

PACS: 42.60. Da; 87.58.-b

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНСТАНТ И ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

А. Н. Довбня, В. П. Ефимов, Г. Д. Крамской

*Национальный Научный Центр
«Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков*

Поступила в редакцию 29.12.2017.

Анализируются влияния краевых эффектов электрического поля и диэлектрической проницаемости многослойного конденсатора на истинное значение диэлектрической постоянной. В качестве аналога биообъекта выбран многослойный конденсатор.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, краевые эффекты, омические потери, поверхностный заряд, напряженность поля.

РЕЗОНАНСНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ КОНСТАНТ ТА ОМІЧНИХ ВТРАТ В БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

А. М. Довбня, В. П. Єфімов, Г. Д. Крамської

Аналізуються впливи крайових ефектів електричного поля та діелектричної проникності багатоплошарового конденсатора на справжнє значення діелектричної константи. Як аналог біооб'єкта обрано багатоплошаровий конденсатор.

Ключові слова: діелектрична проникність, крайові ефекти, омичні втрати, поверхневий заряд, напруженість поля.

A RESONANCE METHOD FOR MEASURING DIELECTRIC CONSTANTS AND OHMIC LOSSES IN BIOLOGICAL OBJECTS

A. N. Dovbnya, V. P. Yefimov, G. D. Kramskoy

Influence of the edge effects of an electric field, and the dielectric permeability of a multilayer capacitor on the dielectric constant true value have been analyzed. A multi-layer capacitor has been chosen to serve as an analog of a biological object.

Keywords: dielectric permeability, edge effects, ohmic losses, superficial charge, field tension.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время невозможно представить биологический объект, не подвергающийся влиянию внешних канцерогенных факторов наряду с внутренними природными мутациями в организме. Не удается точно определить, явилась ли причиной болезни слабость иммунной системы против внутренней природной мутации клеток или решающими оказались внешние канцерогенные факторы. Нельзя однозначно определить, какая именно защита спасает 80 % людей от онкологических заболеваний, поэтому нет достаточных оснований полагаться полностью на помощь иммунологии без ее усиления [1]. Основным источником ослабления иммунной системы и развития всевозможных болезней, в том числе онкологических является засорение ядовитыми веществами (токсинами) кровеносной системы.

Детоксикация сосудов кровеносной системы позволит усилить воздействие иммунной системы, и соответственно, даст ей возможность подавлять как доброкачественные, так и злокачественные новообразования. Нами предложен способ детоксикации сосудов кровеносной системы, который заключается в следующем: исследуемый биообъект помещается в прямоугольный резонатор дециметрового диапазона длин волн. К нему прикладываются поперечные статические электрическое и магнитное поля. Под воздействием этих полей происходит ускорение и вращение ионов, содержащихся в крови и, соответственно выбивание токсинов из стенок сосудов. Контроль за осуществлением детоксикации производится по изменению диэлектрической постоянной объекта резонансным методом [2].

1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ МНОГОСЛОЙНОГО КОНДЕНСАТОРА

Поскольку в качестве аналога биообъекта принят многослойный конденсатор, то необходимо провести исследования влияния краевых эффектов и многослойности на истинное значение его компонентов. Диэлектрический цилиндр, наполненный жидкостью, установлен в прямоугольный резонатор для измерения диэлектрических параметров (диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$) должен иметь значительно меньшие размеры по сравнению с размерами резонатора для сохранения в нем нормального распределения электрического поля. Этот цилиндр с жидкостью, расположенном в максимальном электрическом поле резонатора, можно рассматривать как внесение дополнительной емкости в резонатор. Поскольку торцы цилиндра перпендикулярны напряженности электрического поля, то такую систему можно рассматривать как конденсатор, состоящий из отдельных разных последовательно включенных диэлектриков. В нашем случае это воздух ($\epsilon = 1$), фторопласт ($\epsilon = 2$) и вода ($\epsilon = 80$). Вода (полярные молекулы) выбрана как образец диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью сравнимой с проницаемостью крови биообъекта. Общая высота цилиндра $l = 45$ мм, равная узкой стенке резонатора, диаметр $D = 8$ мм, толщина дна и крышки по 0,5 мм.

