

# Математическая модель распределения электрической и тепловой энергий в рабочем элементе информационно-измерительной системы, предназначенной для исследования процесса инициирования промышленных взрывчатых веществ

Е.С. Кривченко<sup>1</sup>, А.С. Нечаев<sup>1</sup>, Ю.В. Мощенский<sup>1</sup>, О.А. Богачева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, Молодогвардейская 244, Самара, Россия, 443100

**Аннотация.** Использование чувствительных взрывчатых веществ для детонации основного заряда при перфорировании твердых слоев горных пород, сносе высотных и прочных сооружений и т.п. является неудобным и опасным способом инициирования. Это делает актуальной задачу разработки и внедрения альтернативных способов детонации взрывчатых веществ. Одним из таких способов является передача теплового импульса необходимой мощности посредством теплопроводности от металлического стержня взрывчатому веществу. Определение тепловой мощности импульса, необходимой для возникновения детонации, осуществляется путем косвенных измерений. Оценка выделяемого стержнем тепла стандартным методом является довольно грубой, не учитывает потери в местах контакта и пространственного распределения тепла в стержне в зависимости от параметров электрического импульса. В работе строятся математические модели формирования теплового поля в стержне, учитывающего указанные факторы. По результатам полученных моделей делаются численные расчеты для стержней различных размеров и сигналов различной формы и мощности. Результаты работы позволяют определить необходимые начальные и граничные условия для дальнейшего описания быстропотекающих тепловых процессов.

## 1. Введение

Бризантные взрывчатые вещества (ВВ) с каждым годом все чаще применяются в промышленности для решения разнообразных задач. К таким задачам относятся перфорирование твердых слоев горных пород в горнодобывающей, нефте- и газодобывающих отраслях [1-3], демонтаж высотных и прочных сооружений [4-6], сварка разнородных металлов [7-9] и т.д. Проведение указанных типов работ связано с высоким риском, в первую очередь из-за использования инициирующих ВВ, характеризующихся низкой стабильностью к внешним воздействиям. Поэтому весьма актуальной является задача разработки и внедрения альтернативных способов детонации бризантных ВВ, используемых на производстве.

Одним из способов детонации ВВ является метод, основанный на передаче веществу теплового импульса необходимой мощности от металлического стержня, который нагревается

благодаря протеканию через него высокоэнергетического электрического импульса. Каждому ВВ необходимо передать свою мощность для его детонации, значение которой является базовым при создании системы инициирования.

Мощность электрического импульса определяется значениями напряжения, тока и длительности пропускаемого импульса, которые могут быть непостоянными при протекании процесса и зависеть от ряда параметров (стабильности питания, начальной температуры рабочих элементов установки, неидеальности контактов). Электрический импульс формирует детонационную волну, которая инициирует ВВ. При этом важно знать минимальную энергию, которую необходимо передать веществу в течение фиксированного времени для его детонации, поскольку именно это значение является пороговым параметром при проектировании и наладке детонаторов, применяемых в различных практических задачах.

## 2. Постановка задачи

Определение минимального количества энергии, необходимой для детонации некоторого ВВ, осуществляется с помощью информационно-измерительной системы, функциональная схема которой представлена на рисунке 1 [10]. Генератор импульсов (ГИ) подает сигнал на трансформаторный блок, состоящий из первичной ( $n_1$ ) и вторичных обмоток ( $n_2, n_3, \dots, n_i$ ) и на вход АЦП. АЦП соединен с персональным ЭВМ (ПЭВМ), который фиксирует начальный импульсный сигнал с ГИ и сопоставляет его с измеренными сигналами в системе. С вторичных обмоток трансформатора электрический импульс поступает в рабочий элемент, состоящий из прочного металлического корпуса 1, ВВ 2 и токопроводящего металлического стержня 3, выполненного из нихрома. Активные элементы сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  служат делителями напряжения, для преобразования электрического сигнала, поступающего с рабочего элемента на АЦП. Сопротивление  $R_{ш}$  выполняет роль шунта.

