

УДК 621.317.2

## ИМПУЛЬСНЫЙ СОЛЕНОИД С ОБМОТКАМИ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПРОВОДА Cu–Nb

© 2015 г. А. А. Быков<sup>1,\*</sup>, С. И. Попков<sup>2,3</sup>, А. М. Паршин<sup>2,3</sup>, А. А. Красиков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,  
кафедра ядерно-физических методов исследования, 198504 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036 Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия

\*E-mail: redi87@bk.ru

Поступила в редакцию 14.08.2014 г.

Исследована конструкция соленоида с обмотками из наноструктурированного провода Cu–Nb. Аналитически и численно рассчитаны электромагнитные, механические и тепловые параметры соленоида. Из сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных при испытании соленоида, установлена его работоспособность при амплитудной напряженности генерируемого магнитного поля 40 Тл и длительности импульса 20 мс. Данные параметры позволяют использовать соленоид для решения актуальных задач экспериментальных научных исследований.

*Ключевые слова:* сильные импульсные магнитные поля, метод конечных элементов, композитные материалы.

DOI: 10.7868/S0207352815020092

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что создание магнитных полей с напряженностью свыше 30 Тл осложняется ограниченностью прочностных характеристик материалов, используемых для изготовления соленоидов. В настоящее время появляются новые материалы, позволяющие расширить эти границы. Такими материалами являются, например, суперпровода, представляющие собой матрицу из металла с внедренными в нее армирующими наноэлементами. Нанопровод обладает высокой прочностью (до 1300 МПа) и проводимостью (до 65% от проводимости отожженной меди), которые необходимы для создания соленоидов сильных магнитных полей. Рекордный на данный момент уровень напряженности магнитного поля 100 Тл при длительности импульса 5 мс без разрушения соленоида был достигнут с помощью проводов Cu–Nb [2]. Однако короткое время импульса соленоида не позволяет решать многие физические задачи при использовании различных экспериментальных методик исследований магнитных веществ, на которые накладываются паразитные эффекты, вызванные быстрым изменением магнитного поля. Кроме того, использование экстремально высоких полей негативно сказывается на ресурсе соленоида. В связи с этим целью настоящей работы явились расчет и изготовление соленоида из наноструктурированного медно-ниобиевого провода с напря-

женностью магнитного поля 40 Тл и длительностью импульса 20 мс.

### РАСЧЕТ СОЛЕНОИДА

Для большинства экспериментальных методик, используемых при исследованиях в сильных магнитных полях (измерение эффекта Холла, электросопротивления, намагниченности образца), известны необходимые параметры импульса магнитного поля. К ним можно отнести симметричный фронт нарастания, однородность магнитного поля в образце, длительность импульса. С учетом данных требований была выбрана конструкция цилиндрического многовиткового соленоида с однородным по сечению распределением тока [3], которая к тому же технологична, проста для изготовления и расчетов. Внутренний диаметр соленоида зависит от размера криостата, необходимого для терморегуляции объема образца и вмещающего измерительный штوك с образцом и датчиками. Исходя из размера исследуемых образцов и сопутствующего оборудования был выбран внутренний диаметр соленоида 20 мм.

В настоящее время существуют два основных метода расчета соленоидов: хорошо известный аналитический, который применяется достаточно давно [4], и численный, применяющийся с недавнего времени [5]. Аналитический метод имеет

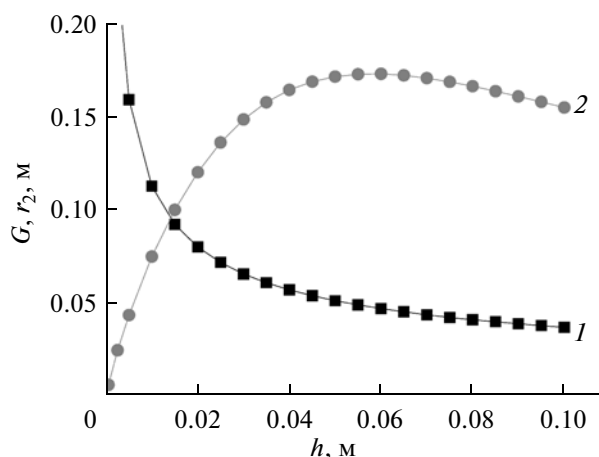


Рис. 1. Зависимость внешнего радиуса  $r_2$  (1) и коэффициентов Фабри  $G$  (2) от высоты соленоида  $h$ .

