

УДК 621.313.84+537.851

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-47-53

Исследование соленоида как источника однородного магнитного поля в магнитобиологических опытах*

Г. В. Ломаев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
М. С. Емельянова, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Магнитобиологические опыты требуют генераторов постоянных магнитных полей. Требования к генераторам зависят от плана эксперимента и вида биообъекта: микроорганизмы (вирусы, бактерии, поры грибов), насекомые (муравьи, пчелы), млекопитающие (крысы, мыши, птицы). Рабочий объем, в котором размещаются последние, может быть представлен различными формами: чашки Петри, пробирки, боксы (инкубаторы, ульи, камеры и т. п.).

Форма и величина рабочего объема совместно с планом эксперимента и видом биообъекта накладывают условия на параметры генераторов магнитных полей, которые при взаимодействии с полем Земли создают в рабочем объеме гипогеомагнитное поле. Требования к техническим характеристикам генераторов гипогеомагнитного поля варьируются в широких пределах. Так, в экспериментах, в основе которых лежат резонансные эффекты, необходимо тщательно калибровать магнитное поле в рабочем объеме по однородности. Особой однородностью должно быть поле при исследовании ядерного магнитного резонанса (ЯМР). С увеличением массы биочастиц резонансные частоты падают, уменьшается добротность колеблющихся частиц биосистемы, а требования в однородности поля становятся не такими жесткими. Недопустимое отклонение поля от номинального значения приводит к потере чистоты опыта, затрудняет трактовку результатов, а часто делает их неверными.

Предпочтение среди магнитобиологов получили генераторы в виде разнообразных катушек с током: виток Ампера, прямоугольная рамка с током, катушки Гельмгольца, соленоид. В данной работе исследуется соленоид, как источник поля с заданной однородностью в рабочем объеме магнитобиологического опыта. Рассчитано поле с использованием известных формул и программной среды Wolfram Mathematica 12.1.

Определен рабочий объем внутри соленоида, в котором поле имеет заданную степень неоднородности. Построены графики зависимостей неоднородности поля в зависимости от отношения длины к радиусу: «длинный» – отношение более 20, «короткий» (катушка) – 20 и одновитковая катушка (виток Ампера). Приведены примеры расчета размеров соленоида конкретных магнитобиологических опытов.

Ключевые слова: соленоид, неоднородность магнитного поля, магнитобиологический опыт.

Введение

Магнитобиологические опыты требуют генераторов постоянных магнитных полей. Экскурсы по магнитобиологическим исследованиям позволяет систематизировать опыты по требованиям к генераторам постоянного магнитного поля. Мы отдаем предпочтение полям, меньшим поля Земли (общепринятый термин – гипогеомагнитные поля).

Проанализировав большое число литературных источников из области экспериментальной магнитобиологии с гипогеомагнитным полем (ГГМП), мы пришли к следующему. Имеется большое разнообразие биообъектов в магнитобиологических опытах: микроорганизмы (вирусы, бактерии, поры грибов, насекомые (муравьи, пчелы), млекопитающие (крысы, мыши, птицы и др.). Рабочие объемы, в которых располагаются биообъекты, разнообразны: чашки Петри,

пробирки, боксы (инкубаторы, ульи, камеры и т. п.) [1–4].

Форма и величина рабочего объема, план эксперимента и вид биообъекта накладывают условия на параметры генератора, который при взаимодействии с полем Земли создает в рабочем объеме гипогеомагнитное поле.

Требования к техническим характеристикам генераторов ГГМП варьируются в широких пределах. Так, в экспериментах, в основе которых лежат резонансные эффекты, необходимо тщательно калибровать магнитное поле в рабочем объеме по однородности. Особой однородностью должно быть поле при исследовании ядерного магнитного резонанса (ЯМР). С увеличением массы биочастиц резонансные частоты падают, уменьшается добротность колеблющихся частиц биосистемы, а требования в однородности поля становятся не такими жесткими.

Для ослабления или полной компенсации магнитного поля Земли используются: экранированные камеры из магнитомягких материалов с высокой проницаемостью, системы катушек Гельмгольца, витки Ампера, соленоиды, в том числе сверхпроводящие [5–7].

Предпочтение среди магнитобиологов получили генераторы в виде разнообразных катушек с током. Основным требованием к генераторам является однородность поля в рабочем объеме. Для решения этой задачи предложено множество конструкций. Вот некоторые из них.

