

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.24>

УДК: 576:532.59

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ВОДНЫХ СРЕДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Казаринов К.Д., Титов С.В.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, Московская область, г. Фрязино, пл. ак. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Аннотация. Получены математические соотношения для оценки гидродинамической неустойчивости в водных средах при микроволновом облучении в широком диапазоне частот. На основании полученных теоретических соотношений и собственных экспериментальных результатов предложена гипотеза коррекции внутриклеточного движения водной среды с помощью микроволнового излучения низкой интенсивности. При этом использовались данные из опубликованных в последние годы статей о регистрации конвекции цитозоля в клетках животных с помощью новых прецизионных флуоресцентных методов.

Ключевые слова: гидродинамическая неустойчивость, внутриклеточное движение, прецизионный флуоресцентный метод.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Автор для переписки: Титов Сергей Владимирович, pashkin1212@yandex.ru

Введение

Актуальность исследования чувствительности биологических объектов к микроволновому излучению определяется необходимостью изучения экологической безопасности современных промышленных и технических излучений [1], а также известных терапевтических применений микроволнового излучения [2]. Хотя стандартизованные характеристики микроволновых электромагнитных полей (ЭМП), применяемых в промышленности, а также в коммуникационных и компьютерных технологиях, не должны превышать допустимых нормативных пределов, реальное воздействие на здоровье новых коммуникационных технологий активно обсуждается в научной литературе [3]. Анализ известных опубликованных данных подтвердил способность микроволнового излучения вызывать окислительный стресс в организме человека за счет увеличения продукции активных форм кислорода [4, 5]. При этом необходимо отметить, что биологические эффекты были также зарегистрированы при уровнях воздействия ниже нормативных пределов, что вызывает дополнительные сомнения научной общественности в безопасности применяемых стандартов [6, 7]. Данные о нежелательном действии микроволнового излучения на биологические объекты постепенно накапливаются и, хотя они еще обладают статусом предварительных результатов (порою противоречивых), эти данные указывают на существование многоуровневых взаимодействий между излучением и биологическими системами [8]. Проведенный анализ экспериментальных результатов по изучению биологической чувствительности к микроволновому излучению низкой интенсивности показал отсутствие устойчивой зависимости между интенсивностью, частотой излучения, продолжительностью воздействия и обнаруженными эффектами [9]. Учитывая сложность вопроса оценки и интерпретации экспериментальных данных по изучению биологической чувствительности к микроволнам, полученных различными авторами, становится еще более актуальной задача изучения первичных механизмов воздействия электромагнитного излучения на биообъекты. Такие исследования,

несмотря на сложность общей картины взаимодействия микроволн с организмом человека, помогут на клеточном уровне определить первичные звенья, ответственные за восприятие излучения биологической системой.

1. Конвективный механизм и конвективные эффекты

Согласно опубликованным данным последних лет в клетках могут наблюдаться конвективные эффекты. До недавнего времени конвекция не считалась важной движущей силой перемещения внутриклеточной жидкости. Однако, в свете недавних наблюдений значительных внутриклеточных градиентов температуры была проведена переоценка этого механизма. Было установлено, что в клетке существуют области локального нагрева, которые создают условия для образования градиента плотности в цитоплазме, следовательно, и возможность конвективной циркуляции [10]. Результаты измерения внутриклеточной температуры с высоким разрешением показали, что ядро клетки и специфические органеллы представляют собой локальные источники тепла, запускающие процесс изменений температуры цитоплазмы [11]. В ядре репликация ДНК, транскрипция и процессинг РНК могут вносить вклад в локальный термогенез. В митохондриях локальное тепловыделение, вероятно, является результатом активного энергетического метаболизма [11]. Предполагается также участие митоза, гидролиза АТФ, или фосфорилирования центросомных белков, способных вызвать локальное повышение температуры в центросоме. Представленные данные значительных температурных различий между цитоплазмой, ядром и митохондриями свидетельствуют о необходимости теоретических исследований внутриклеточного транспорта, обусловленного конвективным механизмом.

2. Влияния микроволнового излучения низкой интенсивности на конвекцию в водном растворе

Представим теоретическую оценку возможности влияния микроволнового излучения низкой интенсивности на конвекцию в водном растворе. Для этого решим задачу о плотности энергии теплового источника при поглощении водной средой энергии микроволнового излучения в КВЧ диапазоне. Пусть электромагнитная волна падает из области $x < 0$ нормально к поверхности раздела $x = 0$ (x, y, z – лабораторная система координат). Падающая волна считается линейно поляризованной с векторами \vec{E} , направленным параллельно оси z , и \vec{H} , направленным параллельно оси x . Область пространства $x < 0$ (воздух) считается непоглощающей.