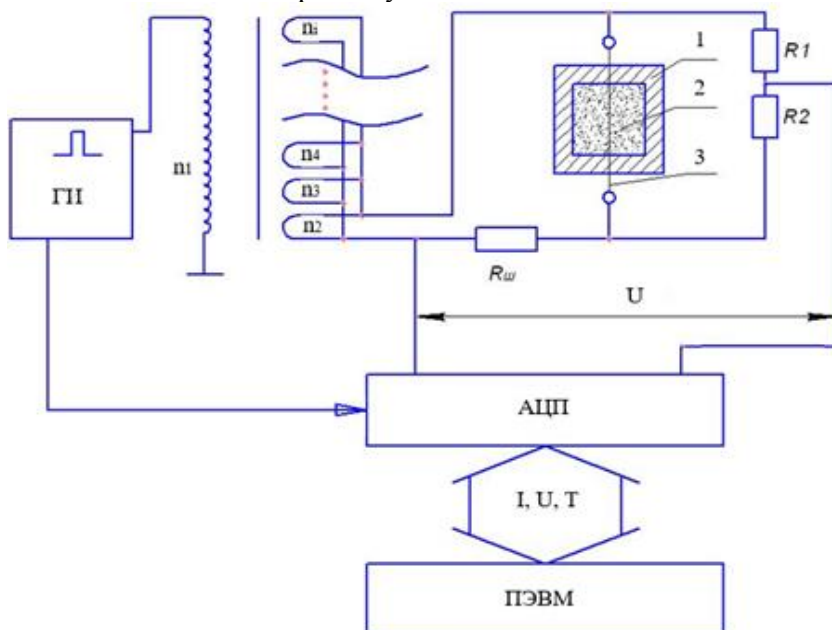


Рисунок 1. Функциональная схема информационно-измерительной системы.

Определить тепловую энергию, переданную нагревательным элементом взрывчатому веществу для его детонации, можно только косвенным путем, измеряя напряжение и ток электрического сигнала, проходящего через металлический стержень рабочего элемента. Измерив с достаточной точностью параметры электрического сигнала, с помощью закона Джоуля-Ленца можно определить тепловую энергию, выделенную металлическим проводником в рабочем элементе системы. Полученные данные позволят получить оценку условий детонации для используемого в промышленности ВВ. Однако, как следует из источников [11-13], распределение электрического потока в проводнике при пропускании через

него короткого импульсного сигнала неравномерно, а, следовательно, возникает неравномерное распределение теплоты в стержне.

Кроме этого, возникают потери мощности электрического сигнала в местах контакта стержня и подводящего электрический сигнал проводника, вызванные неидеальностью контакта [14-16]. Данные потери выражаются в возникновении дополнительно сопротивления в местах контакта и выделения в них тепловой энергии, не участвующей в формировании детонационной волны.

Указанные выше факторы должны быть учтены в алгоритме обработки информационных сигналов при определении минимальных энергии и мощности теплового воздействия для детонации промышленных ВВ.

### 3. Моделирование

#### 3.1. Оценка потерь энергии сигнала в местах контакта

В месте контакта «проводник-нихромовый стержень» возникают потери, вызванные неидеальностью контактных площадок (рисунок 2) и наличием оксидной пленки на металле. Из-за образования пленок на торцевых поверхностях металлических тел и из-за того, что при сжатии двух проводников, обращенных друг к другу плоскими сторонами, касание осуществляется не по всей площади, а лишь по отдельным площадкам, ток течет не по всему сечению проводника. В этом случае реальное сопротивление в месте контакта  $R_{\omega}$  запишется, как показано на в уравнении (1):

$$R_{\omega} = \rho \frac{l}{S_{\omega}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала стержня;  $l$  – длина стержня;  $S_{\omega}$  – реальная площадь контакта.

Из формулы (1) очевидно, что для уменьшения потерь электрической энергии сигнала на тепло в месте контакта необходимо увеличить реальную площадь контакта. Это возможно сделать путем предварительной обработки поверхности места контакта, для снятия оксидной пленки и уменьшения шероховатости поверхностей.

Действенным способом увеличения площади  $S_{\omega}$  является приложение силы нажатия на контакт. Известно выражение для оценки сопротивления в месте контакта  $R_k$  при влиянии силы контактного нажатия. Данная зависимость отражена уравнением (2):

