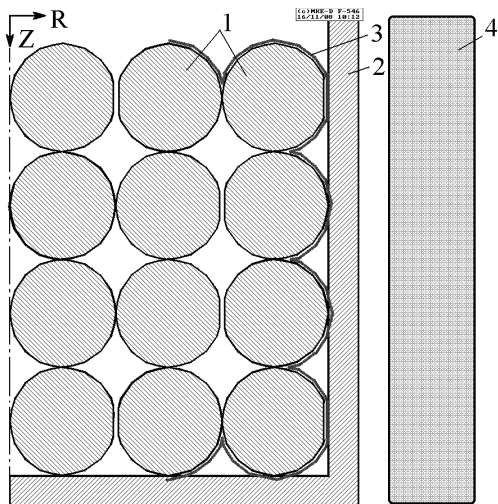


Рисунок 1 – Типичный вид поперечного сечения емкости (2), наполненной детонаторами (1), с зоной выделения тепла (3) с помощью ИНУ (4)

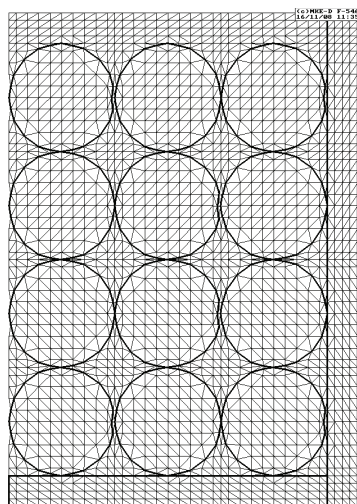


Рисунок 2 – Разбиение исследуемого объекта на КЭ

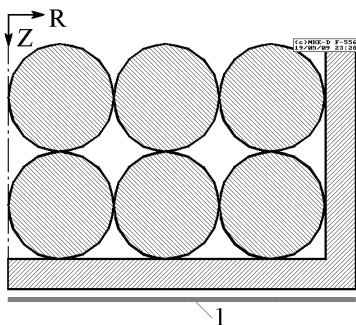


Рисунок 3 – Схема нагрева детонаторов с помощью электрического нагревателя

На рис. 4 представлены значения максимальных и минимальных температур в детонаторах в процессе их индукционного нагрева. Мощность нагрева составляет 5 кВт. Продолжительность нагрева составляет 17, 20, 23 мин. Необходимая температура в 300 °С достигается во всех деталей через 46, 32, 30 мин. соответственно. На рис. 5-7 показано распределение

температур в деталях при их нагреве в моменты времени 5, 10, 20 мин. с начала нагрева.

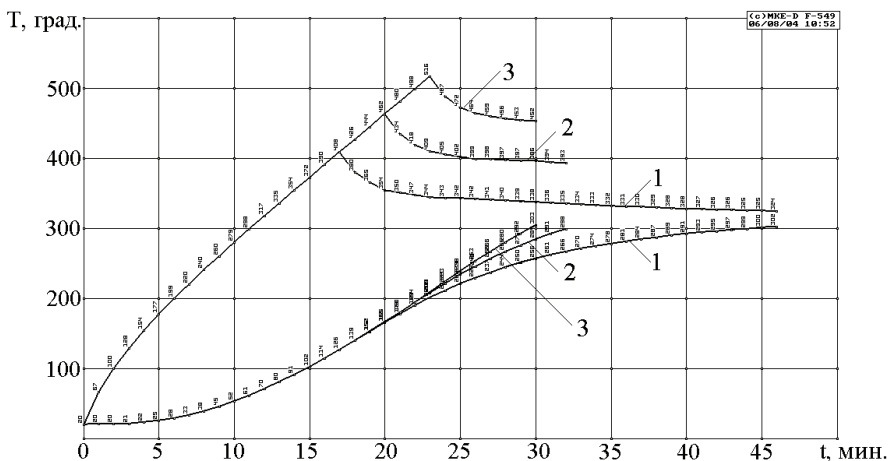


Рисунок 4 – Значения максимальных и минимальных температур в процессе индукционного нагрева деталей при мощности нагревания 5 кВт, продолжительность нагрева 17 мин. (1), 20 мин. (2), 23 мин. (3)

Если установлены ограничения по максимальной температуре, то нагрев деталей необходимо выполнять в несколько этапов. На рис. 8 представлены значения максимальных и минимальных температур в процессе индукционного нагревания деталей при мощности нагревания 10 кВт при наличии ограничения по максимальной температуре в 400 град. Нагрев выполняется в моменты времени 0–6,5 мин., 11,5–13 мин., 23–24 мин. с начала процесса.

