

И.Н. Сачков

О КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

Контактное лицо: Игорь Николаевич Сачков, e-mail: insatch-47@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Показать, что соединительная ткань, образующая внутренние поверхности кровеносных сосудов, может являться концентратором внешнего электрического поля.

Материал и методы: Ранее при изучении воздействия электромагнитных полей и излучений на организм человека использовались, как правило, расчетный метод SAR и экспериментальный метод тканеэквивалентных фантомов-манекенов. Их реализация предполагала, как правило, что поглощающая среда является однофазной. При этом не учитывались эффекты, связанные с тем, что биологическая ткань является смесью компонент, диэлектрические проницаемости которых отличаются в десятки раз, а размеры частиц фазовых составляющих, как правило, не превышают одного миллиметра. В статье представлены результаты разработки компьютерной модели, позволяющей анализировать неравномерное распределение электрического поля в подобном объекте. Выполнены вычислительные эксперименты с использованием авторской программы на основе метода конечных элементов.

Результаты: Структура ткани, содержащей кровеносные капилляры, имитировалась матричными системами, содержащими цилиндрические включения, сечения которых характеризовались круглой и прямоугольной формами. Проведены компьютерные эксперименты по расчетам картин пространственных распределений напряженности электрического поля. Варьировались значения диэлектрической проницаемости матрицы и включений, относительные размеры и взаимное положение включений. Процессы считались стационарными и осесимметричными. Обнаружено, что если внешнее электрическое поле направлено вдоль оси цилиндрического капилляра, напряженности поля внутри капилляра и в окружающей ткани оказываются близкими друг другу. Если же внешнее поле направлено перпендикулярно оси капилляра, возникает значительная (десятки раз) концентрация напряженности в соединительной ткани, окружающей капилляр. Полученные результаты могут использоваться при анализе воздействий на организм человека стационарных электромагнитных полей, а также электромагнитных волн, длина которых существенно превышает размер кровеносных капилляров. Обращается внимание, что в область концентрации напряженности электрического поля и мощности выделения тепла попадает эндотелий, выполняющий ряд важных физиологических функций.

Заключение: Полученные данные свидетельствуют, что при анализе механизмов возникновения патологических изменений, создаваемых электрическим полем и электромагнитным излучением в живой ткани, необходимо учитывать, что повышенным риском характеризуются прежде всего внутренние поверхности кровеносных сосудов. Особое внимание должно уделяться областям, в которых происходит сближение сосудов друг с другом.

Ключевые слова: неионизирующее излучение, многофазные ткани человека, кровеносные сосуды, электромагнитное поле, метод конечных элементов, концентрация электрических полей, эндотелий, компьютерное моделирование

Для цитирования: Сачков И.Н. О концентрации напряженности внешнего электрического поля на внутренних поверхностях кровеносных сосудов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 1. С. 60–66. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-60-66

DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-60-66

I.N. Sachkov

On the Concentration of External Electric Field Intensity on the Internal Surfaces of Blood Vessels

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Contact person: I.N. Sachkov, e-mail: insatch-47@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To show that connective tissue forming the inner surfaces of blood vessels can act as a concentrator of an external electric field.

Material and methods: Previously, when studying the effects of electromagnetic fields and radiation on the human body, the SAR calculation method and the experimental method of tissue-equivalent phantom dummies were used. Their implementation usually assumed that the absorbing medium is homophase. At the same time, the effects associated with the fact that biological tissue is a mixture of components whose permittivities differ by tens of times, and the particle sizes of the phase components, as a rule, do not exceed one millimeter, were not taken into account. The article presents the results of developing a computer model that allows analyzing the uneven distribution of the electric field in such an object. Computational experiments were performed using the author's program based on the finite element method.

Results: The structure of tissue containing blood capillaries was simulated by matrix systems containing cylindrical inclusions, the cross-sections of which were characterized by round and rectangular shapes. Computer experiments were conducted to calculate the patterns of spatial distributions of the electric field strength. The values of the permittivity of the matrix and inclusions, the relative sizes and mutual positions of the inclusions were varied. The processes were considered stationary and axisymmetric. It was found that if the external electric field is directed along the axis of the cylindrical capillary, the field strengths inside the capillary and in the surrounding tissue are close to each other. If the external field is directed perpendicu-

lar to the capillary axis, a significant (tens of times) concentration of tension occurs in the connective tissue surrounding the capillary. The results obtained can be used to analyze the effects of stationary electromagnetic fields on the human body, as well as electromagnetic waves whose length significantly exceeds the size of blood capillaries. It is noted that the endothelium, which performs a number of important physiological functions, falls into the area of concentration of electric field intensity and heat generation power.

Conclusion: The data obtained indicate that when analyzing the mechanisms of occurrence of pathological changes created by an electric field in living tissue, it is necessary to take into account that the internal surfaces of blood vessels are characterized primarily by an increased risk. Particular attention should be paid to areas in which vessels converge with each other. Further development of specialized computer programs and their implementation in clinical research practice is expected.

