

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ЧАСТИЧНО ЗАМОРОЖЕННОМ БИООБЪЕКТЕ

А.В. Горелова

anastacia.gorelova@mail.ru

SPIN-код: 3721-4040

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены проблемы, возникающие при заморозке и разморозке биотканей. Обозначена актуальность проблемы, статистика пострадавших от обморожений за период с 1 января по 13 февраля 2017 г. Рассмотрены процессы повреждения клетки при различных скоростях заморозки и разморозки наиболее распространенными современными методами, показана их неэффективность. Предложен новый метод лечения тяжелых повреждений тканей, вызванных воздействием на организм низкой температуры. Проанализированы характерные особенности процесса поглощения СВЧ-волны в живой ткани в условиях переохлаждения, выведена математическая модель этого процесса. Выявлена и обоснована целесообразность разогрева частично замороженного биобъекта в поле СВЧ.

Ключевые слова

Обморожение, СВЧ-поле, тепловая волна, относительная диэлектрическая проницаемость воды, относительная диэлектрическая проницаемость льда, скорость заморозки клетки, СВЧ-отопление, вектор Пойнтинга, ампутация, мертвая клетка

Поступила в редакцию 12.03.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Как известно, Россия является одной из самых холодных стран в мире [1]. Достаточно сказать, что 65 % ее территории представлено зоной вечной мерзлоты [2] и что более 7 млн человек проживают в чрезвычайно холодных регионах, классифицируемых как «Крайний Север и приравненные к нему районы» [3]. В России случаи обморожения составляют приблизительно 10 % всех возможных травм. Лечение может продолжаться около двух и более месяцев, примерно в 90 % случаев подобные травмы заканчиваются потерей трудоспособности [4]. Так, за период с 1 января по 13 февраля 2017 г. от обморожений пострадали 5546 человек, из них 154 ребенка.

На данный момент при лечении обморожения травматологи, спасатели, врачи скорой помощи, придерживаются консервативных методов лечения, таких как растирание, помещение пострадавшего в ванну с постепенным увеличением температуры воды, медикаментозные усиления кровообращения и т. д.

Известны случаи применения СВЧ-энергии для борьбы с обморожениями. В качестве примера можно привести эксперимент [5], при котором осуществлялось обморожение задних лап у кроликов. В результате у животных экспериментальной группы наблюдалось более умеренное влияние холодной травмы, проявляющееся в более высокой температуре кожи поврежденной конечности,

более быстром исчезновении отека и меньшем распространении цианоза, некроза ткани конечности. Также известно о начале работы ученых-радиофизиков из Томского государственного университета, которые занимались данным вопросом совместно с медиками Томского военно-медицинского института (ТВМИ). Ими был предложен макет рабочей установки, но результаты работы не представлены, а в 2010 г. ТВМИ был расформирован, и работа остановилась.

Ученые из Университета Кентукки (США) занимались исследованием поведения клетки при охлаждении [6]. При температуре приблизительно $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ клетки и окружающая среда остаются размороженными и переохлажденными. В температурном диапазоне $-5\dots-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуются ледяные формы (рис. 1).

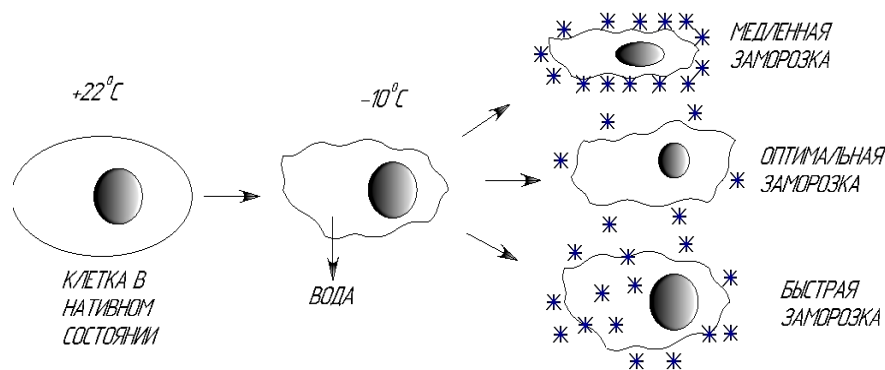


Рис. 1. Схематическое представление физических явлений в клетках в процессе замораживания

На рис. 1 видно, что за дальнейшее состояние клетки отвечает скорость заморозки.