Виток Ампера является простейшей конструкцией, порождающей однородное магнитное поле. Другой простейшей конструкцией является прямоугольная рамка с током. Чаще используют катушки Гельмгольца. Максимальный объем однородности магнитного поля достигается, когда расстояние между катушками приблизительно равно радиусу катушки. Последующее развитие конструкций катушек связано с решением задачи увеличения области однородности поля и основано на использовании нескольких соосных катушек Гельмгольца. Соленоиды предпочтительнее в опытах с протяженным рабочим объемом, например пробирка или катетер с жидкой субстанцией. Мы встретились в наших исследованиях с потребностью обеспечения нескольких специфических требований к генераторам: генерирование градиентного поля и вращающегося поля.

Цель работы – исследовать соленоид как источник поля с заданной однородностью в рабочем объеме магнитобиологического опыта.

Основная часть

Рассмотрение поля соленоида целесообразно начать с закона Био – Савара – Лапласа, который определяет его в любой точке пространства [8]. Каждый элемент с током I создает магнитное поле с модулем индукции:

$$|dB| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{Idz \sin \alpha}{r^2}. \quad (1)$$

Интегрируя (1), получим для линейного бесконечного проводника с током:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \alpha dz}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}, \quad (2)$$

где r – расстояние от точки наблюдения до элемента тока; α – угол между осью проводника и направлением r ; z – ось проводника.

Из (2) видим, что при неизменных величинах I и R поле постоянно по образующей цилиндра вокруг проводника. При ориентации по вектору

поля Земли образуется линейная зона с магнитным вакуумом, в которой может быть расположен биообъект в пробирке.

Поле вокруг проводника с током неоднородно. При неизменных величинах I и R поле будет постоянно по образующей цилиндра вокруг проводника. При ориентации по вектору поля Земли образуется линейная зона с так называемым магнитным вакуумом, в которой может быть расположен биообъект в пробирке.

По аналогии для витка с током, используя уравнения (1) и (2), получим полную магнитную индукцию на оси витка:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 I}{2R} \frac{1}{\left(1 + \frac{z^2}{R^2}\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3)$$

В частности, в центре витка ($z = 0$) поле равно:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

На большом расстоянии от витка ($z \gg R$) можно пренебречь единицей под радикалом в знаменателе (3). В результате получаем

$$B_{z \rightarrow \infty} \approx \frac{\mu_0 I}{2R} \frac{R^3}{z^3} = \frac{\mu_0 IR^2}{2z^3}. \quad (4)$$

Из полученного выражения следует, что поле по оси витка убывает по кубическому закону. Тем не менее генератор в виде витка Ампера можно использовать в опытах для биообъектов, размещенных в чашке Петри с компенсацией вертикальной проекцией поля Земли.

От витка Ампера перейдем к уравнению для соленоида.

Подсчитаем поле внутри соленоида или катушки. Возьмем элемент соленоида длиной dz , находящийся на расстоянии z от точки наблюдения. Если катушка имеет n витков на единицу длины, то в выделенном элементе содержится ndz витков. Этот элемент создает магнитное поле:

$$dB = ndz \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Интегрируя по всей длине соленоида, получаем:

$$B_{\infty} = \frac{n\mu_0 IR^2}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{R^2 dz}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{n\mu_0 IR^2}{2} \frac{z}{R^2 \sqrt{R^2 + z^2}} \Bigg|_{-\infty}^{+\infty}. \quad (5)$$

Таким образом, поле в бесконечно длинном соленоиде задается выражением

$$B_\infty = n\mu_0 I. \quad (6)$$

Магнитное поле в средней точке оси соленоида конечной длины l дается тем же интегралом (5), но с другими пределами интегрирования.

$$B_l = \frac{n\mu_0 IR^2}{2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{dz}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{n\mu_0 IR^2}{2} \frac{z}{R^2 \sqrt{R^2 + z^2}} \Big|_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} = n\mu_0 I \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}}. \quad (7)$$

Уравнение (6) описывает поле бесконечно длинного соленоида на его оси, а (7) – конечного. Сравним поле в точке $z = 0$ соленоида длиной l с полем бесконечно длинного соленоида. Зададимся допустимой неоднородностью $\varepsilon < 0,05$. Какова должна быть длина l , чтобы разница была менее 0,05, т. е. $\varepsilon = \frac{B_\infty - B_0}{B_\infty} < 0,05$.