Основные характеристики рассмотренных температурных режимов нагрева приведены в таблице.

На рис. 9 представлены значения максимальных и минимальных температур в детонаторах при использовании для нагрева электрического нагревателя мощностью 5 кВт. Начальная температура всей конструкции составляет 20 °С. Зона выделения тепла показана на рис. 3, мощность потока тепла q задается постоянной по всей зоне. Конвективное рассеивание тепла за пределы конструкции не учитывается.

Выводы. Было проведено исследование теплового состояния детонаторов при их нагреве индукционно-нагревательными устройствами до температуры не менее 300 °С с целью разрядки. Результаты расчета показали, что нагрев происходит вследствие действия электромагнитного поля на детонаторы, которые размещены вблизи индуктора, скорость нагрева может достигать 100 град./мин. Другие детали получают тепло вследствие теплопередачи от нагретых деталей и через корпус емкости из немагнитного материала с скоро-

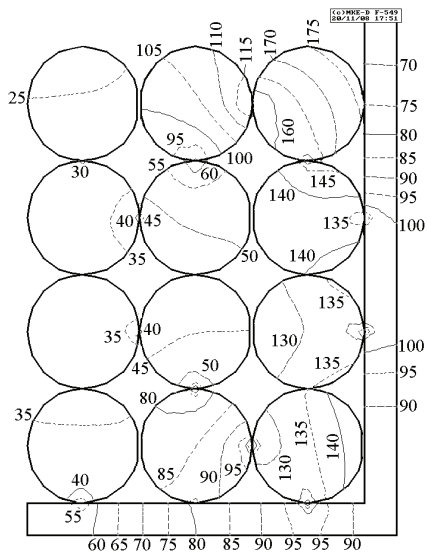


Рисунок 5 – Распределение температур в деталях в процессе индукционного нагрева деталей в момент времени 5 мин. с начала нагрева при мощности нагревателя 5 кВт

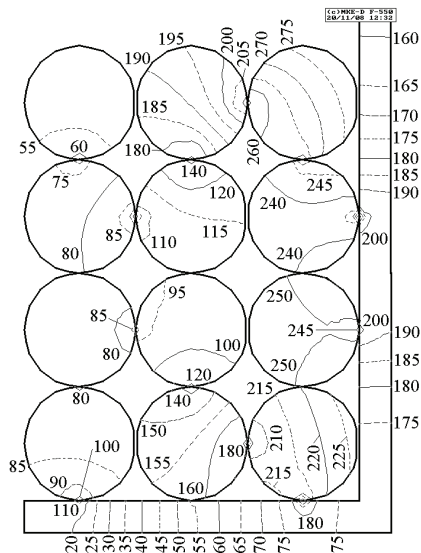


Рисунок 6 – Распределение температур в деталях в процессе индукционного нагрева деталей в момент времени 10 мин. с начала нагрева при мощности нагревателя 5 кВт

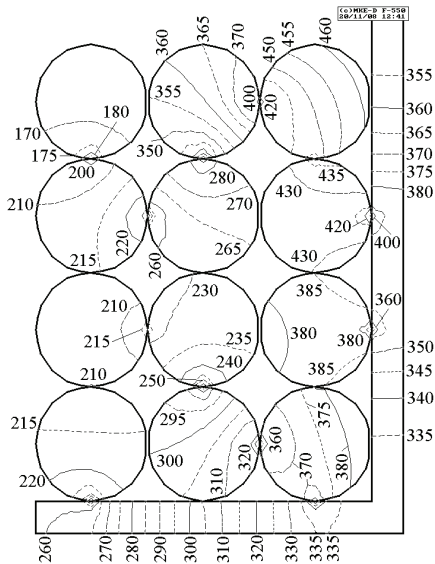


Рисунок 7 – Распределение температур в деталях в процессе индукционного нагрева деталей в момент времени 20 мин. с начала нагрева при мощности нагревателя 5 кВт