Keywords: *non-ionizing radiation, multiphase human tissues, blood vessels, electromagnetic field, finite element method, concentration of electric fields, endothelium, computer modeling*

For citation: Sachkov IN. On the Concentration of External Electric Field Intensity on the Internal Surfaces of Blood Vessels. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(1):60–66. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-60-66

Введение

В последнее десятилетие продолжился интерес к прогнозированию результатов воздействия электромагнитных полей на организм человека. В частности, в работе [1] представлены статистические данные, которые свидетельствуют, что расширение сотовой мобильной связи приводит к росту числа опухолей головного мозга. Подобным образом, в [2] осуществлен обзор новых исследований, указывающих на влияние сотовой связи на состояние щитовидной железы человека. В статье [3] обращено внимание на патогенное действие электромагнитных излучений на слизистую оболочку кишечника. Общие проблемы воздействия электромагнитных полей были сформулированы в работе [4]. Обращено внимание на резкий рост мощности источников электромагнитных полей в жизнедеятельности человека. Авторы цитируемой работы указывают на то, что за последние 50 лет суточная мощность радиоизлучений суммарно возросла более чем в 50 тыс. раз.

Делаются предположения о существовании возможных механизмов повреждения ДНК лимфоцитов [5], возникновения гемобластозов, опухолей центральной нервной системы и ряда других новообразований человека [6], производимых под действием электромагнитных излучений.

В обширном клиническом исследовании [7] показано, что облучение от постоянно действующей радиолокационной установки разрушает у работников систему функциональных процессов регуляции и иммунной системы. В частности, сделан вывод, что облучение работников приводило к «угнетению и истощению процессов нервной и эндокринной регуляции, к сдвигу в обмене веществ, угнетению синтетических процессов и ряду других последствий».

При анализе механизмов воздействия электромагнитных полей на организм человека основное внимание было обращено на тепловые эффекты. При этом использовались экспериментальные методы, связанные с применением фантомов, содержащих биоэквивалентную ткань, а также расчетные численные методы, позволяющие оценить нагрев биоэквивалентных тканей различных органов организма человека [8]. Наиболее распространенным подходом, позволяющим оценивать физическое воздействие электромагнитных полей на человеческий организм, являлась замена реального объекта фантомом, содержащим биоэквивалентную ткань [9]. Процесс нагрева живой ткани СВЧ-излучением характеризовался величиной SAR (Specific Absorption Rate) [10–11]. Она равна отношению мощности, поглощаемой в данной ячейке, к массе биологической ткани в ней. При расчете SAR использовались значения напряженности электрического поля E , а так-

же электрической проводимости σ и плотности биологической ткани ρ :

$$\text{SAR} = \sigma |E|^2 / \rho, \quad (1)$$

Значения напряженности E могут быть получены как экспериментально, так и расчетными методами на основе метода конечных элементов и метода конечных разностей [8].

Следует отметить, что имеются работы, в которых обсуждаемый вред электромагнитных полей представляется несущественным на фоне природных явлений (см. в частности, [12]). Необходимо выяснить, насколько основательны предлагаемые сомнения.

Заметим далее, что в последнее десятилетие был обнаружен ряд механизмов нетеплового биологического действия электромагнитных излучений на живые организмы. Прежде всего, установлено, что как стационарное электрическое, так и поле СВЧ-волны, значительно меняют физико-химические свойства воды, одного из основных компонентов живого организма. Показано, что облучение приводит к уменьшению удельного сопротивления, изменению коэффициента вязкости и реакционной способности дистиллированной воды [13]. В работе [14] получено, что облучение приводит к увеличению pH и изменению ИК-спектров поглощения дистиллированной воды. Ряд новых результатов отражен в материалах ежегодной конференции, проводимой институтом ИОФ РАН, (см. в частности, [15]).

Можно полагать, что обсуждавшиеся выше работы, связанные с нетепловым действием электромагнитных полей, нуждаются в дальнейших исследованиях. При этом следует особо отметить, что объектами цитированных выше исследований являлись однофазные системы.

Подводя итог представленному выше краткому обзору литературных данных, можно сделать следующие выводы. При исследованиях результатов воздействия электромагнитных полей основное внимание уделялось изучению тепловых процессов, реализующихся в однофазных средах. Представляется необходимым развитие новых методов исследования в обсуждаемой области. По мнению автора, проблема экспериментального изучения распространения электромагнитных полей в многофазных биологических объектах заключается в том, что размеры частиц фазовых составляющих оказываются в ряде случаев порядка единиц микрон. Кроме того, введение зондов в ткань существенно возмущает электрическое поле, так и функциональное состояние организма. Дополнительные возможности изучения многофазных объектов, характеризующихся микронными размерами компонент, предоставляет компьютерное моделирование процессов распространения электрических полей в них. Компью-

терное моделирование позволяет учесть, что фазовые составляющие живой ткани значительно различаются по значению диэлектрической проницаемости, а также по форме частиц и взаимному расположению частиц.