Если клетки охлаждаются слишком быстро, при заморозке из клетки выходит внутриклеточная жидкость. Поскольку внутри клетки образуются кристаллы льда, поток через клеточную мембрану во время замораживания может вызвать внутриклеточные повреждения.

Если заморозка происходит медленно, то клетки испытывают серьезное объемное сжатие и длительное воздействие межклеточного раствора высокой концентрации (состоящий главным образом из электролитов), что, в конечном счете, способствует повреждению клетки. В любом случае сжатие клетки вызовет необратимые мембранные изменения, приводящие к тому, что эффективная область клеточной мембраны уменьшится. Введен термин «упаковочный эффект», который характеризует обратную зависимость выживания клетки от начального типового объема, занятого клеткой.

Если заморозка клетки происходит с оптимальной скоростью, клетки обезвоживаются и не замораживаются внутриклеточно.

В целом слишком высокая или слишком низкая скорость охлаждения может убить клетки, хотя механизмы, лежащие в основе повреждения клетки,

различаются. При медленном охлаждении повреждение клетки происходит из-за высокой концентрации раствора электролита, резкого обезвоживания клетки и последующего сокращения объема размороженной части. При высоких скоростях охлаждения повреждение происходит в результате разрыва из-за наличия внутреннего льда. Оптимальная скорость охлаждения для выживания клетки должна быть достаточно низкой, чтобы исключить образование внутреннего льда, но достаточно высокой, чтобы минимизировать эффекты сжатия.

На практике, как правило, речь идет о поврежденных клетках, которые уже не в состоянии выполнять свои функции, в том числе и защитного характера.

Теоретический анализ процесса отогрева биоткани с помощью СВЧ-поля до сих пор представлен не был.

Сравнительный анализ способов отогрева. Рассмотрим, что происходит при существующих способах лечения (рис. 2). Здесь теплота поступает снаружи (слева) вглубь тела (вправо).

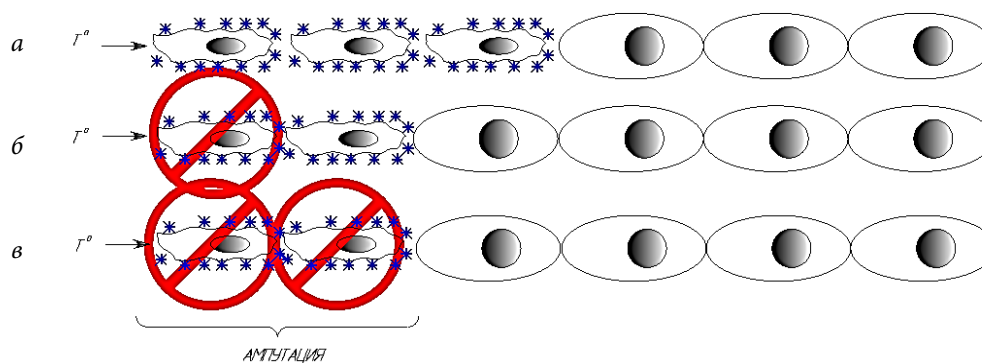


Рис. 2. Активная фаза лечения обморожения при существующих способах:

a — схематичное изображение состояния слоя биоткани при обморожении; *b* — схематичное изображение состояния слоя биоткани при отогреве; *v* — схематичное изображение состояния слоя биоткани в результате отогрева

— живая клетка; — замерзшая; — мертвая

Начальный момент лечения показан на рис. 2, *a*: пострадавший доставлен в клинику, все органы функционируют. Однако часть организма (в основном — конечности) находится в замороженном состоянии. Активная фаза лечения по существующим методикам показана на рис. 2, *b*. Отогреваются лишь наружные слои, но все еще замерзшая глубинная часть биоткани блокирует кровоснабжение отогретой части, что ведет к образованию благоприятной среды для патогенной флоры. В результате (рис. 2, *v*) после оттаивания появляется слой «мертвого тела», который необходимо ампутировать. Основной причиной, приводящей к необходимости ампутации, служит поступление теплоты снаружи внутрь при наличии внутренних замороженных участков тела.

Цель исследования — выявление особенности процесса отогрева частично замороженной живой биоткани при наличии внутреннего источника тепловой энергии и при исключении самопроизвольного оттаивания наружного слоя.