Из уравнений (6) и (7) найдем:

$$\varepsilon = \frac{B_\infty - B_0}{B_\infty} = 1 - \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}} = 1 - \frac{l}{\sqrt{1 + \frac{4R^2}{l^2}}} \approx \frac{2R^2}{l^2}.$$

Отношение соленоида к его радиусу будет:

$$\frac{l}{R} \approx \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}} \leq \sqrt{\frac{2}{5 \cdot 10^{-3}}} = 20.$$

Иными словами, соленоид может рассматриваться как бесконечно длинный, если его длина в двадцать и более раз превышает радиус.

Магнитное поле в торцевой точке оси соленоида конечной длины l дается тем же интегралом (7) с другими пределами интегрирования:

$$B_l = \frac{n\mu_0 IR^2}{2} \int_0^l \frac{dz}{(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{n\mu_0 IR^2}{2} \frac{z}{R^2 \sqrt{R^2 + z^2}} \Big|_{z=0}^{z=l} = n\mu_0 I \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}}. \quad (8)$$

Отношение полей в средней и крайней точках оси соленоида равно

$$\frac{B_l}{B_c} = \sqrt{\frac{R^2 + \frac{l^2}{4}}{R^2 + l^2}}.$$

При $l \gg R$ имеем

$$\frac{B_l}{B_c} \approx \frac{1}{2}.$$

Это так называемый краевой эффект. С приближением значения величины l к R зона однородности уменьшается.

Рассмотрим теперь однородность поля внутри всего объема соленоида в каждой его точке.

Для описания радиального и осевого поля соленоида авторами [9–11] получены следующие уравнения

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I}{4\pi l} \frac{2}{\sqrt{\rho}} \left[\frac{R}{k} \frac{k^2 - 2}{k} K(k^2) + \frac{2}{k} E(k^2) \right]_{\zeta_-}^{\zeta_+}, \quad (9)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi l} \frac{1}{\sqrt{R\rho}} \left[\zeta k \left(K(k^2) + \frac{R - \rho}{R + \rho} \Pi(h^2, k^2) \right) \right]_{\zeta_-}^{\zeta_+}, \quad (10)$$

где $\zeta_\pm = z \pm \frac{l}{2}$, $h^2 = \frac{4R\rho}{(R + \rho)^2}$, $k^2 = \frac{4R\rho}{(R + \rho)^2 + \zeta^2}$,

$K(m) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - m \sin^2 \theta}} d\theta$, полный эллиптический интеграл первого рода;

$E(m) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - m \sin^2 \theta} d\theta$, полный эллиптический интеграл второго рода;

$\Pi(n, m) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{(1 - n \sin^2 \theta) \sqrt{1 - m \sin^2 \theta}} d\theta$, полный эллиптический интеграл третьего рода.

На оси симметрии радиальная составляющая обращается в нуль, а осевая составляющая поля равна

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{2} \left(\frac{l/2 - z}{l \sqrt{R^2 + (l/2 - z)^2}} + \frac{l/2 + z}{l \sqrt{R^2 + (l/2 + z)^2}} \right). \quad (11)$$

Используя вышеприведенные уравнения (9)–(11), рассчитаем степень отклонения поля от однородности (коэффициент неоднородности):

$$\begin{aligned}\varepsilon_z(r) &= \frac{B_z(r) - B_0}{B_0}, \\ \varepsilon_r(r) &= \frac{B_r(r)}{B_0},\end{aligned}\quad (12)$$

где B_0 вычисляется по формуле (11) для $z = 0$, которая вдали от концов соленоида ($|z| \ll l/2 - R$) стремится к постоянному значению $B = \mu_0 NI / l$.

Результаты и обсуждение

Для осуществления расчета использовались уравнения (9)–(12). За переменную мы брали длину соленоида в относительных к радиусу соленоида величинах.

На рисунках приведены примеры расчетов для длинного ($l = 20R$) и среднего ($l = 4R$) по длине соленоида, а также для очень короткого

($l = 0,01R$), то есть практически для витка Ампера.

Для каждого случая определялись зоны, в которых обеспечивалась однородность поля с заданным коэффициентом (0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5). Пунктиром на рисунках обозначена рабочая зона с заданным значением коэффициента для размещения биообъекта.