Основная цель предлагаемой работы состоит в создании подобной методики и проведении компьютерных экспериментов, направленных на выявление закономерностей процессов распространения электрического поля в микронеоднородных средах. В качестве объекта целесообразно выбрать ткань, содержащую систему кровеносных капилляров. Как известно, вода и кровь обладают значением диэлектрической проницаемости, в десятки раз превышающей таковую иных компонентов живой ткани [16]. Можно ожидать, что в подобной системе должна существовать значительная пространственная неоднородность распределения напряженности электрического поля [17]. Следует выяснить общие закономерности формирования картины пространственного распределения электрического поля в живой многокомпонентной ткани.

Вторая цель работы связана с тем, что для получения корректных значений тепловыделения, характеризующих традиционным методом SAR, необходимо учитывать, что величины как локальной, так и эффективной макроскопической напряженности электрического поля E существенно зависят от микроструктуры и значений диэлектрической проницаемости компонент многофазной ткани. При этом плотность тепловыделения СВЧ-излучений зависит от квадрата величины E и, соответственно, от эффективной диэлектрической проницаемости данного типа ткани.

Материал и методы

Рассмотрим живую ткань, содержащую кровеносные капилляры. В реальности они характеризуются достаточно сложным строением. Осуществим идеализацию рассматриваемой системы. Будем полагать что в рассматриваемых фрагментах ткани сосуды и капилляры характеризуются цилиндрической формой, при этом оси их параллельны друг другу. Будем учитывать нерегулярность взаимного расположения и полидисперсность величин радиусов кровеносных сосудов. Будем считать, что соединительная ткань, содержащая их, является однофазной. В рассматриваемых условиях можно считать, что структура является матричной [17, с.23]. На рис. 1 изображены характерные схемы сечений рассматриваемой среды. Области, заполненные кровью, выделены серым цветом. Относительные диэлектрические проницаемости матрицы и включений считаем различающимися на порядок величины и равными ε_m и ε_i соответственно.

Ограничимся рассмотрением ситуаций, когда электрическое поле либо стационарно, либо длина электромагнитной волны оказывается много большей, чем размер расчетной области. Считаем процессы электрической релаксации достаточно быстрыми в сравнении с периодом колебаний волны. В описываемых условиях электрическое поле можно считать потенциальным и стационарным.

В модели не учитывался кровоток в сосудах, поскольку он не влияет на напряженность электрического поля.

Рассмотрим два характерных вида процессов. В случае поперечных сечений среды учитываем наличие плоской симметрии, описываемой системой декартовых координат (x, y) . В случае продольных сечений распространение электрического поля носит одномерный характер. Описание одномерной ситуации проведем в последующих разделах статьи. Обратимся здесь к двумерным процессам.

Учтем, что распространение электрического поля в многофазной среде можно рассматривать как процесс переноса электрического поля, в котором диэлектрическая проницаемость является коэффициентом переноса, а локальные величина и направление вектора напряженности определяются пространственным распределением электрического потенциала, $E = -\text{grad}(\varphi)$ [17, с. 7].

Рассчитаем далее пространственное распределение потенциала $\varphi(x, y)$, реализующееся в рабочих областях, рис. 1. С этой целью используем вариационную формулировку уравнений переноса [18]. Учитываем условие экстремальности функционала:

$$\chi = \int_V (\varepsilon \text{grad} \varphi)^2 dV, \quad (2)$$

где φ – электрический потенциал, ε – локальная проводимость, V – объем расчетной области, dV – элемент ее объема. Функционал χ имеет смысл произведения энтропии, при этом $(\text{grad} \varphi)$ и $(\varepsilon \text{grad} \varphi)$ играют роль термодинамической силы и термодинамического потока соответственно.

Для нахождения пространственного распределения электрического потенциала $\varphi(x, y)$ в подобной двухфазной среде используем формализм метода конечных элементов (МКЭ). Общие особенности его реализации очень хорошо описаны в цитируемой выше книге [18]. Используем также ряд методических приемов, представленных в работе [19], в которой была установлена зависимость электрической проводимости многофазных композиционных резистивных материалов от форм включений.

На рис. 1 изображены схемы расчетных областей, применявшиеся для изучения особенностей пространственных распределений напряженности электрического поля в плоскости, перпендикулярной осям капилляров, конфигурации C, S, B при распространении поля параллельно осям сосудов.

Система «С» характеризует ситуацию, когда центры осей соседних цилиндров образуют прямоугольную решетку, параметр Δ характеризует близость сосудов друг к другу. Конфигурация «S» описывает отклонения в расположении центров осей от симметрии, параметр φ описывает «несоосность» [16]. «B» – отражает возможную бидисперсность радиусов капилляров, характеризуемую параметром R_2/R_1 . Конфигурация «L» представляет ситуацию, когда напряженность внешнего электрического поля ориентирована вдоль осей сосудов, Λ_m и Λ_m – проводимости областей для потока напряженности электрического поля [17, с.7].

