

УДК 614.849

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ИНДУКТОРА ПЕРЕНОСНОГО УСТРОЙСТВА ПРОГРЕВА ИНТУМЕСЦЕНТНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Цыганков Михаил Сергеевич

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье рассмотрен недостаток существующих методик проверки качества огнезащитной обработки металлических конструкций, в частности факт отсутствия полевого метода исследования огнезащитных вспучивающихся покрытий для металлических конструкций; представлен разработанный метод исследования вспучивающихся огнезащитных покрытий, и описаны характеристики используемого генераторного блока индукционного нагрева; проведены расчеты двенадцати вариаций индуктора, и представлен наилучший из них. Определено, что наиболее эффективным является индуктор, состоящий из двух последовательно соединенных катушек, цилиндрической на четыре витка и плоской на два витка. Рассчитана индуктивность оптимального индуктора, и установлено, что полученный результат не противоречит требованиям завода — изготовителя генераторного блока индукционного нагрева. Представлены результаты проведенных эмпирических исследований, которые хорошо коррелируют с теоретическими. Подтверждена эффективность выбранной оптимальной модели опытным путем. Предложены пути оптимизации прототипа устройства.

**Ключевые слова:** вспучивающиеся огнезащитные покрытия, индуктивность, индуктор, устройство проверки качества, пожарная безопасность

**Для цитирования:** Цыганков М. С. Определение оптимальной конфигурации индуктора переносного устройства прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий // Техносферная безопасность. 2025. № 3 (48). С. 4–12.

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE INDUCTOR OF A PORTABLE DEVICE FOR HEATING INTUMESCENT FLAME RETARDANTS

Mikhail S. Tsygankov

University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation  
State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The article considers the disadvantage of existing methods for checking the quality of flame-retardant treatment of metal structures, in particular, the fact that there is no field method for studying flame-retardant bulging coatings for metal structures. The developed method of studying bulging flame-retardant coatings is presented and the characteristics of the induction heating generator unit used are described. Calculations of 12 variations of the inductor are carried out and optimal results are presented. It is determined that the most effective is an inductor consisting of two coils connected in series, cylindrical for 4 turns and flat for 2 turns. The inductance of the optimal inductor is calculated and it is established that the result obtained does not contradict the requirements of the manufacturer of the induction heating generator unit. The results of empirical studies that correlate well with theoretical ones are presented. The effectiveness of the chosen optimal model has been confirmed experimentally. The ways to optimize the prototype of a device for quality control of flame-retardant treatment of metal structures are proposed.

**Keywords:** bulging flame retardant coatings, inductance, inductors, quality control device, fire safety

**For Citation:** Tsygankov M. S. Determination of the optimal configuration of the inductor of a portable device for heating intumescent flame retardants // Technospheric safety. 2025. № 3 (48). pp. 4–12.

## Введение

Вспучивающиеся огнезащитные покрытия, применяемые для повышения огнестойкости металлических конструкций, используются уже несколько десятков лет, они обладают всеми необходимыми характеристиками с точки зрения обеспечения пожарной безопасности на объекте защиты, а также уникальными эстетическими свойствами.

В научных трудах [1–5] достаточно подробно описаны актуальность проблемы отсутствия доступного полевого метода исследования вспучивающихся огнезащитных покрытий и обоснована необходимость его разработки. Автором статьи был разработан и запатентован потенциально полезный метод проверки качества огнезащитных покрытий, который может быть исполь-

зован в качестве полевого метода исследования [6]. Положительными сторонами разработанного метода являются отсутствие открытого пламени в ходе проведения исследований огнезащитного покрытия, а также наличие высокой температуры, необходимой для абсолютного вспучивания огнезащитного покрытия на всю глубину. Принцип двустороннего прогрева огнезащитного покрытия, в свою очередь, минимизирует теплоотвод через металлическую конструкцию от прогреваемой части покрытия, что приводит к значительному уменьшению времени проведения исследований.