На рис. 1 обозначены зоны с неоднородностью 0,01 и 0,05, на рис. 2 – неоднородность поля 0,01, а на рис. 3 неоднородность поля в выбранной зоне составляет 0,02.

Необходимо отметить критический размер длины соленоида, при котором начинает проявляться неоднородность поля в точке $z=0$. Эта неоднородность увеличивается относительно длины соленоида. Данная зависимость приведена на рис. 4.

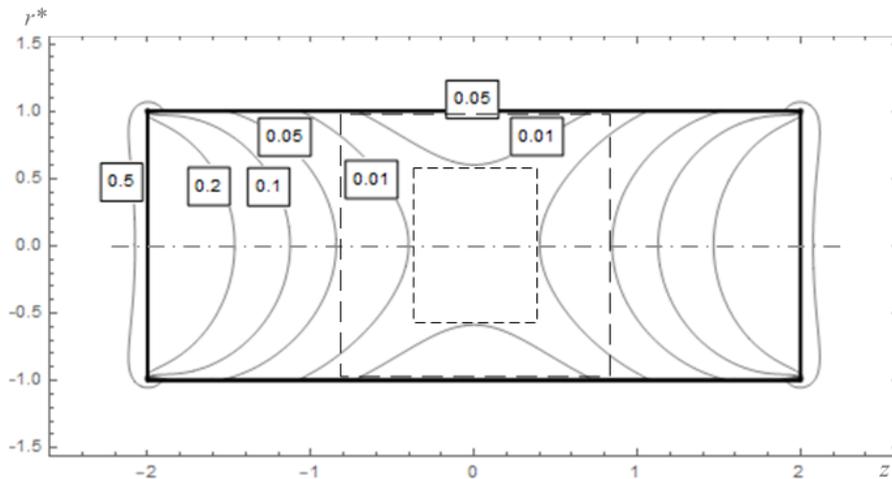


Рис. 1. Неоднородность поля соленоида $l/R=4$: в квадратиках изолиний указан коэффициент неоднородности. Пунктиром обозначена рабочая зона для размещения биообъекта. Коэффициент неоднородности $\varepsilon \leq 0,01$