ограничения, связанные с точностью подбора коэффициентов, участвующих в расчете соленоида. Численный же метод позволяет решать только прямую задачу — расчет параметров заданной конструкции. В данной работе был использован аналитический метод при подборе оптимальной геометрии соленоида, и затем решалась задача удержания магнитного потока, создаваемого соленоидом, с помощью численного расчета с использованием компьютерных программ. Основная идея аналитического расчета, применявшегося в работе, — создание максимального поля при имеющихся энергетических возможностях и длине суперпровода, т.е. подбор оптимальных коэффициентов Фабри [1].

При заданных внутреннем радиусе соленоида  $r_1$  и длине провода  $L$  варьируемыми параметрами для геометрии соленоида выступают высота  $h$  и внешний радиус соленоида  $r_2$ . Зависимость возможного внешнего радиуса от высоты для выбранной конструкции можно представить как

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 + \frac{e}{h}},$$

где  $e = \frac{LS}{\pi}$ , а  $S$  — площадь сечения провода. Подставив данную формулу в выражение для коэффициентов Фабри, получим:

$$G = 0.2\sqrt{2} \frac{\sqrt{\pi\beta}}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}},$$

где  $\alpha = \frac{r_2}{r_1}$ ,  $\beta = \frac{h}{2r_1}$ . Зависимость возможных коэффициентов Фабри от высоты соленоида представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что кривая  $G(h)$  имеет максимум, который соответствует опти-

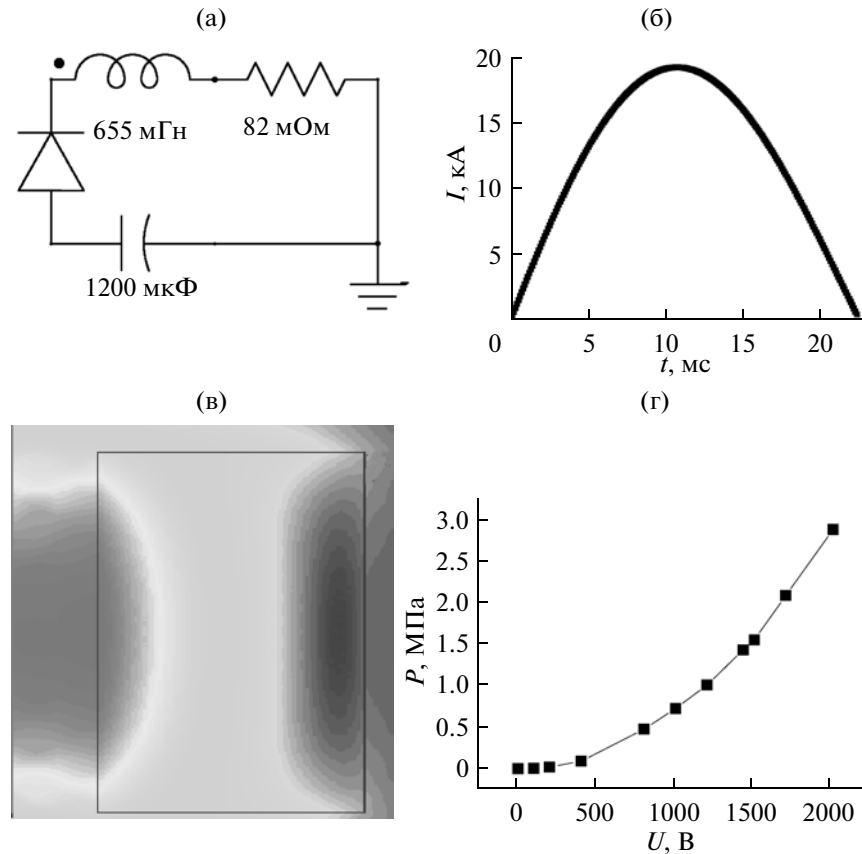
мальным геометрическим параметрам соленоида, принятым в качестве основных параметров для численных расчетов.