Предложенный метод исследования огнезащитного покрытия базируется на явлении электромагнитной индукции. Так как при разработке прототипа устройства в качестве генераторного блока индукционного нагрева была использована готовая

конструкция индукционной плавильной мини-печи «Микроша-3000», разработанная и производимая компанией «НАША ЭЛЕКТРОНИКА», предназначенная для плавки цветных металлов и их сплавов в графитовом тигле, то отправной точкой в расчетах при разработке узла индуктора были исходные характеристики «Микроши-3000».

### Материалы и методы

На этапе планирования и проектирования автором статьи было проведено исследование характеристик устройства «Микроши-3000» и определена возможность использования его в качестве генераторного блока индукционного нагрева для прототипа устройства двустороннего прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий. При учете того, что термокамера выполнена из керамики внешним диаметром 16 мм, которая радиопрозрачна и термостойка, а стержнем может являться любая магнитная сталь максимально возможного диаметра, автором статьи было установлено, что удобнее всего выполнить индуктор из последовательно соединенных катушек в виде плоской спирали и цилиндрической катушки. В ходе исследования варьировалось количество витков каждой из катушек, так как их общая индуктивность суммируется, то распределение мощности по катушкам трудно предсказать, поэтому необходимо проводить эксперименты. Еще одним важным нюансом является тот факт, что если делать индукторы без теплового зазора, то раскаленной трубке будет некуда расширяться, но и большой зазор негативно скажется на коэффициенте полезного действия (КПД) устройства, т. к. максимальное КПД достигается на расстоянии не более 5 мм от индуктора, следовательно, керамическая

термокамера должна быть достаточно тонкой и в то же время выдерживать циклический нагрев до высоких температур.

Основными характеристиками генераторного блока индукционного нагрева, в соответствии с паспортом, является диапазон рабочих частот, который составляет 20–50 кГц, а также допустима индуктивность индуктора 0,4–0,8 мкГн, следовательно, для более точного расчета необходимо задаваться требуемой индуктивностью 0,4–0,5 мкГн.

В 1926 г. Честер Сноу [7, 8] осуществил успешную попытку создания реалистичной модели цилиндрической катушки с шагом намотки. Разработанная модель схожа с моделью Джеймса Максвелла, только витки в ней представлены не в виде бесконечно тонких круговых замкнутых проводников с током, а в виде бесконечно тонкого спирального проводника. Возможность рассчитать собственную индуктивность цилиндрической катушки с шагом намотки появилась при использовании концепции «геометрического среднего расстояния» Максвелла. Основываясь на результатах предыдущих исследований, Честер Сноу разработал математический метод расчета взаимоиндукции между двумя такими цилиндрическими проводниками, но расчетная формула Сноу была далека от совершенства. Лишь в 2011 г. Роберт Вивер [9], основываясь на методе Сноу, исправил эти недостатки и создал доработанный численный алгоритм расчета индуктивности однослойной катушки с произвольным шагом намотки.

Автором статьи был произведен расчет в приложении Coil64, в котором используется достаточно точный метод для расчета индуктивности однослойной цилиндрической катушки с любым числом витков и произвольным шагом намотки, основанный на алгоритме Роберта Вивера. Учитывая проектные

габариты устройства и необходимые выходные показатели, проводилась серия расчетов, варьировались диаметр каркаса, диаметр провода с изоляцией и без нее, шаг намотки, длина намотки, длина провода, количество витков, а по результатам были выбраны наиболее подходящие для реализации задуманного параметры.

На рис. 1 показана расчетная схема цилиндрической катушки с характеристиками для расчета. При выборе параметров:

- материал провода  $Mt$  = медь;
- число витков катушки  $N = 4$ ;

- частота  $f = 0,05$  МГц;
- диаметр каркаса  $D = 28$  мм;
- диаметр провода  $d = 6$  мм;
- диаметр провода с изоляцией  $k = 6,54$  мм;
- шаг намотки  $p = 7$  мм;
- длина провода без учета выводов  $l_w = 43,5$  см;
- длина намотки  $l = 34,5$  мм,
- индуктивность составила  $L = 0,389$  мкГн.