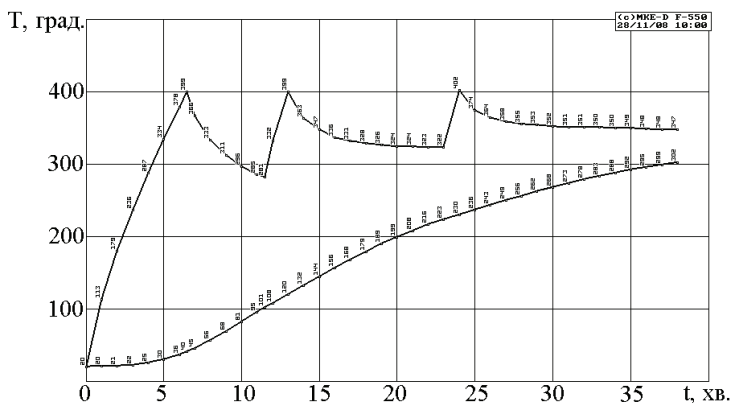


Рисунок 8 – Значения максимальных и минимальных температур в процессе индукционного нагрева деталей при мощности нагрева 10 кВт при наличии ограничения по максимальной температуре в 400 °С.

Основные характеристики температурных режимов нагрева детонаторов с применением ИДУ

Мощность нагрева, W , кВт	Общее время нагрева, мин.	Максимальная температура нагрева, град.	Общее время достижения минимальной температуры в 300 °С. во всех деталях, мин.	Количество циклов нагрева
5	17	408	46	1
5	20	462	32	1
5	23	516	25	1
10	9	500	33	1
10	11	576	24	1
10	9	402	38	3

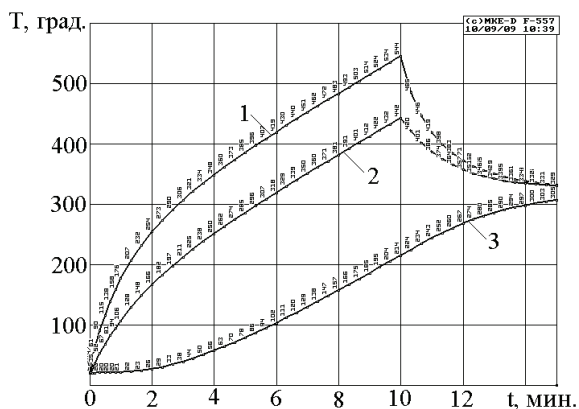


Рисунок 9 – Максимальная температура емкости с детонаторами (1), максимальные (2) и минимальные (3) температуры детонаторов в процессе их нагрева электрическим нагревателем мощностью 5 кВт

стью не более 20 град./мин. Время, нужное для нагрева всех деталей, зависит от установленной допустимой максимальной температуры и количества деталей, которые непосредственно не испытывают действие электромагнитного поля. Повышение мощности нагревателя не ускоряет процесс. Введение ограничения по максимальной температуре может привести к необходимости нагрева деталей в несколько этапов.

Ускорение процесса нагрева всех детонаторов возможно лишь при изменении формы емкости для деталей из цилиндрической на тороидальную. Такая форма емкости обеспечит нагрев большинства деталей непосредственно от действия электромагнитного поля. Полученные варианты расчета мощности нагревания позволяют создать реальное ИНУ для утилизации детонаторов.

Список литературы: 1. Простяков А.А. Индукционно-нагревательные установки. – М., 1970. 2. Некрасов А.С., Сияк Ю.В. Экономика энергетики процессов нагрева. – М., Энергия, 1965. 3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – Москва, Мир, 1975. – 541 с. 4. *Миллер В.С.* Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. – Киев: Наукова думка, 1966. – 164 с. 5. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М., Мир, 1979. – 392 с. 6. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. – М., Физматгиз, 1963. – 660 с. 7. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М., Энергия, 1971. – 235 с.

Поступила в редколлегию 07.07.2009