Запишем уравнения для распространяющейся плоской электромагнитной волны, которые в системе СГС имеют вид [12]:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где σ – электропроводность, ε – диэлектрическая постоянная, c – скорость света. При этом граничные условия задаются как:

$$\sigma = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \sigma, & 0 < x < L \end{cases}, \quad \varepsilon = \begin{cases} 1, & x < 0 \\ \varepsilon_2, & 0 < x < L \end{cases}. \quad (3)$$

Решение уравнений (1) и (2) ищем в виде комплексной монохроматической волны, при этом на границе раздела $x = 0$ должны выполняться условия непрерывности тангенциальных составляющих векторов \vec{E} и \vec{H} . Соответственно имеем при $x < 0$:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) описывает две встречные бегущие волны, распространяющиеся в положительном и отрицательном направлениях оси x , а именно:

$$E_1 = E_{0z} e^{i\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)} + \hat{E}_{10} e^{i\omega\left(t+\frac{x}{c}\right)}. \quad (5)$$

При $0 < x < L$ имеем:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{4\pi\sigma}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\varepsilon_2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (6)$$

с решением:

$$E_2 = \hat{E}_{20} e^{i(\omega t - \hat{k}_2 x)}, \quad (7)$$

где комплексное волновое число $\hat{k}_2 = \hat{k}'_2 - i\hat{k}''_2$ задается выражением:

$$\hat{k}_2^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon_2 - i \frac{4\pi\sigma}{\omega} \right), \quad (8)$$

причем

$$k'_2 = \frac{\omega}{c\sqrt{2}} \left(\sqrt{\varepsilon_2^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} + \varepsilon_2 \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$k''_2 = \frac{\omega}{c\sqrt{2}} \left(\sqrt{\varepsilon_2^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} - \varepsilon_2 \right)^{1/2}, \quad (10)$$

На границе двух сред ($x=0$) выполняются граничные условия для амплитуд волн:

$$E_{0z} + \hat{E}_{10} = \hat{E}_{20}, \quad (11)$$

и для амплитуд производных по координате:

$$\frac{\omega}{c} (E_{0z} - \hat{E}_{10}) = \hat{k}_2 \hat{E}_{20}. \quad (12)$$

Совместное решение уравнений (11) и (12) дает:

$$\hat{E}_{20} = \hat{z} E_{0z}, \quad (13)$$

где $\hat{z} = |\hat{z}| e^{i\varphi}$ – комплексный коэффициент прохождения волны по амплитуде.

Амплитуда и фаза этого коэффициента задаются как:

$$|\hat{z}| = \frac{2}{\sqrt{\left(1 + \frac{ck'_2}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{ck''_2}{\omega}\right)^2}}, \quad (14)$$

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{ck''_2}{\omega + ck'_2}. \quad (15)$$

Вследствие протекания тока в среде ($0 < x < L$) выделяется джоулево тепло с плотностью W :

$$\begin{aligned} W &= \sigma (\operatorname{Re} E_2)^2 = W_0 e^{-2k''_2 x} \cos^2(\omega t - k'_2 x + \varphi) \\ &= \frac{W_0 e^{-2k''_2 x}}{2} [1 + \cos 2(\omega t - k'_2 x + \varphi)] = W_1 + W_2, \end{aligned} \quad (16)$$

где $W_0 = \sigma |z|^2 E_{0z}^2$. Видно, что значения W колеблется около своего среднего значения $W_1 = W_0 e^{-2k''_2 x} / 2$ с удвоенной частотой 2ω . Величина W_1 определяет поглощение энергии КВЧ поля, которое происходит в слое толщиной $D = (2k''_2)^{-1}$. Используя полученное выражение, можно оценить глубину проникновения поля в среду:

$$D = (2k''_2)^{-1} = \frac{c}{\omega\sqrt{2}} \left(\sqrt{\varepsilon_2^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} - \varepsilon_2 \right)^{-1/2}. \quad (17)$$

Численные оценки для излучения с длиной волны $\lambda = 8,5$ мм дают значение $D = 0,3$ мм. При этом параметры ε'_2 , ε''_2 и σ рассчитывались по формулам:

$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_D)^2} + \varepsilon_\infty = 25, \quad (18)$$

$$\varepsilon''_2 = \frac{\omega\tau_D(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + (\omega\tau_D)^2} = 33, \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{\omega\varepsilon''_2}{4\pi} = 6 \cdot 10^{11}, \quad (20)$$

где были использованы следующие значения параметров соответствующих температуре $T = 30$ °С: статическая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_s = 76,8$,

высокочастотная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\infty} = 4,2$ и характерное время дебаевской релаксации $\tau_D = 7,2 \cdot 10^{-12}$ с.