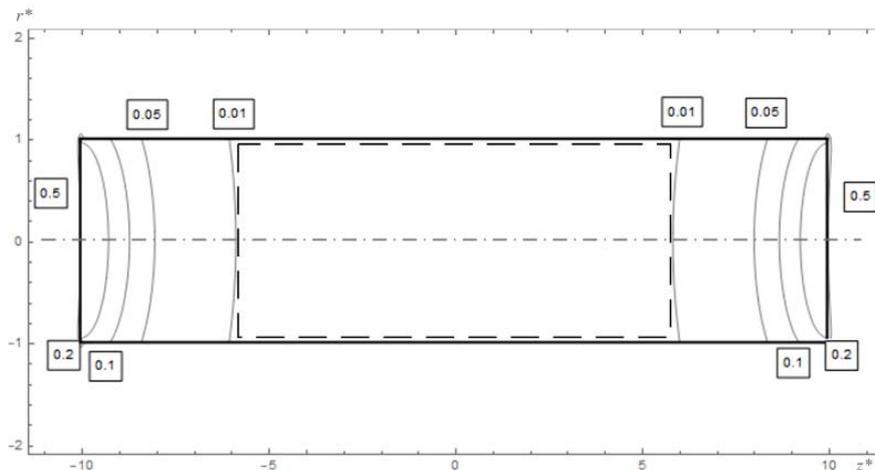


Рис. 2. Неоднородность поля соленоида $l/R=20$

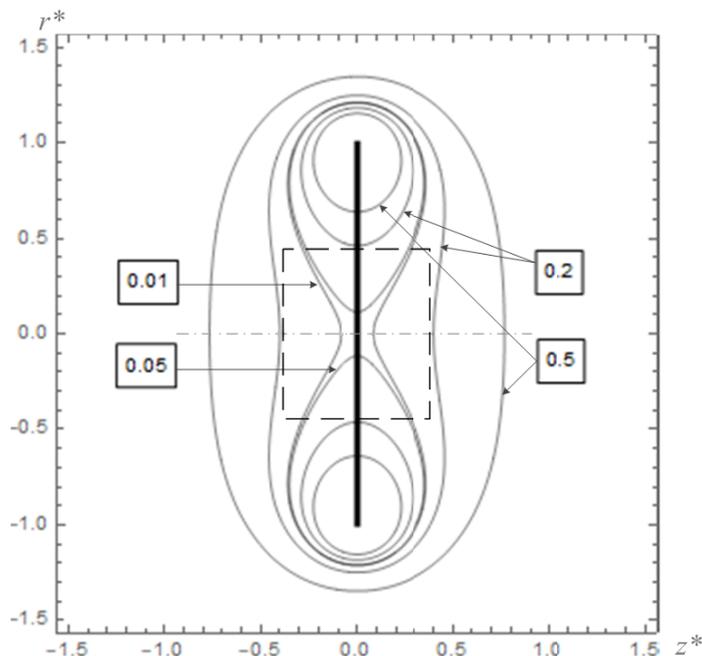


Рис. 3. Изолинии коэффициента неоднородности для вырожденного соленоида $l/R=0,01$

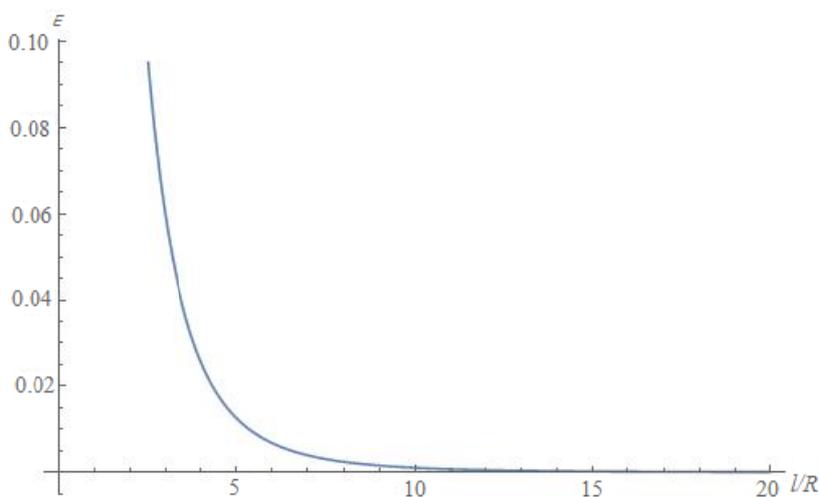


Рис. 4. Изменение коэффициента неоднородности поля соленоида в центре при различных отношениях l/R

Критическим размером является длина соленоида $l = 5,017r$. При этом возникает неоднородность поля $\epsilon = 0,01$ близко к внутренней обмотке соленоида.

На рис. 1 длина соленоида меньше критического значения, что привело к значительному уменьшению диаметра рабочей зоны.

Примеры использования результатов

Пример 1. Определение размеров соленоида для исследования ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Система, элементами которой являются протоны, имеет высокую добротность. Полоса пропускания (ширина резонансной полосы)

$$\Pi = 2\Delta f = \epsilon f_{рез} = \frac{f_{рез}}{Q},$$

где ϵ – затухание; Q – добротность.

Резонансная частота равна частоте Ламора:

$$\omega_l = \gamma H = 2\pi f_l,$$

$$f_l = \frac{\gamma H}{2\pi} = f_{рез},$$

где γ – гиромагнитное отношение.

Из приведенных соотношений следует

$$\Pi = \frac{f_{рез}}{Q} = \frac{\gamma \Delta H}{2\pi}.$$

$$\text{Или } \frac{\Pi}{f_{\text{рез}}} = \frac{1}{Q} = \frac{\Delta H}{H} = \frac{1}{100} = 0,01.$$

Для обеспечения полученной величины соленоид должен иметь размеры, как видно из графиков на рис. 4: $l/r=12$.

Пример 2. Определение размеров соленоида для исследования циклотронного резонанса.

Данный пример иллюстрирует низкодобротную резонансную систему.

Циклотронная резонансная частота

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} \mu_0 H,$$

где q – заряд, например, иона Ca^{+0} ; m – масса иона Ca^{+} ; H – поле, в котором движется ион.

Добротность найдена из резонансной кривой, взятой из [12]:

$$Q = \frac{f_{\text{рез}}}{\Pi} = \frac{20}{2} = 10; f_{\text{рез}} = 20 \text{ Гц}; \Pi = 2\Delta f = 2 \text{ Гц};$$

$$\Pi = \frac{f_{\text{рез}}}{Q}; \varepsilon = \frac{1}{10} = 0,1.$$

Размер соленоида, обеспечивающего неоднородность, определяем из графика на рис. 4: $l/r \geq 10$.