Наружный замороженный слой биоткани играет роль барьера для проникновения вредоносной микрофлоры в области нарушенного кровоснабжения, а оттаивающие области при отогреве изнутри получают нормальное кровоснабжение. Реализовать данный процесс может отогрев с помощью энергии СВЧ. Поводом для постановки данной задачи является существенное различие электродинамических характеристик льда и воды [7] (рис. 3).

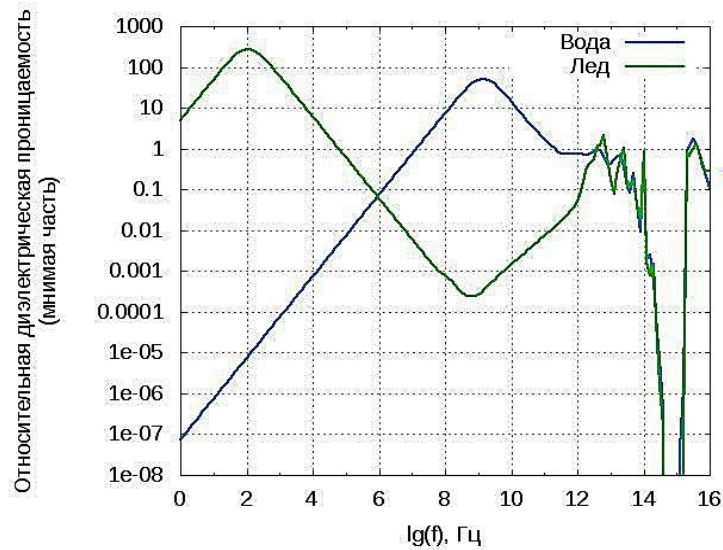


Рис. 3. Зависимость мнимой части относительной диэлектрической проницаемости воды и льда от частоты электромагнитных волн

Мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости среды ϵ_i определяет поглощение электромагнитной волны. Как видно на рис. 3, в диапазоне СВЧ ($\lg f \text{ Гц} = 9$) поглощение льда меньше поглощения воды, в основном определяющей поглощение в живой биоткани, в 16 000 раз. Это означает, что СВЧ-волна пронизывает замороженные клетки, практически не поглощаясь, и интенсивно поглощается в глубинных слоях. Таким образом, поле СВЧ можно рассматривать как источник тепловой энергии, находящийся внутри тела. Процесс разморозки для данного случая схематично изображен на рис. 4.

Теоретическое подтверждение гипотезы. Уравнения Максвелла для среды с параметрами, не зависящими от координат, имеют вид

$$\text{rot } \vec{H} = \epsilon_a \frac{d\vec{E}}{dt} + \sigma\vec{E} + j_{ct}; \tag{1}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu_a \frac{d\vec{H}}{dt}. \tag{2}$$

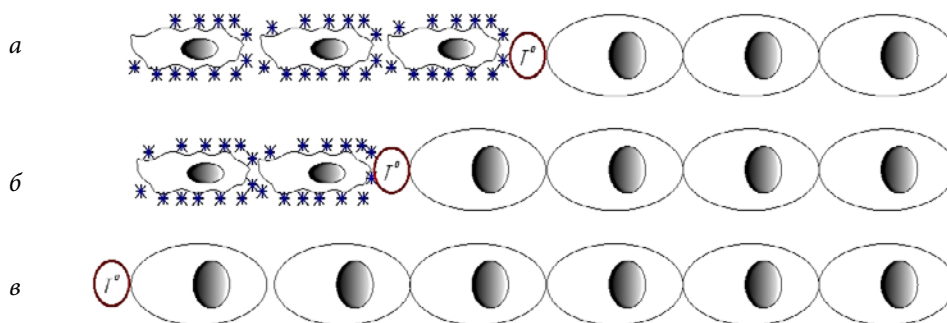


Рис. 4. Процесс размораживания с помощью энергии СВЧ:

a — схематичное изображение состояния слоя биоткани в начальный момент СВЧ-отогрева; *b* — схематичное изображение состояния слоя биоткани при СВЧ-отогреве; *в* — схематичное изображение состояния слоя биоткани в результате СВЧ-отогрева

Предположение о постоянных электродинамических характеристиках среды не является вполне корректным для решаемой задачи, поскольку диэлектрическая проницаемость биоткани с глубиной проникновения волны будет расти по мере уменьшения концентрации льда и увеличения концентрации воды. Однако в первом приближении его можно принять для качественной оценки. Более точное решение требует применения численных методов.