Численным методом конечных элементов в пакетах ANSYS Mechanical и ANSYS Maxwell были проведены расчеты электромагнитных и механических параметров. Модель соленоида задавалась в виде полого цилиндра с однородным распределением тока в объеме. Использовался трансцендентный тип анализа, соответствующий переходным процессам при пропускании импульсного тока через обмотку соленоида. Для моделирования схемы питания соленоида и экспериментальной установки использовалась программа ANSYS Circuit Editor. Электрическая схема для исследуемой модели представлена на рис. 2а. Методика позволила получить зависимости тока, протекающего по соленоиду, от времени (рис. 2б) без использования промежуточных аналитических расчетов. Из рисунка видно, что длительность импульса составляет около 20 мс, импульс симметричен, что удовлетворяет поставленной задаче. Вычисленные значения протекающего тока использовались в расчете напряженности магнитного поля в соленоиде, результат которого представлен на рис. 2в. Анализируя распределение аналитического спектра по сечению соленоида, представленного на рисунке, можно сделать вывод, что максимальное значение магнитного поля находится вблизи оси соленоида и занимает широкую область, соответствующую однородному распределению поля. Значения напряженности магнитного поля, полученные рассмотренным методом, были использованы для вычисления силы Лоренца и максимального давления, возникающего в объеме соленоида в зависимости от приложенного напряжения (рис. 2г). На основании расчета была сделана оценка и оптимизирована конструкция соленоида. В результате были получены следующие параметры: высота 74 мм, внутренний радиус 11 мм, внешний радиус 45 мм.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОЛЕНоиДА

При изготовлении соленоида был использован медно-ниобиевый нанотекстурированный провод [6] прямоугольного сечения с размерами  $2 \times 3.5$  мм с оптимальными значениями плотности тока и индуктивности. На рис. 3а приведена микрофотография поперечного сечения провода, выполненная с помощью электронного микроскопа Hitachi TM-3000. На фотографии видны медные островки размером  $\sim 60$  нм, в которые упакованы нановолокна Nb размером  $\sim 15$  нм.

Конструкция многovitкового соленоида приведена на рис. 3б. Нанотекстурированный провод, покрытый изолирующей полиамидной пленкой



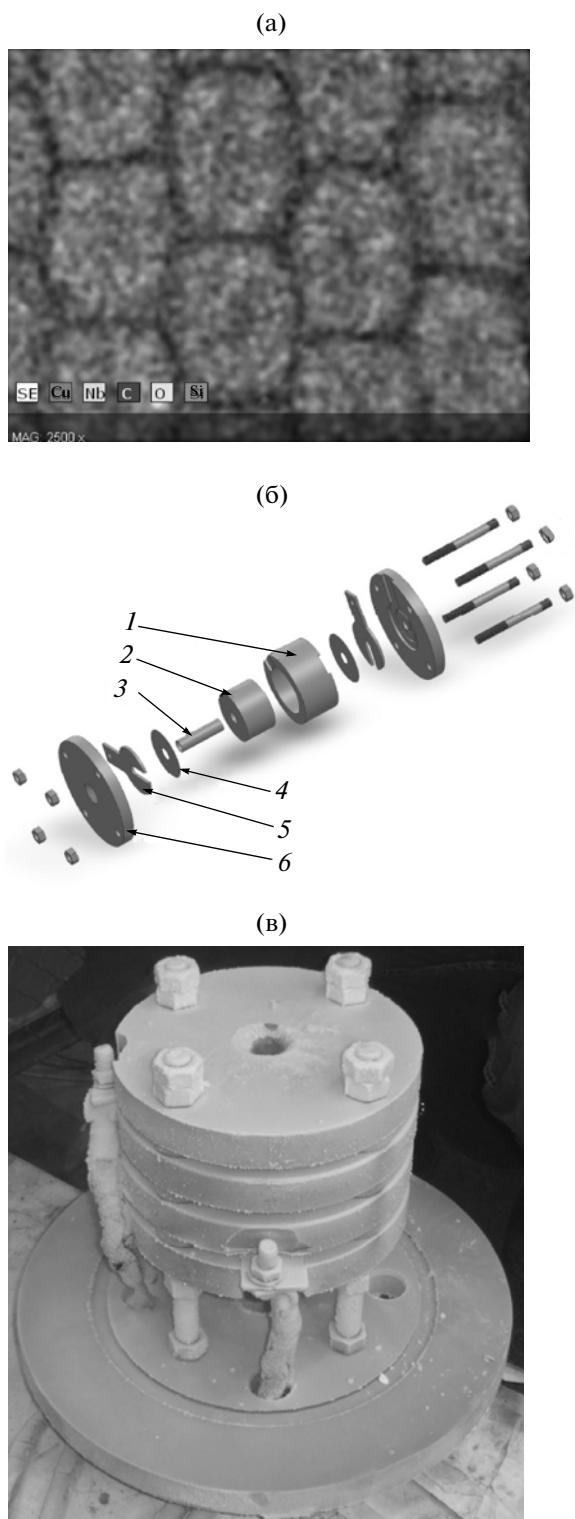
**Рис. 2.** Электрическая схема установки: а – расчетная зависимость тока в соленоиде от времени; б – распределение интенсивности магнитного поля в правой части аксиального сечения соленоида; в – левая грань рисунка представляет ось соленоида, прямоугольник в центре – его сечение, левая часть спектра соответствует максимальной напряженности поля, правая – минимальной; г – максимальное давление, возникающее в объеме соленоида в зависимости от начального напряжения на питающих конденсаторах.