$$R_k = \frac{\rho \sqrt{\sigma}}{(0,102 F_k)^m}. \quad (2)$$

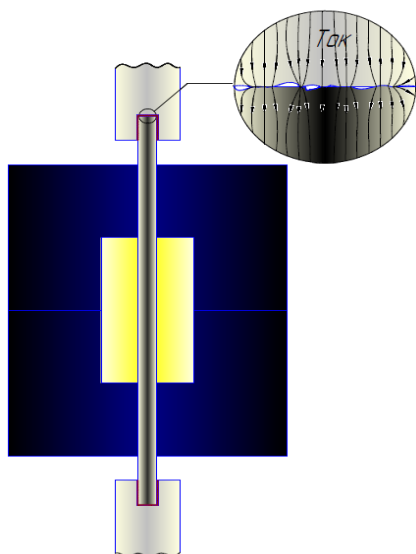
Здесь  $\sigma$  – временное сопротивление на смятие,  $F_k$  – сила сжатия,  $m$  – показатель степени, зависящий от формы контакта. В рассматриваемом случае  $m=1$ .

График зависимости нормированного сопротивления  $R_{Nk}$  в месте контакта от силы нажатия для поверхностного контакта нихромового стержня диаметром 0,3 мм, длиной 10 мм и временном сопротивлении на смятие 675 Н/мм<sup>2</sup> представлен на рисунке 3.

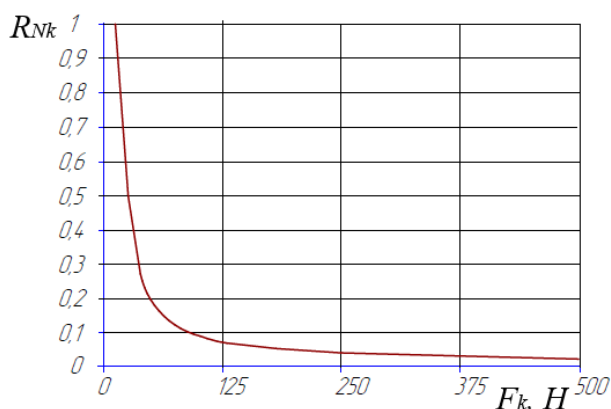
Влияние силы нажатия на формирование сопротивления в местах контакта является нелинейным. Температура в месте контакта  $T_k$ , при протекании через него электрического сигнала, нелинейно зависит от падения напряжения  $U_k$  на нем [17]. С учетом выражения (2), изменение температуры в месте контакта  $\Delta T_k$  можно представить в виде равенства (3):

$$\Delta T_k = \frac{I_k^2 \rho \sigma}{8\lambda (0,102 F_k)^{2m}}, \quad (3)$$

где  $I_k$  – ток, протекающий в месте контакта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.



**Рисунок 2.** Неидеальность контактной площадки «проводник-нихромовый стержень».



**Рисунок 3.** График зависимости нормированного сопротивления в месте контакта от силы нажатия.

### 3.2. Формирование теплового поля в стержне

Процесс передачи тепла от нихромового стержня ВВ в рабочем элементе информационно-измерительной системы описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах (выражение (4)), с начальными (уравнение 5) и граничными условиями 4 рода (уравнения (6)) [11,18]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (4)$$

$$T(r, 0) = T_0(r); \quad (5)$$

$$T_{st} = T_{vv}; q_{st} = q_{vv}. \quad (6)$$

Здесь  $\tau$  – временной параметр;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $r$  – радиальная координата нихромового стержня;  $T_0(r)$  – начальная температура стержня, которая в данной задаче формируется электрическим импульсом, протекающим по нему;  $T_{st}$  и  $T_{vv}$  – соответственно температуры на границе стержня и ВВ;  $q_{st}$  и  $q_{vv}$  – плотности теплового потока на границе стержня и ВВ, соответственно.

Уравнения (6) обеспечиваются условиями эксперимента, которые заключаются в требовании плотного прижатия ВВ к стержню металлическим корпусом. Начальные условия зависят от параметров электрического импульса и особенностей протекания его по нихромовому стержню.

Сигнал в проводнике распространяется неравномерно. Это объясняется наличием скин-эффекта, согласно которому плотность тока тем больше у границы проводника, чем выше частота электрического сигнала [10,19,20].

Для нихромового стержня, используемого в рассматриваемой информационно-измерительной системе, было определено распределение плотности тока на разных глубинах от поверхности при пропускании сигнала частотой 1 МГц. Результаты показали, что при радиусе 0,01 мм плотность тока по всему сечению одинакова, а с ростом радиуса стержня до 0,6 мм плотность тока в центре ниже того же параметра на границе на 60%.