Используем расчетные области прямоугольной формы, подобные изображенным на рис.1 штриховыми линиями. Учитываем следующие граничные условия. Границы типа ab и cd полагаем изопотенциальными, а типа ad и bc – адиабатическими [19].

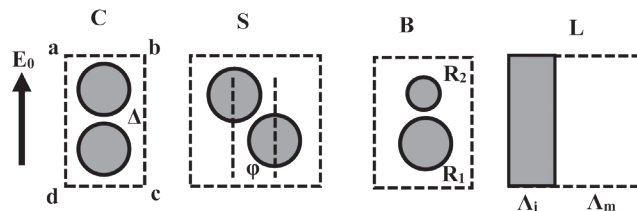


Рис. 1. Схемы основных вариантов формирования расчетных областей при распространении электрического поля через системы кровеносных капилляров

Fig. 1. Schemes of the main options for the formation of computational domains during the propagation of an electric field through systems of blood capillaries

На основе описанного ранее формализма [19], в настоящей работе была создана компьютерная программа объемом около 800 операторов на языке Фортран. Она состояла из головной программы и девяти подпрограмм. Основная программа обеспечивала ввод-вывод данных и организовывала циклы, способные имитировать течение процесса во времени. Подпрограммы осуществляли ряд последовательных действий. Первая из подпрограмм генерировала исходную сетку равномерных разбиений с использованием треугольных симплекс-элементов. Следующая подпрограмма производила коррекцию координат узлов в соответствии с расположением произвольного числа круглых включений и присвоение треугольникам соответствующих значений проводимости. Затем использовались стандартные подпрограммы, хорошо описанные в книге Л. Сегерлиндта [18], позволяющие реализовать и решать систему уравнений для искомых узловых значений потенциала.

В заключение работы организовывался вывод массивов цифровой информации, позволяющей далее визуализировать результаты расчетов напряженностей электрических полей, плотностей тепловыделений и рассчитывать значения эффективной диэлектрической проницаемости, присущей данному типу структуры.

На рис. 2 представлена блок-схема программы. Цифры на схеме соответствуют следующим элементам: 1 – головная подпрограмма, обеспечивающая ввод исходных данных, 2 – подпрограмма исходной триангуляции равномерной сетки; 3 – корректировка положений узлов в соответствии с границами включений и идентификация локальных проводимостей симплекс-элементов; 4 – решение системы уравнений относительно узловых значений потенциала; 5 – подпрограмма расчета напряженностей электрического поля и эффективной диэлектрической проницаемости; 6 – организация файлов, предназначенных для последующего анализа и визуализации распределений напряженностей и для передачи данных в архив с целью возможного дальнейшего использования иными специализированными программами.

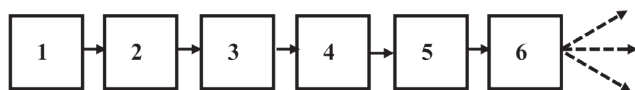


Рис. 2. Блок-схема программы
Fig. 2. Program flow chart

Использование языка Фортран обеспечивало высокую эффективность расчетов и возможность последующей стыковки с другими обособленными программами и развитие различных сценариев деградации ткани.

Результаты расчетов

В представленной работе проведены вычислительные эксперименты по исследованию геометрических особенностей пространственных распределений напряженности электрического поля $E(x, y)$ в живой ткани, содержащей кровеносные капилляры. Расчеты выполнены на сетках с плотностью разбиения в сечении 200×200 элементов.

Погрешность расчета значений электрического потенциала оценивалась с помощью методик, представленных подробно в [19]. Они основаны на воспроизводимости результатов расчетов, выполненных при различном числе включений, представленных в рабочей области, различной плотности разбиений, а также путем использования соотношений дуальности Дыхне. При

этом во внимание принимались лишь те результаты, относительная погрешность которых не превышала 0,1 %.

На рис. 3 представлены типичные зависимости относительной локальной напряженности E/E_0 от локальных значений координат (x, y) для конфигурации «С». Справа изображена схема системы отсчета. Применялась локальная система декартовых координат, центр которой 0 располагался на внутренней поверхности одного из капилляров, рис. 4. Ось y ориентирована параллельно направлению невозмущенного электрического поля, а x – перпендикулярно ей. При этом использовались безразмерные координаты, $x = X/L$, $y = Y/L$, где L – размер расчетной области в направлении y .