каптон марки 200FN919 с 50% перекрытием, помещался в дополнительную стекловолконную изоляцию и наматывался на стеклотекстолитовый каркас мокрым способом. В качестве пропитки использовалась эпоксидная смола ЭД-20. Для упрочнения соленоида между его внутренними слоями были помещены прокладки из стеклоткани. Шинка была выведена спирально на разные торцы соленоида, разведена под  $90^\circ$  и приварена к медным токоподводящим щечкам. Торцы соленоида были утоплены в прижимные крышки, предотвращающие механические смещения в момент импульса и стянуты бронзовыми шпильками. Общий вид охлажденного соленоида, подготовленного к эксперименту, представлен на рис. 3в.

### ИСПЫТАНИЯ СОЛЕНОИДА

Испытание соленоида проводилось на установке импульсных магнитных полей [6] с энергией 0.6 МДж при температуре жидкого азота. Соленоид подвергался действию серии нарастающих

по величине напряжения импульсов, в промежутке между которыми его охлаждали. В момент импульса регистрировалась временная зависимость напряженности магнитного поля в соленоиде, максимум которой соответствовал амплитудному значению поля. Напряженность магнитного поля измерялась датчиком Холла, помещенным в центр соленоида, а ток, протекающий через соленоид, – безындукционным шунтом, включенным последовательно в колебательный  $RLC$ -контур. Непосредственно после прохождения импульса магнитного поля измеряли активное сопротивление соленоида, по которому оценивался разогрев обмотки, и индуктивность соленоида, по которой можно было судить о деформациях, произошедших в обмотке за время импульса. Зависимости напряженности магнитного поля, индуктивности соленоида и разности температур обмотки до и после импульса от напряжения на конденсаторной батарее представлены на рис. 4а–в. Способность соленоида не разрушаться при генерации магнитного поля (усталостная прочность соленоид-