Сигнал, проходящий через стержень, является импульсным и имеет широкий неравномерный по амплитуде диапазон частот. Амплитудный спектр сигнала  $A(f)$  определяется

длительностью импульса  $\tau_u$ , максимальным значением амплитуды  $A$ , которое можно менять для задания определенной энергии, передним и задним фронтами импульса:

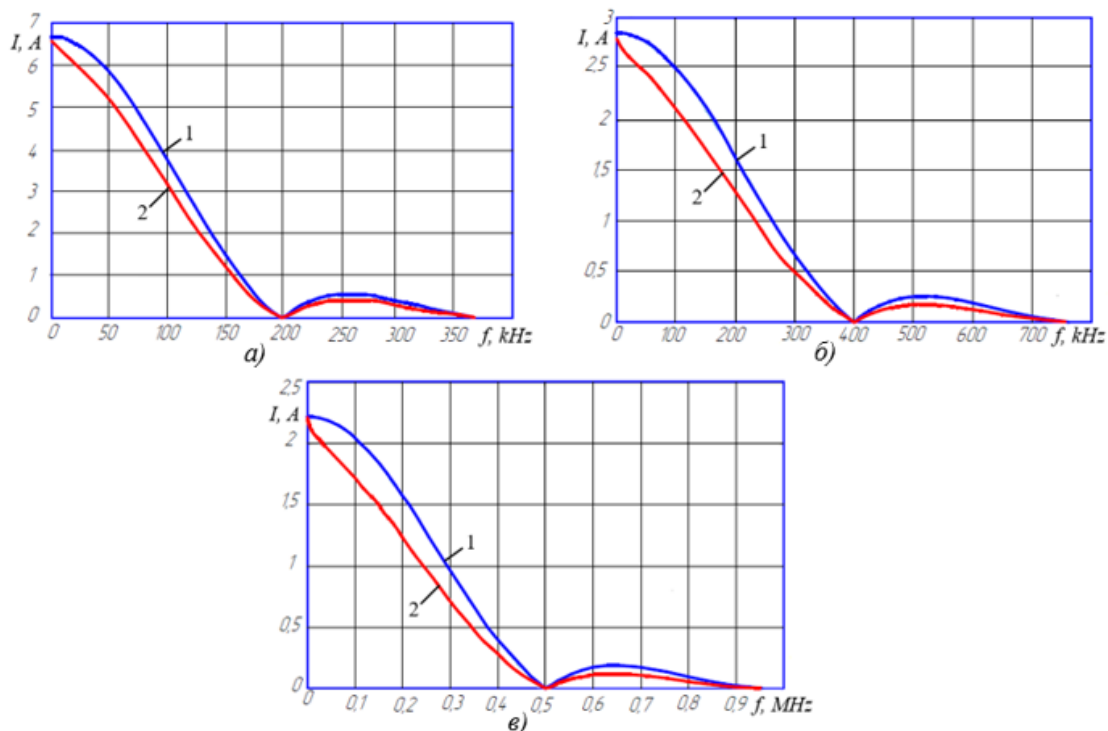
$$A(f) = \frac{2A\tau_u}{n} \text{sinc}(\pi f \tau_u / n) \text{sinc}(2\pi f \tau_u / n), \quad (7)$$

где  $n$  – коэффициент, зависящий от отношения длительности фронтов импульса и его длительности.

При математическом моделировании процесса формирования теплового поля в нихромовом стержне выбирались симметричные трапецеидальные импульсы с длительностью переднего и заднего фронтов равных 1/4, 1/8 и 1/10 от длительности всего импульса, равного 10 мкс. Амплитуды сигналов выбирались из условия равенства энергии подаваемого на вход рабочего элемента импульса 10 Вт·с. Также, учитывая наличие скин-эффекта при протекании короткого электрического импульса в нихромовом проводнике диаметром 0,3 мм, математическая запись амплитудного спектра примет вид:

$$A_r(f) = A(f) e^{-5,44\sqrt{2\pi f}}. \quad (8)$$

В результате моделирования были построены графики (рисунок 4) огибающих амплитудного спектра эффективной ширины частот сигнала на внешней границе стержня, и в его центре с учетом скин-эффекта. На рисунке 4, а) показаны огибающие спектра на границе стержня и в его центре при длительности фронтов импульса 1/4 от длительности импульса при максимальном значении тока в стержне 133,3 А. На рисунках б) и в) изображены аналогичные зависимости при длительности фронтов 1/8 от длительности импульса при максимальном значении тока 114,3 А и при длительности фронтов 1/10 от длительности импульса при максимальном значении тока 111,1 А, соответственно.