Но так как индуктор состоит из двух последовательно соединенных катушек, необходимо производить комплексный расчет для получения более точных результатов.

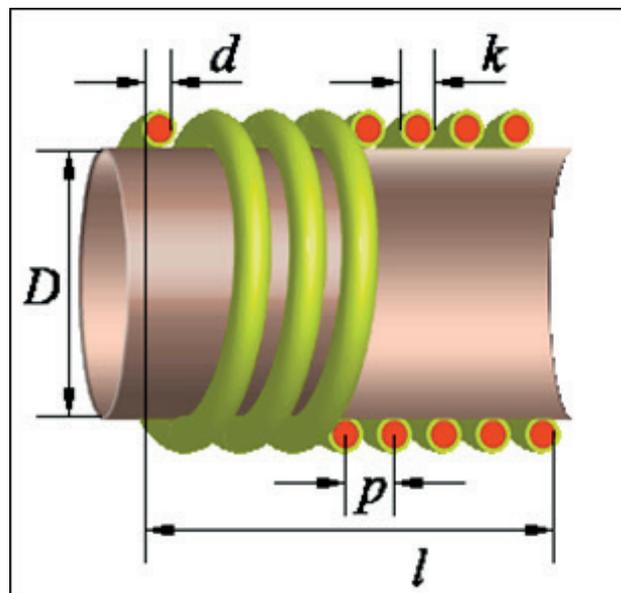


Рис. 1. Расчетная схема цилиндрической катушки

Fig. 1. Calculation scheme of a cylindrical coil

Автором работы был проведен расчет второй составляющей части индуктора, а именно расчет цилиндрической катушки в приложении Coil64, основой которого является расчет методом бесконечно тонких круговых нитей Максвелла. В своем трактате «Электричество и магнетизм» Максвелл теоретически предсказал существование электромагнитных волн и вывел формулу взаимной индукции между двумя бесконечно

тонкими замкнутыми соосными круговыми контурами с током, чем и создал фундаментальную базу для расчета индуктивности. В трактовке данного метода любая круглая катушка рассматривается как набор подобных нитей, в которой число колец соответственно равно числу витков катушки. Максвелл впервые показал, что индуктивность отдельного одиночного витка равна взаимной индукции двух виртуальных нитей

с одинаковым диаметром окружности, расположенных на определенном расстоянии. В случае если фигура поперечного сечения провода занимает определенную площадь, то берется среднегеометрическое расстояние между всеми точками поперечного сечения двух проводников, следовательно, расстояние при использовании круглого провода будет равно расстоянию между осями провода [10].

На рис. 2 показана расчетная схема плоской катушки с характеристиками для расчета. При выборе параметров:

материал провода  $Mt$  = медь;

число витков катушки  $N = 2$ ;

частота  $f = 0,05$  МГц;

внешний диаметр  $Do = 52$  мм;

внутренний диаметр  $Di = 28$  мм;

длина провода без учета выводов  $lw = 45,3$  см

индуктивность составила  $L = 0,044$  мкГн.

В ходе проведения исследований были рассчитаны двенадцать вариаций индуктора, в статье представлены расчеты оптимального варианта. Таким образом, если сконструировать индуктор, в который входит цилиндрическая катушка на четыре витка (с внутренним диаметром  $D = 28$  мм и индуктивностью  $L = 0,389$  мкГн) и плоская катушка на два витка (с внутренним диаметром  $Di = 28$  мм, внешним диаметром  $Do = 52$  мм, индуктивностью  $L = 0,044$  мкГн), то в сумме индуктивность индуктора будет равна  $L = 0,389 + 0,044 = 0,433$  мкГн, что соответствует показателю, рекомендованному заводом — изготовителем генераторного блока индукционного нагрева.

На рис. 3 показаны некоторые индукторы, примененные входе практического опыта.