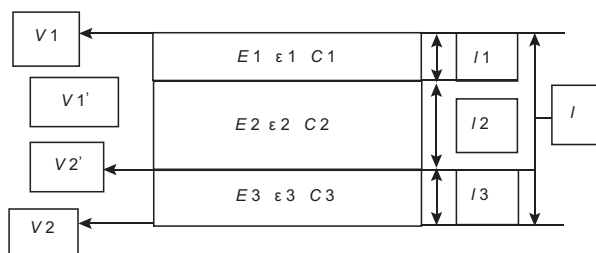


Рис. 1. Расположение диэлектриков в многослойном конденсаторе

Где $E_1, \epsilon_1, C_1; E_2, \epsilon_2, C_2; E_3, \epsilon_3, C_3$ — напряженность электрического поля, диэлектрическая проницаемость и емкость диэлектриков. V_1, V_2 — потенциалы на пластинах конденсатора. V_1', V_2' — потенциалы на границах диэлектриков. Определим суммарную диэлектрическую проницаемость

ϵ_p трехслойного конденсатора. Сначала рассмотрим систему, состоящую из двух диэлектриков воздуха $\epsilon_1 = 1$ и воды $\epsilon_2 = 80$. Емкость конденсатора

$$C = \theta / (V_1 - V_2) = \frac{S\epsilon}{4\pi l},$$

θ — заряд на поверхности пластин, $(V_1 - V_2)$ — разность потенциалов между ними, $E_0 = 4\pi\sigma$ — напряженность электрического поля в конденсаторе при воздушном заполнении, σ — плотность заряда на пластинах конденсатора.

Напряженность поля в первом слое диэлектрика —

$$E_1 = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_1} = \frac{E_0}{\epsilon_1} = \frac{V_1 - V_1'}{l_1},$$

во втором слое —

$$E_2 = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_2} = \frac{E_0}{\epsilon_2} = \frac{V_1' - V_2'}{l_2};$$

$$V_1 - V_2 = E_1 l_1 + E_2 l_2 = E_0 \left(\frac{l_1}{\epsilon_1} + \frac{l_2}{\epsilon_2} \right);$$

$$C_0 = \frac{\theta}{V_1 - V_2} = \frac{S}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{l_1 \epsilon_2 + l_2 \epsilon_1} \right) = \epsilon S / 4\pi l'.$$

C_0 — суммарная емкость системы из двух последовательно соединенных диэлектриков как $l' = l_1 + l_2$,

$$\epsilon_0 = l' \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{l_1 \epsilon_2 + l_2 \epsilon_1} \right). \quad (1)$$

Аналогичным способом можно рассчитать диэлектрическую проницаемость конденсатора, состоящего из трех диэлектриков, считая первые два диэлектрика как один с диэлектрической постоянной ϵ_0 . Тогда выражение для вычисления общей диэлектрической постоянной ϵ_p конденсатора, состоящего из трех последовательно включенных диэлектриков имеет вид

$$\epsilon_p = l \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_3}{l_1 \epsilon_3 + l_3 \epsilon_0} \right). \quad (2)$$

Подставляя выражение (1) в (2) получим развернутую формулу для вычисления диэлектрической проницаемости

трехслойного конденсатора без учета краевых эффектов

$$\varepsilon_p = l \left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3}{l \varepsilon_2 \varepsilon_3 + l_2 \varepsilon_1 \varepsilon_3 + l_3 \varepsilon_1 \varepsilon_2} \right). \quad (3)$$

Полученные выражения (2, 3) для расчета многослойного конденсатора справедливы при бесконечных линейных размерах пластин с расстоянием между ними значительно меньше их размеров. В этом случае можно считать, что распределение заряда на поверхности пластин и электрического поля между ними равномерное, но на практике конденсатор имеет конечные размеры.

2. КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ И ВКЛАД ЕГО В ВЕЛИЧИНУ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

В зависимости от размеров пластин и расстояния между ними может произойти нарушение равномерности распределения заряда по их поверхности и однородности поля между ними. С уменьшением этого соотношения между размерами пластин и увеличением расстояния между ними приводит к скоплению заряда на их краях и, соответственно, к нарушению однородности поля вблизи краев. Линии поля, при этом, уплотняются, деформируются и вываливаются за края пластин. Они могут не только начинаться и оканчиваться на внутренних краях, но начинаться и оканчиваться на внешних краях пластин (см. рис. 2).

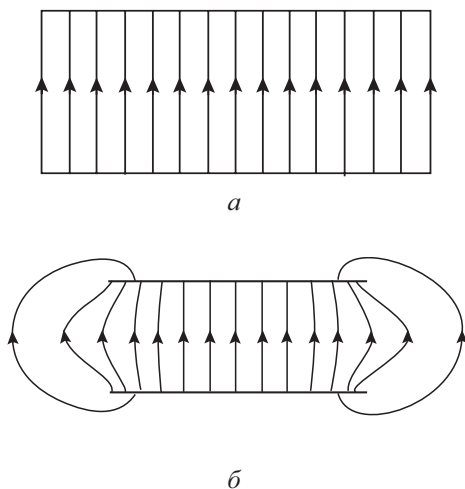


Рис. 2. Распределение поля в конденсаторе, *a* — поле плоского конденсатора без учета краевых эффектов, *б* — с учетом краевых эффектов

Заряженный конденсатор содержит в себе запасенную электрическую энергию, которая выделяется при его разряде. Эта энергия взаимодействует с обкладками конденсатора, заряженными разноименными зарядами. Величина запасенной энергии

$$W = \frac{\theta U}{2} = C \frac{U^2}{2} = \frac{S}{8\pi l} (E_0 l)^2 = \frac{E_0^2}{8\pi} V,$$

$V = S l$ — объем конденсатора. Объемная плотность электрического поля

$$W = \frac{1}{8\pi} E_0^2. \quad (4)$$

Сила, действующая между обкладками конденсатора,

$$F = \theta E = \frac{\theta E_0}{2} = \frac{\sigma S E_0}{2} = S E_0^2 / 8\pi,$$

поле одной пластины $E = E_0 / 2$.

Сила действует только на площадь одной противоположной пластины, но сама на себя пластина не действует. Сила направлена внутрь конденсатора, она не давит пластину, а ее тянет. Давление электрического поля

$$P = F / S = W = \frac{1}{8\pi} E_0^2.$$

Давление и объемная плотность электрического поля равнозначны. Объемная плотность электрического поля порождает эквивалентное давление электрического поля. Если конденсатор заполнить диэлектриком с диэлектрической постоянной ε , то энергия, объемная плотность, электрическая сила взаимодействия и давление в конденсаторе уменьшается в ε раз

$$W = \frac{1}{8\pi \varepsilon} E_0^2 V; F = \frac{1}{8\pi \varepsilon} E_0^2 S, P = \frac{1}{8\pi \varepsilon} E_0^2. \quad (5)$$

Формулы (5) справедливы не только для электростатических полей, но и для электрических полей, меняющихся во времени.

Таким образом, из выше описанного можно сделать вывод. Краевой эффект, возникающий на краях обкладок конденсатора, зависит от величины объемной плотности электрического поля (давления). Величина объемной плотности зависит от формы и размеров обкладок, расстояния между ними, диэлектрической проницаемости среды и однородности поля. С увеличением давления электрического поля происходит сгущение и деформация линий электрического поля и, соответственно, с их вывалом за пределы обкладок. Деформация и вывал силовых линий происходит на краях обкладок и они порождают краевой эффект (см. рис. 2б). Краевой эффект можно уменьшить введением в конденсатор диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью. При наличии краевых эффектов емкость конденсатора C_u , состоящая из двух параллельно включенных емкостей, будет равна сумме этих емкостей — емкости с однородным полем C_p и емкости краевых эффектов ($C_{кр}$). Параллельное соединение этих емкостей объясняется тем, что они находятся под общим потенциалом