**Рисунок 4.** Графики огибающих амплитудных спектров на границе стержня (1) и в центре (2).

В результате анализа полученных зависимостей, с использованием выражения энергетического спектра [21], была определена разность теплот на границе стержня и в его центре с учетом тепловых потерь в месте контакта стержня и проводника по полученной зависимости:

$$\Delta Q = \int_0^{f_{\max}} |A_R(f) - A_0(f)|^2 df - a \frac{\partial T_r}{\partial r}, \quad (9)$$

где  $f_{\max}$  – верхняя частота эффективной ширины спектра;  $A_R(f)$  и  $A_0(f)$  – спектральные плотности сигнала на границе стержня и в его центре, соответственно. Второе слагаемое в правой части уравнения (9) отражает тепловые потери в местах контакта проводника и нихромового стержня при нагрузке их сжатия 500 Н. Для случая, изображенного на рисунке 4, а) разность теплот составила 0,744 Вт·с, для б) 0,367 Вт·с, для в) 0,309 Вт·с.

#### 4. Заключение

В ходе проделанных исследований была получена зависимость, учитывающая изменение температуры в месте контакта «проводник-нихромовый стержень», отражающая потери энергии электрического сигнала до его полезной работы в рабочем элементе информационно-измерительной системы. Также были получены математические модели и построены графики огибающих амплитудных спектров электрических симметричных трапецидальных импульсов, протекающих на границе и в центре проводника с учетом скин-эффекта. Полученная по результатам моделирования разность теплот на границе и внутри нихромового стержня при пропускании неидеальных электрических импульсов одинаковой энергии и длительности 10 мкс с фронтами от 10% до 25% от длительности импульса составляет от 3,1% до 7,4% от всей энергии сигнала. Это означает, что тепловой поток на границе раздела сред между нихромовым стержнем и ВВ больше, чем при допущении, что вся мощность электрического сигнала, подведенная к рабочему элементу системы, равномерно распределена по всему объему стержня.

Полученные в ходе моделирования результаты могут служить основой как для корректировки расчетов при определении чувствительности ВВ к тепловому воздействию, так и для создания системы регулирования параметрами блока инициирования ВВ при решении задач в различных областях промышленности.

#### 5. Литература

- [1] Borkowski, J. Application of sintered liners for explosively formed projectile charges / J. Borkowski, Z. Wilk, P. Kozlik, L. Szymanczyk, B. Zygmunt // *International Journal of Impact Engineering*. – 2018. – Vol. 118. – P. 91-97.
- [2] Liu, H. Oil well perforation technology: Status and prospects / H. Liu, F. Wang, Y. Wang, Y. Gao, J. Cheng // *Petroleum Exploration and Development*. – 2014. – Vol. 41(6). – P. 798-804.
- [3] Kohout, A. Review, identification and analysis of local impact of projectile hazards in the LNG industry / A. Kohout, P. Jain, W. Dick // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2019. – Vol. 57. – P. 304-319.
- [4] Lim, K.-M. Numerical Assessment of Reinforcing Details in Beam-Column Joints on Blast Resistance / K.-M. Lim, H.-O. Shin, D.-J. Kim, Y.-S. Yoon, J.-H. Lee // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2016. – Vol. 10(3). – P. S87-S96. DOI: 10.1007/s40069-016-0151-x.
- [5] Foglar, M. Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks / M. Foglar, M. Kovar // *International Journal of Impact Engineering*. – 2013. – Vol. 59. – P. 18-28.
- [6] Uenishi, K. PC-based simulations of blasting demolition of RC structures / K. Uenishi, H. Takahashi, H. Yamachi, S. Sakurai // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24(12). – P. 2401-2410.
- [7] Szachogluchowicz, I. Low cycle fatigue properties of AA2519–Ti6Al4V laminate bonded by explosion welding / I. Szachogluchowicz, L. Snizek, V. Hutsaylyuk // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 69. – P. 77-87.
- [8] Corigliano, P. Non linear finite element simulation of explosive welded joints of dissimilar metals for shipbuilding applications / P. Corigliano, V. Crupi, E. Guglielmino // *Ocean Engineering*. – 2018. – Vol. 160. – P. 346-353.