Выводы

Практически все генераторы ГГМП дают неоднородные поля (виток Ампера, провод с током, соленоид).

При заданном уровне неоднородности магнитного поля (ε) возможно оценить соответствующий относительный объем рабочей области.

Набольшую однородность можно получить при правильном выборе соотношения длина/диаметр соленоида. Возможно увеличение (или уменьшение) области однородности за счет использования конструкций, состоящих из нескольких соосных катушек (катушки Бэкера, катушки МакКихана, катушки Браунбека и т. д.).

Библиографические ссылки

1. Binhi V.N., Prato F.S. Rotations of macromolecules affect nonspecific biological responses to magnetic fields // *Scientific reports*. 2018. Т.8. No.1. Pp. 1-11. DOI: 10.1038/s41598-018-31847-y.
2. Ломаев Г. В., Емельянова М. С. Влияние вариаций магнитного поля земли на эмбриональное развитие *G.gallus*// *Интеллектуальные системы в производстве*. 2014. № 1 (23). С. 127–131.
3. Влияние слабого комбинированного магнитного поля на скорость регенерации планарий *Dugesia tigrina* / Х. П. Тирас, Л. К. Сребницкая, Е. Н. Ильясова, А. А. Климов, В. В. Леднев // *Биофизика*. 1996. Т. 41, № 4. С. 826–831.

4. Белкин А. Д. Содержание белков регуляторов апоптоза bcl-2 и bad в регионарных лимфатических узлах при воздействии магнитного поля 50 Гц // *Гигиена и санитария*. 2015. Т. 94, № 1. С. 112–114.

5. Повышение стабильности магнитного поля короткозамкнутого сверхпроводникового соленоида / Д. В. Варюхин, Н. В. Таряник, Д. О. Федюк, В. В. Сухой // *Физика и техника высоких давлений*. 2018. Т. 28, № 2. С. 121–130.

6. Федюк Д. О., Варюхин Д. В., Таряник Н. В. Сверхпроводниковая магнитная система с однородным магнитным полем // *Физика и техника высоких давлений*. 2018. Т. 28, № 3. С. 113–118.

7. Таряник Н. В., Варюхин Д. В., Федюк Д. О. Коррекция однородного магнитного поля сверхпроводникового соленоида // *Физика и техника высоких давлений*. 2019. Т. 29, №3. С. 131–139.

8. Мубаракшин И. Р. Электромагнитное поле соленоида // *Физическое образование в вузах*. 2017. Т. 23, № 3. С. 46–53.

9. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers Bonny W.M. *Exact expression for the magnetic field of a finite cylinder with arbitrary uniform magnetization*// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 45. Pp. 423–432. DOI:10.1016/j.jmmm.2018.02.003.

10. Bayazitoglu Y., Sathuvalli U. B. Field Gradient Analysis of a Conical Helix// *IEEE Transactions on magnetics*. 1993. Vol. 29, №. 1. Pp. 88-97.

11. Schill R.A. General relation for the vector magnetic field of a circular current loop: a closer look// *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003, Vol. 39. No. 2, Pp. 961-967.

12. Влияние слабого комбинированного магнитного поля на скорость регенерации планарий *Dugesia tigrina* / Х. П. Тирас, Л. К. Сребницкая, Е. Н. Ильясова, А. А. Климов, В. В. Леднев // *Биофизика*. 1996. Т. 41, № 4. С. 826–831.

References

1. Binhi V.N., Prato F.S. [Rotations of macromolecules affect nonspecific biological responses to magnetic fields]. *Scientific reports*. 2018, vol.8, no.1, pp. 1-11. DOI: 10.1038/s41598-018-31847-y
2. Lomaev G.V., Emelyanova M.S. [Effects of variations in earth's magnetic field on embryonic development of *G. gallus*]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2014, no. 1 (23), pp. 127-131 (in Russ.).
3. Tiras K., Srebnitskaya L.K., Il'Yasova Y.N., Klimov A.A., Lednev V.V. [Effect of a weak combined magnetic field on the rate of regeneration of planarian *Dugesia tigrina*]. *Biophysics*. 1996, vol. 41, p. 837 (in Russ.).
4. Belkin A.D. [The content of protein regulators of apoptosis and bcl-2 and bad in regional lymph nodes of the liver under the influence of a magnetic field of 50 Hz]. *Hygiene and sanitation*. 2015, vol. 94, no.1, pp. 112-114 (in Russ.).
5. Varyukhin D.V., Taryanik N.V., Fedyuk D.O., Sukhoy V.V. [Enhancement of magnetic field stability of

a short-circuited superconducting solenoid]. *Physics and high pressure technology*. 2018, vol. 28, no. 2, pp. 121-130 (in Russ.).