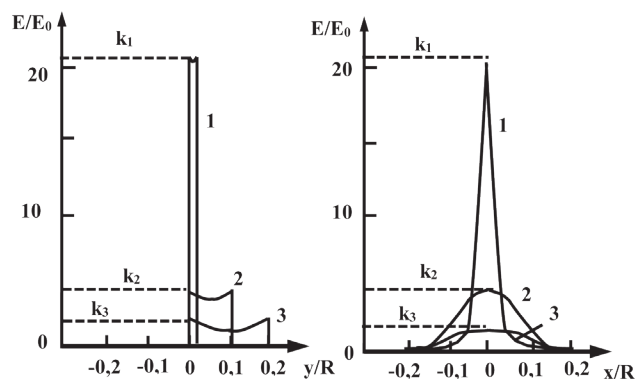


Рис. 3. Схемы пространственных распределений относительной напряженности электрического поля в продольном (слева) и поперечном (справа) направлениях для конфигурации «С» при Δ/R , равных 0,04, 0,1 и 0,2 для кривых 1–3 соответственно, рассчитанные при $\epsilon_i/\epsilon_m = 20$

Fig. 3. Schemes of spatial distributions of the relative electric field strength in the longitudinal (left) and transverse (right) directions for configuration “C” with Δ/R equal to 0.04, 0.1 and 0.2 for curves 1–3, respectively, calculated at $\epsilon_i/\epsilon_m = 20$

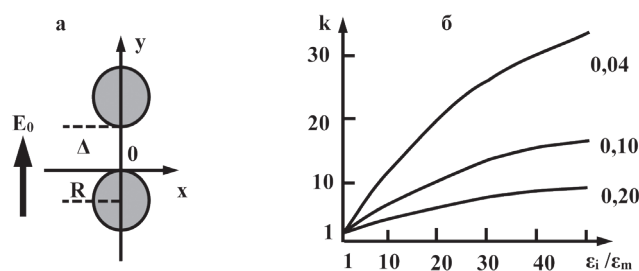


Рис. 4. Схема локальной системы координат (слева) и характерные зависимости коэффициента концентрации электрического поля от контраста диэлектрических проницаемостей; цифры у кривых – значения параметра Δ/R

Fig. 4. Scheme of the local coordinate system (left) and characteristic dependences of the electric field concentration coefficient on the contrast of dielectric constants; the numbers on the curves are the values of the parameter Δ/R

Обращает внимание, что внешнее электрическое поле существенно трансформируется в результате взаимодействия с пространственно-неоднородной двухфазной средой биологической ткани. При этом в направлении оси y электрическое поле концентрируется в пространстве между соседними капиллярами. Эффект концентрации напряженности можно охарактеризовать параметром концентрации $k = E_m/E_0$, где E_m – максимальное значение локальной напряженности, E_0 – не-

возмущенное ее величина. Систематизация результатов расчетов показала, что максимальное значение напряженности формируется в точке, расположенной на внутренней поверхности капилляра при $x = 0$, $y = 0$. Значение параметра концентрации k существенно зависит от относительного расстояния между поверхностями соседних капилляров Δ/R , а также от контраста значений диэлектрической проницаемости крови, содержащейся в капилляре, и проницаемости соединительной ткани, окружающей его, $\varepsilon_i/\varepsilon_m$ (рис. 4).

Распределение напряженности электрического поля $E(y)$ в продольном направлении имеет вид ступенчатой функции, а в поперечном направлении, $E(x)$, – подобно гауссовой функцией, характеризуемой дисперсией, близкой к величине радиуса капилляра. Более подробный анализ формы распределений как в продольном, так и в поперечном направлениях выходит за рамки настоящей публикации. Отметим лишь следующее.

Систематизация результатов расчетов для конфигурации «С» приводит к выводу, что важнейшим фактором, приводящим к эффекту концентрации напряженности электрического поля, является контраст значений диэлектрической проницаемости компонент ткани, $\varepsilon_i/\varepsilon_m$. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента концентрации k от величины отношения диэлектрических проницаемостей включения и матрицы при варьируемых значениях параметра близости Δ для конфигурации «С». При этом необходимо учитывать, что если $\varepsilon_i = \varepsilon_m$, электрическое поле является однородным, то есть $k = 1$. Увеличение контраста диэлектрических проницаемостей крови и стенки капилляра приводит к увеличению концентрации напряженности электрического поля на границе раздела фаз. Эффект резко усиливается, если сосуды значительно сближаются друг с другом. При тесном соседстве ($\Delta/R=0,04$) локальное значение напряженности превышает среднюю по образцу более чем в 30 раз.

Следует отметить, что величина k не зависит от масштаба, то есть от радиуса включения. Размер сосуда влияет лишь на дисперсию и, соответственно, на объем области, характеризующей повышенным значением напряженности.

Далее, систематизация результатов расчетов показала, что дополнительным фактором, влияющим на эффект концентрации является параметр несоосности φ , иллюстрируемый системой «S». Выяснилось, что эффект концентрации усиливается, если центры соседних включений располагаются соосно направлению внешнего поля, то есть центры осей цилиндрических капилляров находятся на линии, параллельной направлению невозмущенного электрического поля, $\varphi=0$. Более подробное исследование влияния несоосности на эффекты концентрации электрического поля представлены в [16].

Рассмотрение конфигурации «В» привело к выводу, что бидисперсность радиусов сосудов, характеризующая параметром бидисперсности, равным отношению радиусов сосудов, R_2/R_1 , не влияет существенно на величину параметра концентрации k .