$$C_u = C_p + C_{кр}; \epsilon_u = \epsilon_p + \epsilon_{кр}. \quad (6)$$

Расчет ϵ_p производится при отсутствии краевых эффектов ($C_{кр} = 0, \epsilon_{кр} = 0$), что соответствует бесконечным линейным размерам пластин и очень малому расстоянию между пластинами ($\ell \ll S$). На практике пластины имеют конечные размеры. При малых размерах пластин и расстоянием между ними сравнимое с их размерами, краевая емкость может оказать значительное влияние на истинную величину. Строгий расчет емкости плоского конденсатора с учетом краевых эффектов представляет сложную и трудоемкую задачу. Поскольку емкость конденсатора зависит от геометрических размеров обкладок, их взаимного расположения и диэлектрической проницаемости среды. Точное аналитическое решение краевого эффекта возможно для ряда простейших систем. Приближенное аналитическое выражение для емкости можно получить с помощью метода средних потенциалов [3], который основан на том, что электрическая

емкость слабо зависит от распределения заряда на пластинах конденсатора, для чего надо вычислить ряд поверхностных интегралов. Кроме этого имеется ряд методов решения краевой задачи такие, как комфортные отображения эквивалентных зарядов, интегральных уравнений Лямэ (при зависимости потенциала от одного параметра), сеток и других методов. Все эти методы расчета основаны на всевозможных предположениях и допущениях. Основным допущением является малые расстояния между обкладками ($\ell \ll S$). А если система состоит из нескольких разных диэлектриков и с размерами пластин сравнимыми или меньше расстояния между ними ($\ell \geq S$), то неизвестно, есть ли такой метод расчета краевого эффекта с данным условием. Нами получена эмпирическая формула учета краевых эффектов $\epsilon_{кр}$, при выше указанных условиях ($\ell \geq S$), которая имеет вид

$$\epsilon_{кр} = 0,7 \left[\frac{1}{x+0,1} + 50x - (1,5x^3)^{9,7} \right], \quad (7)$$

где

$$X = \frac{h}{l}; h — \text{высота столба воды в цилиндре,}$$

l — высота цилиндра ($l = 45$ мм), $0,1 \leq X \leq 1$.

Кроме того, для расчета диэлектрической постоянной цилиндра, заполненного водой, необходимо учесть его собственную диэлектрическую постоянную ϵ^* . Общее выражение для диэлектрической проницаемости ϵ_u представлено в виде

$$\epsilon_u = \epsilon_p + \epsilon_{кр} + \epsilon^*. \quad (8)$$

Диэлектрическую постоянную ϵ^* можно измерить резонансным методом или рассчитать [2]. Измеренная величина $\epsilon^* = 3,04$. Исходя из уравнения (8)

$$\epsilon_u = \epsilon^* + l \left(\frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3}{l \epsilon_2 \epsilon_3 + l^2 \epsilon_1 \epsilon_3 + l^3 \epsilon_1 \epsilon_2} \right) + 0,7 \left[\frac{1}{x+0,1} + 50x - (1,5x^3)^{9,7} \right]. \quad (9)$$

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ

Значение диэлектрической проницаемости многослойного диэлектрика от высоты столба воды в цилиндре определяется из выражения

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= \epsilon_u - \epsilon_{кр} - \epsilon^* = \\ &= \epsilon_u - \epsilon^* - 0,7 \left[\frac{1}{x+0,1} + 50x - (1,5x^3)^{9,7} \right]. \end{aligned}$$

Из выражения (3) определяется конкретная компонента диэлектрической проницаемости (например, ϵ_2)

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_p \epsilon_1 \epsilon_3}{l \epsilon_1 \epsilon_3 - l \epsilon_p \epsilon_3 - l \epsilon_1 \epsilon_p}. \quad (10)$$

При снижении столба воды меньше 0,8 высоты цилиндра величина ϵ_p значительно уменьшается и ее невозможно достаточно точно определить по экспериментальным данным. На рис. 3 приведено семейство кривых зависимостей диэлектрических постоянных многослойного конденсатора от высоты столба воды в цилиндре. 1 — расчетная кривая без краевых эффектов, 2 — экспериментально измеренная кривая с учетом ϵ^* . 3 — расчетная кривая краевых эффектов, определенная за счет вычета значений ϵ_p кривой 1 из значений кривой 2, при общей высоте столба воды.