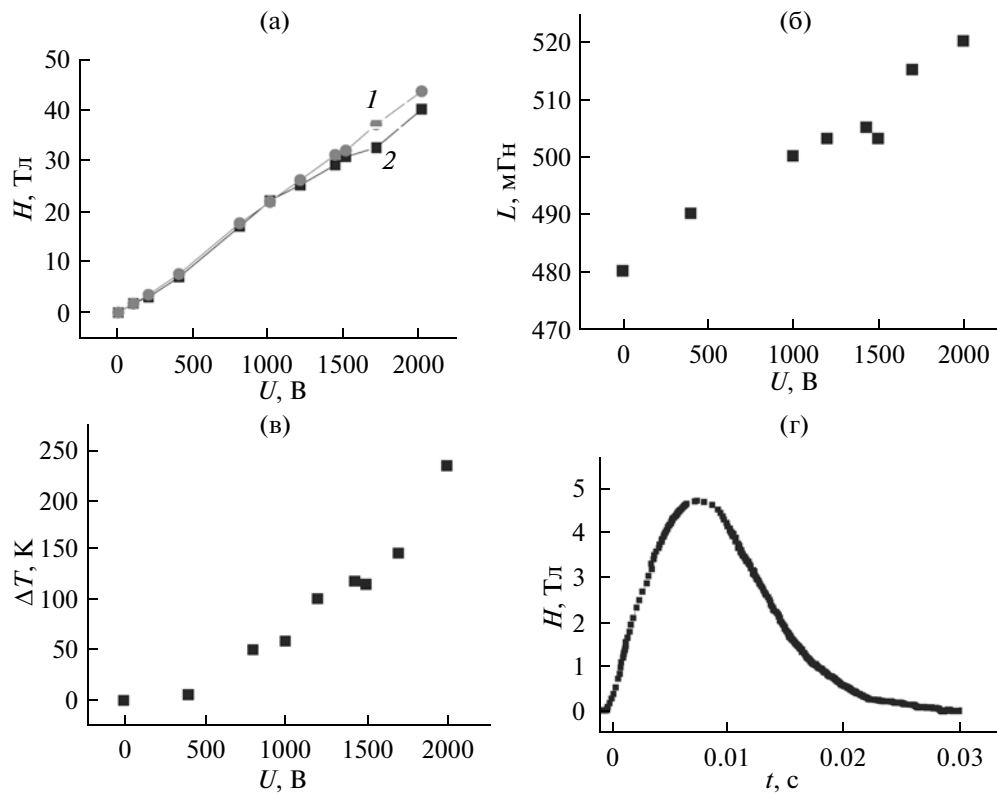
**Рис. 3.** Микрофотография сечения проводника из Cu–Nb (а). Сборочный чертеж импульсного соленоида (б): 1 – бандаж, 2 – обмотка, 3 – диэлектрическая вставка, 4 – диэлектрическая прокладка, 5 – токоподводящая щетка, 6 – крышка. Внешний вид соленоида в сборке после охлаждения жидким азотом (в).

да) оценивалась по отклонению от линейности (неупругие деформации) кривой индуктивности соленоида [7]. При постепенном увеличении напряжения на конденсаторной батарее до  $U = 2000$  В, соответствующем увеличению напряженности магнитного поля до 40 Тл, соленоид находился в рабочем режиме, о чем можно было судить по отсутствию каких-либо заметных изменений сопротивления обмоток и индуктивности соленоида после охлаждения. Из рис. 4в видно, что в момент импульса температура шинки существенно изменялась, что могло повлиять на механическую прочность удерживающей конструкции. Однако линейный характер максимальной амплитуды магнитного поля вплоть до 40 Тл свидетельствует о механической устойчивости конструкции. На рис. 4г представлена форма импульса магнитного поля со значениями амплитуды 45 Тл и длительностью  $t = 20$  мс, которая соответствует расчетным данным. Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных кривых свидетельствует о правильности выбора параметров расчетной модели и надежности использованной измерительной методики. Соленоид имеет существенно больший ресурс и большую напряженность поля, чем соленоиды с обмотками из нагартованного медного провода [3, 4] и соленоиды из нанокompозита [2, 5] при сопоставимых амплитудах магнитного поля, что позволяет использовать его для различных научных экспериментов.