Для ситуации «L», при которой вектор напряженности направлен параллельно осям сосудов, целесообразно использовать метод сеток сопротивлений Дульнева [17]. При этом оказывается, что величины термодинамических потоков в обеих фазах, изображенных на рис. 1, пропорциональны проводимостям фаз Λ_i и Λ_m , а локальные значения и направления вектора напряженности E одинаковы и равны E_0 . Таким образом, если внешнее электрическое поле направлено параллельно кровеносным сосудам, оно оказывается однородным, эффект

концентрации отсутствует. Метод конечных элементов использовался в случае «L» также для тестирования погрешностей расчетов.

Обсуждение

Выше были представлены результаты расчетов значений напряженности электрического поля в живой ткани, представляющей микронеоднородную среду, содержащую смесь компонентов, различающихся по значению диэлектрической проницаемости. Рассмотрен модельный объект, имитирующий соединительную ткань, пронизанную системой цилиндрических кровеносных сосудов. Выяснилось, что локальное значение напряженности E в подобном объекте может превышать среднее значение E_0 в десятки раз. Оказалось, что внутренние поверхности кровеносных сосудов образуют своеобразные концентраторы внешнего электрического поля.

Основным фактором, обеспечивающим наличие эффекта концентрации, является контраст значений диэлектрических проницаемостей рассматриваемых компонент ткани. Эффект концентрации электрического поля существенно усиливается для участков близко расположенных участков соседних кровеносных сосудов.

Необходимо учитывать наличие контрастов диэлектрической проницаемости и эффектов концентрации электрического в легочной ткани, по границам воздушной среды.

Выяснилось также, что эффект концентрации имеет существенно анизотропный характер, зависит от направления внешнего электрического поля. В частности, если электрическое поле направлено параллельно осям цилиндрических кровеносных сосудов, поле оказывается однородным и его напряженность равна значению невозмущенного внешнего. В реальности эффект концентрации носит «выборочный» характер и обеспечивается наличием хаотического характера направленности осей кровеносных сосудов в различных участках ткани.

Необходимо отметить, что в случае переменных электромагнитных полей мгновенное направление вектора напряженности электрического поля E_0 меняет свое направление, оказываясь либо параллельным, либо перпендикулярным оси капилляра. При этом локальное значение напряженности колеблется от E_0 до kE_0 .

Вихревое электрическое поле создает также и тепловые эффекты. При этом следует учитывать, что величина локального значения SAR оказывается пропорциональной квадрату напряженности электрического поля, то есть пропорциональной квадрату значения коэффициента концентрации k . Это означает, что существует также и эффект значительной концентрации удельной тепловой мощности, реализующийся на границах раздела компонент ткани с различающимся значением диэлектрической проницаемости, в частности, на внутренних поверхностях кровеносных сосудов и капилляров. При интерпретации результатов измерения или расчета температуры фантомов-эквивалентов реальные локальные значения величины нагрева многокомпонентной ткани могут в сотни раз превышать средние по образцу значения. Проведение расчетов температурных эффектов требует учета локальных значений электрической проводимости. Корректное решение задачи выходит за рамки настоящей работы.

Представленные выше данные могут иметь значение при анализе обсуждавшихся выше работ [1, 2, 4], в которых связывались действие СВЧ-излучений радиотелефонов и рост онкологических заболеваний головного мозга и щитовидной железы. Следует, по мнению

автора, учитывать эффекты концентрации электромагнитных полей на слизистых оболочках при объяснении влияния электромагнитных излучений на кишечник [3]. Возможно также, что эффекты многочисленных нарушений функциональных состояний работников в зоне действия радиолокационной установки обусловлена воздействием на эндотелий [7]. Следует заметить, что в зоны наибольшей концентрации электрического поля и нагрева попадают внутренние поверхности кровеносных сосудов и капилляров, содержащих эндотелий, играющий значительную роль в формировании физиологической системы организма человека, (см. в частности, [20] и ссылки там). Можно предположить, что ряд последствий воздействия СВЧ-излучений, обсуждавшихся во введении настоящей статьи, могут быть связаны с концентрацией электрической и тепловой нагрузки на эндотелий.

Таким образом, необходимо учитывать, что электрическое поле в точках его концентрации существенно выше, в сравнении со средним по ткани. Поэтому требования безопасности СВЧ-излучений необходимо ужесточить. Можно предположить, что воздействие на кровь, обсуждавшееся в [5, 6], связано не с электриче-

ской, а с магнитной компонентой электромагнитного поля. Подобным образом, воздействие электрического поля на плазму крови, находящуюся внутри кровеносных сосудов, требует дополнительного рассмотрения. Полученные результаты по концентрации электрических полей могут иметь место также для лимфатических сосудов и слизистых оболочек.

В настоящей работе использовались специализированные компьютерные программы. Опыт автора показал ряд достоинств подобного подхода, в сравнении со стандартным. К ним относятся: возможность стыковки с другими программами, возможность решения нестандартных задач, дешевизна, а также перспективы их внедрения в практику клинических исследований.