6. Fedyuk D.O., Varyukhin D.V., Taryanik N.V. [Superconducting magnetic system characterized by homogeneous magnetic field]. *Physics and high pressure technology*. 2018, vol. 28, no.3, pp. 113-118 (in Russ.).

7. Taryanik N.V., Varyukhin D.V., Fedyuk D.O. [Correction of uniformity of magnetic field of a superconducting solenoid]. *Physics and high pressure technology*. 2019, vol. 29, no.3, pp. 131-139 (in Russ.).

8. Mubarakshin I. [Electromagnetic field of the solenoid]. *Fizicheskoe Obrazovanie v VUZah*. 2017, vol. 23, no. 3, pp. 46-53 (in Russ.).

9. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers Bonny W.M. [Exact expression for the magnetic field of

a finite cylinder with arbitrary uniform magnetization]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018, vol. 45, pp. 423–432. DOI:10.1016/j.jmmm.2018.02.003.

10. Bayazitoglu Y., Sathuvalli U. B. [Field Gradient Analysis of a Conical Helix]. *IEEE Transactions on magnetics*. 1993, vol. 29, no. 1, pp. 88-97.

11. Schill R.A. [General relation for the vector magnetic field of a circular current loop: a closer look]. *IEEE Transactions on Magnetism*. 2003, vol. 39, no. 2, pp. 961-967.

12. Tiras K., Srebnitskaya L.K., Il'Yasova Y.N., Klimov A.A., Lednev V.V. [Effect of a weak combined magnetic field on the rate of regeneration of planarian *Dugesia tigrina*]. *Biophysics*. 1996, vol. 41, p. 837 (in Russ.).

Investigation of a Solenoid as a Source of a Uniform Magnetic Field in Magnetobiological Experiments

G. V. Lomaev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

M. S. Emelyanova, Senior lecturer, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Magneto biological experiments require generators of constant magnetic fields. Requirements for generators depend on the experimental design and the type of biological object: microorganisms (viruses, bacteria, fungal spores), insects (ants, bees), mammals (rats, mice, birds). The working volume in which the latter are placed can be represented by various forms: Petri dishes, test tubes, boxes (incubators, hives, chambers, etc.).

The shape and size of the working volume together with the experimental plan and the type of biological object impose conditions on the parameters of the generators of magnetic fields, which, when interacting with the Earth's field, create a hypogeomagnetic field in the working volume. Requirements for the technical characteristics of generators of a hypogeomagnetic field also vary within wide limits. Thus, in experiments based on resonance effects, it is necessary to carefully calibrate the magnetic field in the working volume for homogeneity. The field should be especially homogeneous when studying nuclear magnetic resonance (NMR). With an increase in the mass of bioparticles, the resonance frequencies fall, the Q-factor of the vibrating particles of the biosystem decreases, and the requirements for the uniformity of the field become less stringent. Unacceptable deviation of the field from the nominal value leads to the loss of purity of the experiment, complicates the interpretation of the results, and often makes them incorrect.

The preference among magneto biologists was given to generators in the form of various coils with a current: an Ampere coil, a rectangular frame with a current, Helmholtz coils, a solenoid. In this work, we investigated a solenoid as a source of a field with a given uniformity in the working volume of a magneto biological experiment. The field is calculated using well-known formulas and software environment Wolfram Mathematica 12.1.

The working volume inside the solenoid is determined, in which the field has a given degree of inhomogeneity. The graphs of the dependences of the field inhomogeneity are plotted depending on the ratio of length to radius: "long" ratio is more than 20, "short" (coil) - 20, and a single-turn coil (Ampere coil). Examples of calculating the dimensions of the solenoid of specific magneto biological experiments are given.

Keywords: solenoid, inhomogeneity of magnetic field, magnetobiological experience

Получено: 24.11.2020