В эксперименте использовалась кювета высотой $d = 0,6$ мм, что сравнимо с глубиной проникновения поля D . Таким образом, можно считать, что источник тепла распределен в жидкости, и существованием тепловых волн можно пренебречь.

3. Скорость конвекции

Поскольку в условии нашего эксперимента при КВЧ облучении можно считать, что энергия электромагнитного поля равномерно поглощается по всей толщине кюветы, то внутренний разогрев приведет к конвективному движению. Макроскопические движения жидкости описываются общей системой уравнений гидродинамики. Эта система включает в себя уравнения Навье-Стокса, уравнение переноса тепла и уравнение неразрывности, выражающее закон сохранения массы. Наиболее популярной моделью для описания конвекции в жидкостях, основанной на этих трех уравнениях, является приближение Буссинэска. Для несжимаемой жидкости, находящейся в поле тяжести, уравнение Навье-Стокса в приближении Буссинэска имеет вид:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla P + \eta \Delta \vec{v} + \rho(T) \vec{g}. \quad (21)$$

Здесь \vec{v} – скорость течения, T – абсолютная температура, P – давление, η – динамическая вязкость, \vec{g} – ускорение свободного падения, ∇ и Δ – операторы набла и Лапласа, соответственно. Часто для зависимости плотности $\rho(T)$ от температуры применяется линейная аппроксимация $\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta T')$, где β – коэффициент теплового расширения, $T' = T - T_0$ – отклонение температуры от равновесного состояния, ρ_0 – плотность жидкости при некоторой равновесной температуре T_0 . Поскольку коэффициент теплового расширения и отклонение температуры обычно относительно

невелики, то линейное приближение обладает приемлемой точностью в большинстве исследуемых задач.

Подстановка линейной зависимости плотности и перенормировка давления позволяют исключить слагаемое $\rho_0 \vec{g}$. Окончательно уравнение (21) принимает вид:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \Delta \vec{v} - \beta T' \vec{g}, \quad (22)$$

где $\nu = \eta / \rho_0$ – коэффициент кинематической вязкости.

Уравнением переноса тепла в случае несжимаемой жидкости при пренебрежении выделяющимся в жидкости теплом (вследствие внутреннего трения) имеет вид [13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T = \chi \Delta T + F, \quad (23)$$

где $\chi = \kappa / (\rho_0 c_p)$ – коэффициент температуропроводности, κ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная теплоемкость, F – слагаемое, обусловленное наличием источника тепла (КВЧ излучение) с мощностью W (Вт/см²), так что $F = W / (2\rho_0 c_p l)$ [14].

Уравнением неразрывности при этом имеет вид [13,14]:

$$\text{div} \vec{v} = 0. \quad (24)$$

Рассмотрим конвективное движение жидкости в плоском вертикальном слое (см. рис.1).

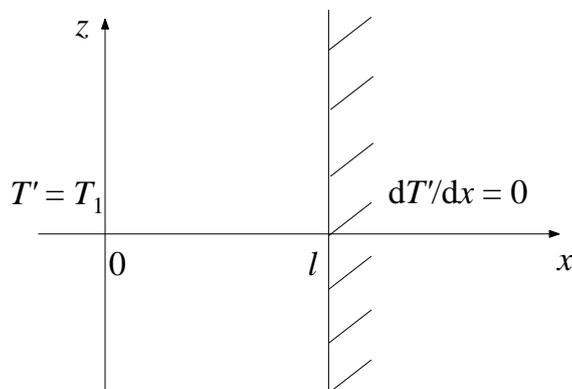


Рис. 1. Геометрия задачи.