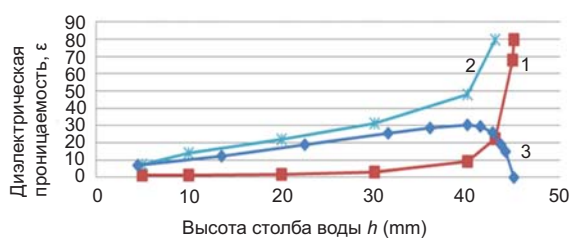


Рис. 3. Выделение краевых эффектов

Кривая 1 (нижняя) — рассчитана по формуле (3), кривая 2 (верхняя) — экспериментально измерена резонансным методом, кривая 3 (средняя) — рассчитана по формуле (7). Из рисунка 3 следует, что измеренная кривая 2 с учетом краевого эффекта (кривая 3) хорошо согласуются с кривой 1.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА, ОГРАНИЧЕННОГО ЩЕЛЬЮ ЭКРАНА

При внесении в резонатор возмущающего тела большого размера происходит значительное понижение резонансной частоты, что может привести к появлению дополнительной резонансной частоты второго типа колебаний. Это позволяет проводить исследования биообъекта на частотах двух типов колебаний. В нашем случае в полуволновом резонаторе, при внесении возмущающего тела в виде экранированного диэлектрического цилиндра большого размера (длина $l = 130$ мм, диаметр 30 мм), возникают два типа колебаний: один на частоте $f_p = 474, 550$ МГц, второй на частоте $f_p = 800$ МГц.

Для определения оптимального объема используется резонансный метод расчета диэлектрической постоянной.

$$\epsilon_1 = 1 + 0,5 \frac{\Delta f_1}{f_p} \frac{V_p}{V_\epsilon} \text{ — без воды в цилиндре,}$$

$$\epsilon_2 = 1 + 0,5 \frac{\Delta f_2}{f_p} \frac{V_p}{V_\epsilon} \text{ — с водой в цилиндре.}$$

$$\Delta f_1 = f_0 - f_{p1}, \Delta f_2 = f_0 - f_{p2}.$$

Истинное значение диэлектрической проницаемости воды в щелевом объеме составляет $\epsilon_2 - \epsilon_1 = \epsilon_u$. Для резонансных частот $f_{1p} = 800$ МГц и $f_{2p} = 753, 550$ МГц величина $\epsilon_u = 8,764$.

Оптимальный объем щели равен

$$V_0 = \frac{0,5 \Delta f}{f_{1p}} \frac{V_p}{\epsilon_u - 1}, (V_p \text{ — объем резонатора,}$$

диаметр экранированного цилиндра $d = 30$ мм, ширина щели $l = 15$ мм) величина $V_0 = 10,6 \text{ см}^3$)

Для резонансных частот $f_{1p} = 474, 550$ МГц и $f_{2p} = 464, 223$ МГц, величина $\epsilon_u = 3,28$. Оптимальный объем щели на частоте $f_{1p} = 474, 550$ МГц составляет $V_0 = 15,3 \text{ см}^3$.

3.2. ПОТЕРИ ВЧ-МОЩНОСТИ В ОБЪЕМЕ ЩЕЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ

Добротность резонатора $Q = \frac{\omega W}{p}$, где ω , w , p — резонансная частота резонатора, запасенная энергия и омические потери соответственно.