Заключение

При анализе процессов воздействия электрических полей на человека необходимо учитывать процессы концентрации напряженности электрического поля в определенных точках многокомпонентной ткани. В частности, на внутренних поверхностях кровеносных сосудов и капилляров концентрация напряженности может достигать десятков раз в сравнении со средней по ткани.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев Ю.Г. От электромагнитного смога до электромагнитного хаоса. К оценке опасности мобильной связи для здоровья населения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018. Т. 63. Вып.3. С. 28-33. doi: 10.12737/article_5b168a752d92b1.01176625.
2. Григорьев Ю. Г., Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Щитовидная железа – новый критический орган воздействия электромагнитных полей мобильной связи: оценка возможных последствий для детей и подростков // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. Вып. 2. С. 67-75. doi: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-67-75.
3. Самойлов А.С., Ушаков И.Б., Попов В.И., Попова О.А. Анализ адаптационно-приспособительных возможностей отдельных систем организма в условиях воздействия электромагнитного фактора экологического риска // Экология человека. 2019. Вып. 5. С. 37-42. doi: 10.33396/1728-0869-2019-5-31-42.
4. Довгуша В.В., Тихонов М.Н., Довгуша Л.В. Влияние естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности // Экология человека. 2009. Вып.12. С. 3-9.
5. Текуцкая Е.Е., Василиади Р.В. Структурные повреждения ДНК лимфоцитов периферической крови человека при воздействии физических факторов // Экология человека. 2017. Вып.12. С. 9-14. doi: 10.33396/1728-0869-2017-12-9-14.
6. Пинаев С.К. Роль гема в экологически обусловленном онкогенезе (обзор литературы) // Экология человека. 2023. Вып.1. С. 5-15. doi: 10.17816/humeco115234.
7. Зюзина И.В., Христофорова Н.К. Воздействие электромагнитных полей сверхвысоких частот на здоровье работников судоремонтного завода // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. Вып.4. С. 62-67.
8. Перов С.Ю., Кудряшов Ю.Б., Рубцова Н.Б. Оценка информативности теоретических основ и ограничений расчетной дозиметрии радиочастотных электромагнитных излучений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. Вып.2. С. 181-188.
9. Пальцев Ю.П., Походзей Л.В., Рубцова Н.Б., Богачева Е.В. Проблемы гармонизации гигиенических регламентов электромагнитных полей мобильных средств радиосвязи // Гигиена и санитария. 2013. Т. 92. Вып. 3. С. 39-42.
10. Квашнин Г. М., Квашнина О.П., Сорокина Т.П. Модель поглощения СВЧ-энергии в биологических тканях// Вестник КрасГАУ. 2009. № 2(29). С. 199-203.
11. Курушин А.А. Вычисление температуры нагрева головы человека при пользовании сотовым телефоном // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 4. С. 3-14.
12. Яргин С.В. Мобильные телефоны: о биологическом действии электромагнитного излучения радиочастотного диапазона // Главный врач Юга России. 2020. № 1(71). С. 47-51.
13. Павленко В.И., Лаптева С.Н. Изучение воды, активированной сверхвысокочастотным электромагнитным полем // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. Вып. 8. С. 47-52. doi: 10.6060/tcct.2017608.5552.
14. Бессонова А.П., Стась И.Е. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на физико-химические свойства воды и ее спектральные характеристики // Ползуновский вестник. 2008. №3. С. 305–309.
15. Сборник трудов Пятой Всероссийской конференции «Физика водных растворов». 21-23 ноября 2022 г., Москва. М.: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2022. 100 с.
16. Сачков И.Н., Чистяков М.А., Куанышев В.Т., Шнайдер А.В. Техносферная безопасность. 2019. № 2 (23). С. 33-41.
17. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 258 с.
18. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
19. Сачков И.Н. Влияние формы включений на проводимость двумерных регулярных матричных систем // Журнал технической физики. 1996. Т. 66 (12). С. 48–58.
20. Иванов А.Н., Попыхова Э.Б., Терешкина Н.Е. Вазомоторная функция эндотелия // Успехи физиологических наук. 2020. Т. 51 (4). С. 82-104. doi: 10.31857/S0301179820030066.

REFERENCES

1. Grigor'yev Yu.G. From Electromagnetic Smog to Electromagnetic Chaos. To Assess the Danger of Mobile Communications for Public Health. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2018;63;3:28-33 (In Russ.). doi: 10.12737/article_5b168a752d92b1.01176625.
2. Grigor'yev Yu.G., Khorseva N.I., Grigor'yev P.E. Thyroid Gland – a New Organ Affected by Electromagnetic Fields of Mobile Communications: Assessment of Possible Consequences for Children and Adolescents. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radia-