Умножим почленно уравнения (1) и (2) на \vec{E} и \vec{H} соответственно, вычтем уравнение второе уравнение из первого и получим следующее соотношение:

$$\vec{E} \cdot \text{rot} \vec{H} - \vec{H} \cdot \text{rot} \vec{E} = \epsilon_a \cdot \vec{E} \frac{d\vec{E}}{dt} + \sigma \vec{E}^2 + \mu_a \vec{H} \frac{d\vec{H}}{dt} + j_{\text{ст}} \vec{E}.$$

Известно, что

$$\vec{E} \cdot \text{rot} \vec{H} - \vec{H} \cdot \text{rot} \vec{E} = -\text{div}[\vec{E} \cdot \vec{H}]. \quad (3)$$

Проинтегрируем соотношение (3) по объему V :

$$\int_V \text{div}[\vec{E} \cdot \vec{H}] dV + \int_V \left(\epsilon_a \vec{E} \frac{d\vec{E}}{dt} + \mu_a \vec{H} \frac{d\vec{H}}{dt} \right) dV + \int_V \sigma \vec{E}^2 dV + \int_V j_{\text{ст}} \vec{E}^2 dV = 0;$$

$$\int_V \text{div}[\vec{E} \cdot \vec{H}] dV = \int_S [\vec{E} \cdot \vec{H}] dS,$$

где $\int_S [\vec{E} \cdot \vec{H}] dS = \int_S \vec{\Pi} dS = P$ — мощность, излучаемая из объема V , ограниченного площадью S , либо поступившая в объем ($\vec{\Pi}$ — вектор Пойнтинга); $\int_V \sigma \vec{E}^2 dV$ — тепловые потери в объеме V , обусловленные наличием токов проводимости

(разумеется, в крови, которая является электролитом, имеют место токи проводимости); $\int_V j_{ct} \vec{E} dV$ — мощность сторонних источников электромагнитного поля;

ля; $\int_V \left(\epsilon_a \vec{E} \frac{d\vec{E}}{dt} + \mu_a \vec{H} \frac{d\vec{H}}{dt} \right) dV$ — мощность, запасаемая объеме V .

Пусть в объеме отсутствует источник поля $j_{ct} = 0$. Учитывая, что

$$-\int_V \left(\epsilon_a \vec{E} \frac{d\vec{E}}{dt} + \mu_a \vec{H} \frac{d\vec{H}}{dt} \right) dV = -\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_a (\vec{E})^2}{2} + \frac{\mu_a (\vec{H})^2}{2} \right) dV,$$

получим

$$-\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_a (\vec{E})^2}{2} + \frac{\mu_a (\vec{H})^2}{2} \right) dV - \int_V \sigma \vec{E}^2 dV = \int_S \vec{\Pi} dS. \quad (4)$$

Для рассматриваемого случая прохождения СВЧ-волны через обмороженный участок тела выражение (4) является важнейшим соотношением, подтверждающим закон сохранения энергии. Разность мощности, вносимой электромагнитным полем в объем, и мощности, излученной из этого объема, равна сумме внутренней энергии в объеме и мощности тепловых потерь, обусловленных наличием токов проводимости в единицу времени.

Продифференцируем выражение (4) по z (координатная ось, направленная вглубь тела):

$$-\frac{\partial}{\partial z} \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon_a (\vec{E})^2}{2} + \frac{\mu_a (\vec{H})^2}{2} \right) dV - \frac{\partial}{\partial z} \int_V \sigma \vec{E}^2 dV = \frac{\partial}{\partial z} \int_S \vec{\Pi} dS.$$

Известно, что производная интеграла по параметру совпадает с интегралом от производной по параметру подынтегрального выражения, если последний равномерно сходится по этому параметру [8], что имеет место в рассматриваемом случае. Тогда можно записать

$$-\int_V \frac{\partial^2}{\partial z \partial t} \left(\frac{\epsilon_a (\vec{E})^2}{2} + \frac{\mu_a (\vec{H})^2}{2} \right) dV - \int_V \frac{\partial}{\partial z} (\sigma \vec{E}^2) dV = \int_S \frac{\partial}{\partial z} \vec{\Pi} dS. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что градиент изменения поглощенной энергии пропорционален градиенту модуля вектора Пойнтинга.