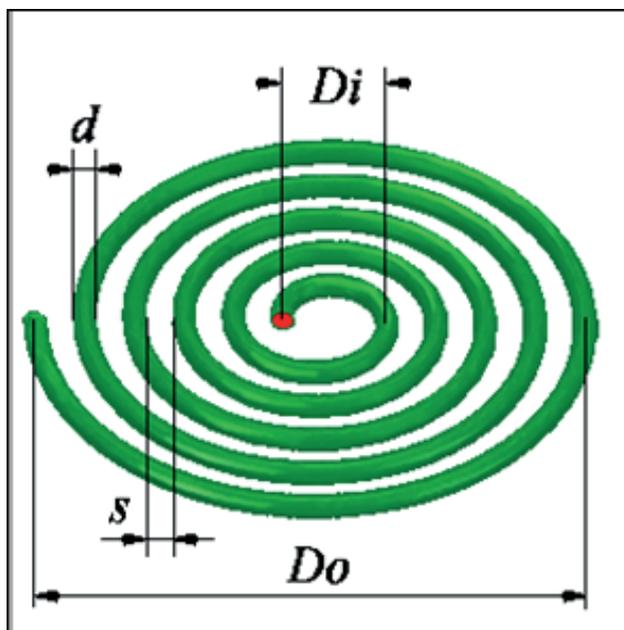


Рис. 2. Расчетная схема плоской катушки

Fig. 2. Calculation scheme of a flat coil



Рис. 3. Индукторы с наибольшей эффективностью

Fig. 3. Inductors with the highest efficiency

В результате проведенных практических опытов, в которых были применены индукторы с разным количеством витков в плоской и цилиндрической части, было установлено, что оптимальным решением стал индуктор,

изготовленный на два витка плоской катушки и четыре витка цилиндрической (рис. 3, поз. 1). На рис. 4 представлен результат вспучивания огнезащитного покрытия с использованием оптимальной конфигурации индуктора.



Рис. 4. Огнезащитное покрытие после проведенных испытаний

Fig. 4. Fire-resistant coating after the tests

Разработанный индуктор показал свою эффективность в ходе проведения практических опытов и может быть при-

менен в устройстве для двустороннего прогрева вспучивающихся огнезащитных покрытий.

### Заключение

Для проверки вспучивающегося огнезащитного покрытия крайне необходим полевой метод исследования вспучиваемости такого покрытия. В ходе разработки прототипа устройства, с помощью которого можно проводить исследования такого рода, автором статьи были проведены параллельные теоретические расчеты и практические испытания индукторов, которые являются фундаментальными узлами прототипа. Данные, полученные в ходе расчета, хорошо коррелируют с эмпирическими, что позволяет оптимизировать характеристики устройства.

В данной работе представлены результаты выбора варианта индуктора из двенадцати рассчитанных вариаций. Оптимальный вариант индуктора включает в себя две по-

следовательно соединенных катушки, цилиндрическую на четыре витка с внутренним диаметром 28 мм и плоскую на два витка с внутренним диаметром 28 мм. В индуктор такого формата легко поместится термокамера в виде керамической трубки наружным диаметром 27 мм. Проведенными практическими опытами установлена высокая степень корреляции результатов, следовательно, работоспособность рассчитанного индуктора подтверждена эмпирическим путем.

Для упрощения применимости разработанного прототипа устройства в труднодоступных местах, подверженных огнезащитной обработке, автором статьи планируется оптимизировать конструкцию устройства с точки зрения габаритных размеров, а также провести дополнительные испытания на огнезащитных покрытиях, отличающихся по своей химической природе.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цыганков М. С., Шедько А. М. Роль огнезащитных покрытий в крупнейших пожарах последних лет // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2024. № 2 (14). С. 74–79.
2. Цыганков М. С., Дурновцева П. В., Чернов А. А. Анализ тенденций развития термического анализа, применяемого для идентификации огнезащитной обработки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2024. Т. 3. С. 70–73.
3. Цыганков М. С., Шедько А. М. Проблема фальсификации на рынке огнезащитных составов для металлоконструкций // Современные проблемы обеспечения безопасности : сб. материалов XXVI Международной научно-практической конференции / ред. колл. М. В. Елфимова [и др.]. Екатеринбург, 2024. С. 123–128.
4. Павлович А. В., Дринберг А. С., Машляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. М., 2018. 488 с.
5. Intumescent coating and fire protection of steel structures / L. Guo-Qiang et al. Boca Raton, 2023. 172 p.
6. Патент № 2814877 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/02, C09D 5/18, H05B 6/02. Способ двустороннего высокотемпературного прогрева тонкослойных лакокрасочных покрытий (интумесцентных красок огнезащитного типа) : № 2023116726 : заявл. 23.06.2023 : опубл. 05.03.2024 / М. С. Цыганков // Google Patents : сайт. URL: <https://clck.ru/3Nukhx> (дата обращения: 03.05.2025).