При плоскопараллельном движении отлична от нуля лишь вертикальная составляющая скорости v_z . Из уравнения неразрывности следует, что $v_z = v_0(x)$. Предполагая, что температура также будет зависеть от поперечной координаты $T' = T'(x)$, получим из уравнений (22) и (23) уравнения для давления, температуры и скорости. При стационарном движении имеем:

$$\chi \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} + F = 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial x} = 0, \quad \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_0}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + g \beta T' = C. \quad (26)$$

Здесь C – постоянная разделения переменных. Граничные условия для температуры имеют следующий вид. При $x=0$ граница термостатирована:

$$T'(0) = T'_1,$$

а при $x=l$ граница теплоизолирована:

$$\left. \frac{\partial T'}{\partial x} \right|_{x=l} = 0.$$

Решая уравнение (25) с данными граничными условиями, находим распределение температуры:

$$T' = -\frac{F}{2\chi} x^2 + \frac{Fl}{\chi} x + T'_1. \quad (27)$$

Из уравнения (26) с учетом решения (27) и граничных условий $v_0(\pm l) = 0$ находим распределение скорости течения:

$$v_0 \sim \frac{g\beta Fl^4}{\chi\nu} \left(1 - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right) f \left(\frac{x}{l} \right). \quad (28)$$

Из (28) находим оценку для скорости:

$$v_0 \sim \frac{g\beta Fl^4}{\chi\nu} \sim 10^{-6} \text{ м/с}. \quad (29)$$

Значение параметров, используемых при оценке скорости приведены в таблице 1.

Таблица 1. Численные значения величин, используемых при оценке скорости.

g	10 м/с^2
ρ_0	10^3 кг/м^3
c_p	$4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$
ν	$10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
χ	$0,6 \text{ Вт/(К} \cdot \text{м)}$
β	$0,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$

Таким образом, для скорости конвекции в воде, поверхность которой облучается ММ волнами, получена оценка 1 мкм/с, что соизмеримо с размерами клеток человеческого организма.

4. Экспериментальные наблюдения

При экспериментальном исследовании биологического действия КВЧ облучения на модельные мембранные системы нами был установлен конвективный механизм обнаруженных эффектов ускорения мембранного транспорта [15]. Явление вынужденной конвекции было обнаружено при исследовании ряда мембранных модельных и нативных систем в водных средах в условиях КВЧ облучения: процессов перекисного окисления липидов, транспорта ионов кожей лягушки, лизиса дрожжевых клеток и др. [16].

Даже самые простые методы наблюдения позволили нам обнаружить перемещение слоев воды вблизи поверхности, на которую падает микроволновое излучение. В частности, хорошо видно под микроскопом движение взвешенных в воде частиц, например, эритроцитов в физиологическом растворе в тонкой кварцевой кювете, облучаемой микроволнами. Мы наблюдали также конвекцию, вызванную КВЧ излучением, вблизи плоской вертикальной стенки кварцевой кюветы, предварительно «пометив» воду следами от капель туши (тушевыми нитями). В другом эксперименте вводился через тонкую иглу на дно кюветы, заполненной водой, небольшой объем концентрированного раствора сахарозы и, после установления четко видимой верхней границы тонкого слоя сахарозы,

включалось облучение. При этом отчетливо было видно, как микроволны ускоряли подъем и размытие границы между сахарозой и водой.

Наиболее интересные результаты по обнаружению конвекции нами были получены при изучении кинетических особенностей реакций обратимой фотодимеризации акридина [17]. Микроволновое излучение интенсивностью 20 мВт/см^2 усиливало распад димеров, а дальнейшее повышение интенсивности облучения до 50 мВт/см^2 приводило к качественно новому явлению: наблюдались затухающие колебания интенсивности люминесценции с периодом в несколько минут. Наблюдаемые явления мы связывали с изменением режима вынужденной конвекции водного раствора в измерительной ячейке.

Аналогичные результаты были представлены в экспериментальной работе [18], выполненной в Филадельфийском Центре Биомедицинской Физики и посвященной изучению конвекции в водном растворе малой толщины при КВЧ облучении. Авторы данной работы наблюдали колебания температуры в фиксированной точке объема водного раствора при поглощении КВЧ излучения различной интенсивности. При увеличении мощности микроволнового излучения температура в начале монотонно возрастала, затем наблюдался колебательный процесс изменения температуры водной среды в наблюдаемой точке, который мог при определенных условиях (увеличения скорости конвективного движения воды и теплообмена в экспериментальной кювете) привести даже к некоторому снижению температуры. В то же время, следует отметить, что в условиях этих же экспериментов в кювете, заполненной гелем (т.е. в отсутствии режима вынужденной конвекции среды), температура облучаемого объекта монотонно повышалась, выходя на плато через время, приблизительно равное 40 мин после начала облучения [18].

В наших исследованиях движения водного раствора в экспериментальной кювете с помощью оптических методов при КВЧ облучении границы жидкости были получены оценки скорости воды (термокапиллярная конвекция). Точка касания светлым слоем пограничного слоя жидкости за время 1 мин перемещалась на 0,9 мм (15 мкм/с), что указывало на изменившееся

распределение температуры и течение воды при падающей мощности микроволнового излучения около 5 мВт/см^2 .