- tion Safety. 2021;66;2:67-75 (In Russ.). doi: 10.12737/1024-6177-2021-66-2-67-75.
3. Samoylov A.S., Ushakov I.B., Popov V.I., Popova O.A. Analysis of Adaptive and Adaptive Capabilities of Individual Body Systems under the Influence of Electromagnetic Factors of Environmental Risk. *Ekologiya Cheloveka* = Human Ecology. 2019;5:37-42 (In Russ.). doi: 10.33396/1728-0869-2019-5-31-42.
 4. Dovgusha V.V., Tikhonov M.N., Dovgusha L.V. The Influence of Natural and Man-Made Electromagnetic Fields on Life Safety. *Ekologiya Cheloveka* = Human Ecology. 2009;12:3-9 (In Russ.).
 5. Tekutskaia E.E., Vasiliadi R.V. Structural Damage to DNA of Human Peripheral Blood Lymphocytes under the Influence of Physical Factors. *Ekologiya Cheloveka* = Human Ecology. 2019;5:37-42 (In Russ.). doi: 10.33396/1728-0869-2017-12-9-14.
 6. Pinaev S.K. The Role of Heme in Environmentally Induced Oncogenesis (Literature Review). *Ekologiya Cheloveka* = Human Ecology. 2019;5:37-42 (In Russ.). doi: 10.17816/humecol15234.
 7. Zyuzina I.V., Khristoforova N.K. Impact of Ultra-High Frequency Electromagnetic Fields on the Health of Ship Repair Yard Workers. *Vestnik Rossiyskogo Universiteta Druzby Narodov. Seriya Ekologiya i Bezopasnost Zhiznedeyatel'nosti* = Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety. 2009;4:62-67 (In Russ.).
 8. Perov S.U., Kudryashov U.B., Rubtsova N.B. Evaluation of the Informativeness of the Theoretical Foundations and Limitations of the Calculated Dosimetry of Radiofrequency Electromagnetic Radiation. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2012;52;2:181-186 (In Russ.).
 9. Paltsev U.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Bogacheva E.V. Problems of Harmonization of Hygienic Regulations of Electromagnetic Fields of Mobile Radio Communication Devices. *Gigiena i Sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2013;92;3:39-42 (In Russ.).
 10. Kvashnin G.M., Kvashnina O.P., Sorokina T.P. Model of Microwave Energy Absorption in Biological Tissues. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of the Krasnoyarsk State Agronomic University. 2009;2;29:199-203 (In Russ.).
 11. Kurushin A.A. Calculation of the Heating Temperature of a Person's Head when Using a Cell Phone. *Zhurnal Radioelektroniki* = Journal of Radio Electronics. 2011;4:3-14 (In Russ.).
 12. Yargin S.V. Mobile Phones: on the Biological Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation. *Glavnyy Vrach Yuga Rossii* = Chief Physician of the South of Russia. 2020;1;71:47-51 (In Russ.).
 13. Pavlenko V.I., Lapteva S.N. Study of Water Activated by Ultra-High Frequency Electromagnetic Field. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya* = News of Universities. Chemistry and Chemical Technology. 2017;60;8:47-52 (In Russ.). doi: 10.6060/tect.2017608.5552.
 14. Bessonova A.P., Stas' I.E. Influence of High-Frequency Electromagnetic Field on Physical and Chemical Properties of Water and its Spectral Characteristics. *Polzunovskiy Vestnik* = Polzunovskiy Vestnik. 2008;3:305-309 (In Russ.).
 15. *Fizika Vodnykh Rastvorov* = Physics of Aqueous Solutions. Proceedings of the Fifth All-Russian Conference. November 21-23, 2022, Moscow. Moscow Publ., 2022. 100 p. (In Russ.).
 16. Sachkov I.N., Chistyakov M.A., Kuanyshv V.T., Shnayder A.V. The Influence of the Synergistic Mechanism of Surface Interdroplet Breakdown on the Risk of Electrical Injuries. *Tekhnosfernaya Bezopasnost'* = Technosphere Safety. 2019;2;23:33-41 (In Russ.).
 17. Dul'nev G.N., Novikov V.V. *Protsessy Perenosy v Neodnorodnykh Sredakh* = Transfer Processes in Heterogeneous Media. Leningrad Publ., 1991. 258 p. (In Russ.).
 18. Segerlind L. *Primeneniye Metoda Konechnykh Elementov* = Application of the Finite Element Method. Moscow Publ., 1979. 392 p. (In Russ.).
 19. Sachkov I.N. Influence of the Shape of Inclusions on the Conductivity of Two-Dimensional Regular Matrix Systems. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki* = Journal of Technical Physics. 1996;66;12:48-58 (In Russ.).
 20. Ivanov A.N., Popykhova E.B., Tereshkina N.E. Vasomotor Function of the Endothelium. *Uspekhi Fiziologicheskikh Nauk* = Advances in Physiological Sciences. 2020;51;4:82-104. (In Russ.). doi: 10.31857/S0301179820030066.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-29-00411, «Разработка компьютерных программ и методики их применения для создания новых технологий, использующих эффекты концентрации термодинамических сил в многофазных и неоднородных материалах».

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.10.2024. **Принята к публикации:** 25.11.2024.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

Financing. The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00411, "Development of computer programs and methods of their application to create new technologies using the effects of concentration of thermodynamic forces in multiphase and heterogeneous materials".

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.10.2024. **Accepted for publication:** 25.11.2024.