- [9] Chen, X. Bonding mechanism of explosive compaction–welding sintering / X. Chen, X. Li, X. Wang, H. Yan, K. Li, X. Zeng // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 46. – P. 1-15.
- [10] Кривченко, Е.С. Анализ процесса нагрева металлического стержня электрическими импульсами сверхмалой длительности / Е.С. Кривченко, А.С. Нечаев, А.Е. Маркелов // *Информационно-измерительные и управляющие системы: межвуз. сб. науч. статей*. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – Т. 1, № 17. – С. 81-88.
- [11] Богачева, О.А. Исполнительный блок измерительной системы определения чувствительности к высокомошному тепловому воздействию взрывчатого вещества / О.А. Богачева, А.С. Нечаев // *Наука Промышленность Оборона: Труды XX Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – Т. 2. – С. 18-22.
- [12] Василяк, Л.М. Методы измерения поглощенной энергии в электрических разрядах наносекундной длительности / Л.М. Василяк, А.В. Красночуб // *Электронная обработка материалов*. – 2013. – № 49. – С. 74-80.
- [13] Фридман, Б.Э. Скин-эффект в массивных проводниках электроимпульсных установок. Электромагнитное поле массивных проводников // *Журнал технической физики*. – 2002. – № 7. – С. 44-51.
- [14] Broue, A. Validation of Finite Element Structural Simulation for Ohmic Microcontact / A. Broue, S. Colin, D. Lerye, H. Liu, J. Martegoutte // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 25. – P. 419-422.
- [15] Presz, W. Planetary riveting of electric bimetallic micro-contacts / W. Presz // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 27. – P. 83-90.
- [16] Дмитриев, В.А. Нагрев сильноточных электрических контактов ударными токами короткого замыкания / В.А. Дмитриев, М.А. Павлейно, О.М. Павлейно, А.М. Чалый // *Электронная обработка материалов*. – 2013. – № 5. – С. 81-88.
- [17] Бурков, А.Т. Методы и устройства измерения термоэдс и электропроводности термоэлектрических материалов при высоких температурах / А.Т. Бурков, А.А. Касьянов, Т. Накама, Р.И. Пантелеев, А.И. Федотова // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2015. – № 2. – С. 173-195.
- [18] Николаев, Г.П. Теплофизика. Часть 2. Методы исследования тепловых характеристик веществ: учеб. пособие / Г.П. Николаев, А.Э. Лойко, А.В. Гоглачев – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – 103 с.
- [19] Фридман, Б.Э. Скин-эффект в массивных проводниках электроимпульсных установок. Электромагнитное поле массивных проводников / Б.Э. Фридман // *Журнал технической физики*. – 2002. – № 7. – С. 44-51.
- [20] Котельников, И.А. Скин-эффект в задачах: электронный учебник / И.А. Котельников, В.С. Черкасский – Новосибирск: Издательство НИУ НГУ, 2013. – 79 с.
- [21] Мощенский, Ю.В. Теоретические основы радиотехники. Сигналы: учебное пособие / Ю.В. Мощенский, А.С. Нечаев – СПб: Издательство "Лань", 2018. – 216 с.

# Mathematical Model of the Distribution of Electrical and Thermal Energy in the Working Element of an Information and Measurement System Designed to Study the Process of Initiating Industrial Explosives

E.S. Krivchenko<sup>1</sup>, A.S. Nechaev<sup>1</sup>, Y.V. Moshchenskij<sup>1</sup>, O.A. Bogacheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Molodogvardeyskaya 244, Samara, Russia, 443100

**Abstract.** The use of sensitive explosives to detonate the main charge during perforation of solid rock layers, demolition of high-rise and strong structures, etc. is an inconvenient and dangerous method of initiation. This makes it urgent to develop and implement alternative methods for detonating explosives. One of these methods is to transmit a thermal pulse of the required power by means of thermal conductivity from a metal rod to an explosive. Determination of the thermal power of the pulse required for the occurrence of detonation is carried out by indirect measurements. The rating allocated by standard heat rod method is pretty rude, does not account for losses at the points of contact and spatial distribution of heat in the core, depending on the electric pulse parameters. In this paper, mathematical models of the formation of a thermal field in the rod, taking into account these factors, are constructed. Based on the results of the obtained models, numerical calculations are made for rods of different sizes and signals of different shapes and power. The results of the work allow us to determine the necessary initial and boundary conditions for further description of fast-flowing thermal processes.