В других экспериментах при КВЧ облучении потоков водных растворов в капилляре мы установили зависимость скорости потока от интенсивности КВЧ облучения [19]. Таким образом, экспериментально было установлено, что КВЧ излучение способно ускорять водные потоки в эксперименте *in vitro*, и это увеличение связано, скорее всего, с изменением температуры пограничного слоя воды на границе вода-воздух или вода-твердое тело.

Заключение

Приведенные в данной работе результаты исследований показывают возможность регулирования с помощью КВЧ облучения низкой интенсивности скорости потоков водных растворов в модельных биологических объектах *in vitro*. В тоже время многочисленные данные об обнаруженных (в экспериментах *in vivo*) эффектах движения внутриклеточной цитоплазматической жидкости при наличии градиентов температуры, создаваемых внутри клеточными источниками тепла, подтверждают такую возможность.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Литература

1. D. Urbinello, W. Joseph, A. Huss, et al. Radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels in different European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits. // Environment international. 2014. Vol. 68. P. 49-54.
2. Т.А. Ордынская, П.В. Поручиков, В.Ф. Ордынский. Волновая терапия. М.: Эксмо. 2008

3. S. Sagar, S. Dongus, A. Schoeni, et al. Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review. // Journal of exposure science & environmental epidemiology. 2017.
4. E. Kazemi, S.M. Mortazavi, A. Ali-Ghanbari, et al. Effect of 900 MHz Electromagnetic Radiation on the Induction of ROS in Human Peripheral Blood Mononuclear Cells. // Journal of biomedical physics & engineering. 2015. Vol. 5. No 3. P. 105-114.
5. P. Chauhan, H.N. Verma, R. Sisodia, K.K. Kesari. Microwave radiation (2.45 GHz)-induced oxidative stress: Whole-body exposure effect on histopathology of Wistar rats. // Electromagnetic biology and medicine. 2017. Vol. 36. No 16. P. 20-30.
6. S.J. Starkey. Inaccurate official assessment of radiofrequency safety by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. // Reviews on environmental health. 2016. Vol. 31. No 4. P. 493-503.
7. M. Redmayne. International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF). // Electromagnetic biology and medicine. 2016. Vol. 35. No 2. P. 176-85.
8. Di Ciaula, A. Towards. 5G communication systems: Are there health implications? // International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2018. Vol. 221. No. 3. P. 367-375.
9. M. Simko, M.-O. Mattsson. 5G Wireless Communication and Health Effects-A Pragmatic Review Base on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. No 18. P. 3406. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183406>
10. S. Parte, et al. Dynamics associated with spontaneous differentiation of ovarian stem cells in vitro. // Journal of Ovarian Research. 2014. No 7. P. 25. <https://doi.org/10.1186/1757-2215-7-25>
11. S. Uchiyama, et al. A cationic fluorescent polymeric thermometer for the ratiometric sensing of intracellular temperature. // Analyst. 2015. Vol. 140. No 13. P. 4498–4506 <https://doi.org/10.1039/C5AN00420A>

12. М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.В. Сухоруков. Теория волн. М.: Наука. 1990. 432 с.
13. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука. 1972. 393 с.
14. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
15. К.Д. Казаринов. Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. 2018. Вып. 2 (537). С. 62-75.
16. K.D. Kazarinov, A.V. Putvinsky, V.S. Malinin. Interface Convection in Water as a Primary Mechanism of Extra High Frequency Irradiation. In: Electricity and magnetism in Biology and Medicine. Plenum publishing corporation. N.Y. 1999. P. 441-444.
17. Е.С. Дремина, В.С. Шаров, И.Г. Полников, К.Д. Казаринов. Изучение действия микроволнового излучения на фотохимические процессы биомолекул в водных растворах. Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2010. № 3. С. 57-63.
18. E.P. Khizhnjak. Temperature oscillation in liquid media caused by continuous (nonmodulated) millimeter wavelength electromagnetic irradiation / Khizhnjak E.P., Ziskin C. // Bioelectromagnetics. 1996. V. 17. P. 223-229.
19. К.Д. Казаринов, М.В. Городецкая, И.Г. Полников. Использование волноводно диэлектрического метода для контроля и исследований сильнопоглощающих жидкостей в микроволновом диапазоне. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. № 1 (520). С. 82-94.

Для цитирования:

Казаринов К.Д., Титов С.В. Теоретическое обоснование гидродинамической неустойчивости в водных средах под действием микроволнового излучения. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.24>