1. Без воды в диэлектрическом цилиндре

$$Q_1 = \frac{\omega_1 W_1}{p_1}, P_1 = \frac{\omega_1 W_1}{Q_1},$$

2. С водой в диэлектрическом цилиндре

$$Q_2 = \frac{\omega_2 W_2}{p_2}, P_2 = \frac{\omega_2 W_2}{Q_2}.$$

Полагая, что $\omega_1 \ll \omega_2$, $W_1 \approx W_2$ омические потери составляют

$$\Delta P = P_2 - P_1 = P_2 \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right);$$

$$\frac{\Delta P}{P_2} = \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right) = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right).$$

При резонансной частоте $f_{1p} = 800$ МГц и без воды в диэлектрическом цилиндре величина добротности составляет $Q_1 = 1045$. При наличии воды и частоте $f_{2p} = 753,55$ МГц

добротность равна $Q_2 = 151$. Потери ВЧ-

мощности $\frac{\Delta P}{P_2} = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) = 85\%$.

На резонансной частоте $f_{1p} = 474,550$ МГц добротность составляет $Q_1 = 1630$, на частоте $f_{2p} = 464,223$ МГц величина $Q_2 = 1300$. Потери ВЧ-мощности

$$\frac{\Delta P}{P_2} = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) = 20\%.$$

Выводы: 1. На частоте $f_p = 800$ МГц ширину щели необходимо уменьшить. 2. На частоте $f_p = 474,550$ МГц можно сохранить размер ширины щели такой же $l = 15$ мм или уменьшить так, чтобы один размер щели

применять на обеих частотах ($f_p = 800$ МГц и $f_p = 474,550$ МГц).

Измерена зависимость добротности резонатора (см. рис. 4) от высоты столба воды в диэлектрическом цилиндре (диаметр 8 мм, высота 45 мм).

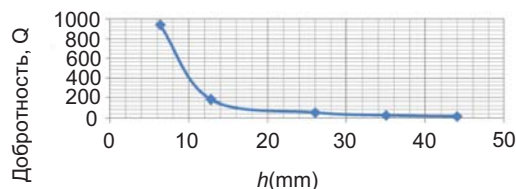


Рис. 4. Изменение добротности резонатора от уровня столба воды в диэлектрическом цилиндре

ВЫВОДЫ

Контроль изменения состояния организма биообъекта, помещенного в прямоугольный резонатор, осуществляется путем измерения его диэлектрической проницаемости. Повышение чувствительности процессов измерения диэлектрической проницаемости происходит за счет учета краевых эффектов в диэлектриках биологических структур.

Основным условием при вводе компонентов иммунной системы в ткани и органы является прозрачность эндотелиальных мембран кровеносных сосудов от холестерина и кальция. Было обнаружено, что диэлектрическая постоянная и добротность резонатора зависят от положения цилиндра с водой (вертикальное, горизонтальное) при высоте столба воды меньше высоты узкой стенки волновода при одинаковом объеме воды.

Таким образом, полученные данные дают возможность наблюдать за истинным изменением состояния организма биологического объекта, помещенного в прямоугольный резонатор, при воздействии на него статических поперечных электрического и магнитного полей с контролем ВЧ-измерением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ройт А. кн. Основы иммунологии. // Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 328 с.
2. Dovbnya A. N., Yefimov V. P., Kramskoy G. D. Suppression of malignant neoplasms in biological structures by method of immune therapy // Problem of Atomic Science and Technology. — 2017, No. 6 (112). Series: «Nuclear Physics Investigation» (69). — P. 142–144.

3. Сивков М. А., Алешин Ю. К. Специальное решение уравнения реального конденсатора в случае статики. XXII Международная научная конференция «Ломоносов — 2015», Москва. Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, <https://lomonosov-msu.ru/>

REFERENCES

1. Rojt A. kn. Osnovy immunologii. // Per. s angl. — M.: Mir, 1991. — 328 p.
2. Dovbnya A. N., Yefimov V. P., Kramskoy G. D. Suppression of malignant neoplasms in biological structures by method of immune

therapy // Problem of Atomic Science and Technology. — 2017, No. 6 (112). Series: «Nuclear Physics Investigation» (69). — P. 142–144.

3. Sivkov M. A., Aleshin Yu. K. Special'noe reshenie uravneniya real'nogo kondensatora v sluchae statiki. XXII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Lomonosov — 2015», Moskva. Fizicheskij fakul'tet MGU imeni M. V. Lomonosova, <https://lomonosov-msu.ru>