7. Snow, Ch. Formula for the Inductance of a Helix Made With Wire of Any Section. URL: <https://clck.ru/3P2XwQ> (date of application: 26.03.2025).
8. Snow, Ch. A Simplified Precision Formula for the Inductance of a Helix with Corrections for the Lead-In Wires. URL: <https://clck.ru/3P2YCY> (date of application: 26.03.2025).
9. Weaver, R. The Inductance of a Helix of Any Pitch. URL: <https://clck.ru/3P2Yh5> (date of application: 26.03.2025).
10. Maxwell, J. C. To find M by Elliptic Integrals // A Treatise on Electricity and Magnetism / J. C. Maxwell. Dover, 1954. Vol. 2, Art. 701. pp. 338–340.

## REFERENCES

1. Tsygankov M. S., Shedko A. M. The role of fire-resistant coatings in the largest fires of recent years // Current security issues in the technosphere. 2024. № 2 (14). pp. 74–79.
2. Tsygankov M. S., Durnovtseva P. V., Chernov A. A. Analysis of trends in the development of thermal analysis used to identify flame retardant treatment // Interexpo Geo-Siberia. 2024. Vol. 3. pp. 70–73.
3. Tsygankov M. S., Shedko A. M. The problem of falsification in the market of flame retardants for metal structures // Modern problems of safety: Collection of materials of the XXVI scientific and practical International Conference. Yekaterinburg, 2024. pp. 123–128.
4. Pavlovich A. V., Drinberg A. S., Mashlyakovskiy L. N. Flame-retardant bulging paint and varnish coatings. M., 2018. 488 p.
5. Intumescent coating and fire protection of steel structures / L. Guo-Qiang et al. Boca Raton, 2023. 172 p.
6. Patent № 2814877 C1 Russian Federation, IPC G01N 25/02, C09D 5/18, H05B 6/02. Method of double-sided high-temperature heating of thin-layer paint coatings (intumescent paints of flame-retardant type) : № 2023116726 : application 23.06.2023 : published 05.03.2024 / M. S. Tsygankov // Google Patents. URL: <https://clck.ru/3Nukhx> (date of application: 03.05.2025).
7. Snow, Ch. Formula for the Inductance of a Helix Made With Wire of Any Section. URL: <https://clck.ru/3P2XwQ> (date of application: 26.03.2025).
8. Snow, Ch. A Simplified Precision Formula for the Inductance of a Helix with Corrections for the Lead-In Wires. URL: <https://clck.ru/3P2YCY> (date of application: 26.03.2025).
9. Weaver, R. The Inductance of a Helix of Any Pitch. URL: <https://clck.ru/3P2Yh5> (date of application: 26.03.2025).
10. Maxwell, J. C. To find M by Elliptic Integrals // A Treatise on Electricity and Magnetism / J. C. Maxwell. Dover, 1954. Vol. 2, Art. 701. pp. 338–340.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Цыганков Михаил Сергеевич**, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); SPIN-код: 7154-4897; e-mail: 33mixan33@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Mikhail S. Tsygankov**, adjunct of Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105); SPIN code: 7154-4897; e-mail: 33mixan33@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2025  
Одобрена после рецензирования 12.05.2025  
Принята к публикации 15.09.2025