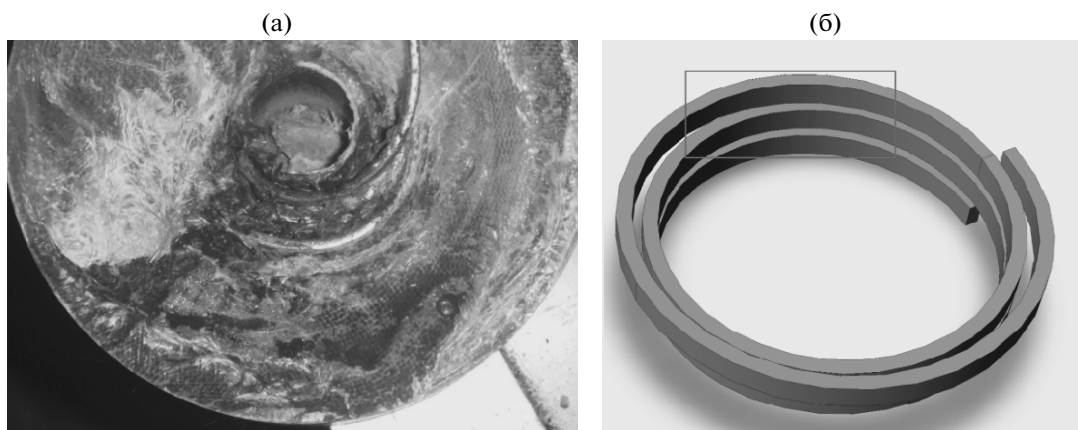
Для определения надежности соленоида были проведены испытания до разрушения. При значении начального напряжения на питающих батареях 2500 В и поля в соленоиде 47 Тл произошло разрушение его обмоток. На рис. 5а приведены фотографии места пробоя в соленоиде (пробой произошел симметрично, на обоих торцах соленоида). Из рисунка видно, что обгорание изоляции, по которому можно судить о месте разрушения обмоток, произошло в области перехода проводящей шинки на новый слой витков (рис. 5б), где на стыке острых граней шинки с квадратными сечениями возникла повышенная напряженность магнитного поля. Следует отметить, что данное разрушение характерно для конструкций импульсных соленоидов с многослойными обмотками из прямоугольных проводников [8]. Решение данной проблемы возможно в направлении изменения конструкции обмотки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлена конструкция соленоида с обмотками из наноструктурированного провода Cu–Nb. Аналитическими мето-



**Рис. 4.** Зависимости расчетной (1) и измеренной (2) в центре соленоида напряженности магнитного поля (а), индуктивности (б), изменения температуры в момент импульса (в) от начального напряжения на конденсаторной батарее. Зависимость напряженности магнитного поля от времени импульса (г).



**Рис. 5.** Фотография верхней части соленоида, где произошло разрушение обмотки (а); геометрическое расположение витков обмотки относительно друг друга (б); прямоугольником отмечена область соприкосновения острых граней шинки при переходе на следующий слой.

дами при подборе оптимальных коэффициентов Фабри и численными методами конечных элементов с помощью пакетов ANSYS проведены расчеты электромагнитных, механических и тепловых параметров. С использованием измерительной методики проведены испытания соленоида. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспе-

риментальных данных, характеризующих устойчивую работу соленоида при питании его обмоток от конденсаторной батареи напряжением вплоть до 2000 В, соответствующим напряженности магнитного поля 40 Тл и длительности импульса 20 мс. Параметры в области устойчивой работы позволяют использовать соленоид для решения

актуальных задач экспериментальных научных исследований.

В заключение авторы благодарят И.В. Немцева за предоставленные фотографии поперечного сечения провода, полученные на электронном микроскопе Hitachi TM-3000.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. Магнитные и механические свойства конструкций из обычных и сверхпроводящих материалов. М.: Мир, 1971. 389 с.
2. *Zherlitsyn S., Herrmannsdoerfer T., Skouriski Y. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2006. V. 51. P. 583.
3. *Лагутин А., Ожогин В.* Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1988. 181 с.
4. *Страховский Г.М., Кравцов Н.В.* // Успехи физических наук. 1960. Т. 70. № 4. С. 693.
5. *Skouriski Y., Herrmannsdoerfer T., Sytcheva A. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2008. V. 18. № 2. С. 608.
6. *Быков А.А.* Автоматизация экспериментальных установок и исследование магнитотранспортных свойств материалов на основе ВТСП и замещенных манганитов лантана: Дис. ... канд. физ.-мат. наук 01.04.01. Красноярск: ИФ СО РАН, 2012. 101 с.
7. *Lagutin A., Rosseel K., Herlach F. et al.* // Measurements Sci. Technol. 2003. V. 14. P. 2144.
8. *Li L., Peng T., Ding H. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2010. V. 20. № 3. P. 676.

## Pulsed Solenoid with Nanostructured Cu–Nb Wire

A. A. Bykov, S. I. Popkov, A. M. Parshin, A. A. Krasikov

The solenoid with nanostructured Cu–Nb wire coils was investigated. Calculations of the electromagnetic and thermal solenoid parameters were performed using analytical and numerical techniques. The calculations and tests revealed the values of 40 T and 20 ms for the generated magnetic field and the pulse duration, respectively. These parameters enabled using the solenoid in experiments aimed at solving topical fundamental problems.