Рассматриваемая электромагнитная волна является монохроматической, т. е. имеет гармоническую зависимость от времени. В случае плоской волны будет зависимость лишь от одной пространственной координаты z .

$$\vec{E} = E(z) \cdot e^{i\omega t}; \quad \vec{H} = H(z) \cdot e^{i\omega t}. \quad (6)$$

Для качественного анализа в первом приближении допустим ничтожность свободных зарядов и токов в замороженной биоткани, тогда

$$\epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{rot} \vec{H}. \quad (7)$$

Дифференцируя (7) по времени и подставляя выражение для $\frac{\partial H}{\partial t}$, получаем

$$\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\text{rot} \vec{E}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \epsilon_a \mu_a \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= \nabla^2 \vec{E}; \\ \epsilon_a \mu_a \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} &= \nabla^2 \vec{H}. \end{aligned}$$

С учетом (6) для монохроматической волны получим

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} + k^2 \vec{E} = 0; \quad \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} + k^2 \vec{H} = 0. \quad (8)$$

где k — комплексное волновое число,

$$k = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}$$

Решая (8), получаем

$$\vec{E} = a_x E_0 e^{i(\omega t - kz)}, \quad \vec{H} = a_y H_0 e^{i(\omega t - kz)} \quad (9)$$

Векторы (9) связаны между собой следующим соотношением:

$$\sqrt{\mu_a} |\vec{H}| = \sqrt{\epsilon_a} |\vec{E}|.$$

Таким образом, вектор Пойнтинга

$$\vec{\Pi} = [\vec{E} \cdot \vec{H}] = \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} |\vec{E}|^2. \quad (10)$$

В общем случае ϵ_a, μ_a — комплексные числа, но поскольку в нашем случае присутствуют только диэлектрические потери,

$$\mu_a = \mu_0, \quad (11)$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_{\sim} (1 + i \operatorname{tg} \delta),$$

где $\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon_i}{\epsilon}$; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость; ϵ_{\sim} — относительная действительная проницаемость; ϵ_i — относительная мнимая проницаемость; δ — угол диэлектрических потерь.

Известно выражение для волнового числа

$$k = \beta - i\alpha,$$

где β — коэффициент фазы, характеризующий изменение фазы бегущей волны; α — коэффициент затухания, характеризующий уменьшение амплитуды бегущей волны [9],

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_a \mu_a}{2} \left[\left(\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \delta)^2} \right) - 1 \right]}. \quad (12)$$

Поскольку \vec{E} изменяется во времени по закону $\cos \omega t$, вектор Пойнтинга будет изменяться во времени по закону $(\cos \omega t)^2$, т. е. среднее значение за период будет равно половине амплитудного значения, так как

$$\frac{1}{T} \int_0^T (\cos \omega t)^2 dt = \frac{1}{2T} \int_0^T [(\cos 2\omega t) + 1] dt = \frac{1}{2}. \quad (13)$$

Нас интересует энергетика процесса, поэтому в волновом числе важен исключительно коэффициент затухания. Таким образом, с учетом выражений (11) и (13) вектор Пойнтинга (10) можно представить в виде

$$\Pi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_0}} E_0^2 e^{-2az} \quad (14)$$

Подставляя (12) в (14), получаем

$$\Pi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_0}} E_0^2 \exp \left[-2w \sqrt{\frac{\epsilon_a \mu_a}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg} \delta^2} - 1 \right)} z \right] \quad (15)$$

Для построения рабочих зависимостей сделаем предположение, что электродинамические параметры ткани в основном определяются наличием воды. Как было указано выше, для льда $\epsilon_n \approx 3,15$, $\operatorname{tg} \delta \approx 0$, тогда для человеческой ткани модуль относительной диэлектрической проницаемости ткани и угол диэлектрических потерь в предположении линейной зависимости от глубины проникновения, имеют вид

$$\epsilon_{\sim} = \epsilon_n \left(1 + a \frac{z}{L} \right); \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \delta = b \frac{z}{L}, \quad (17)$$

где L — глубина промерзания.

Данное предположение вполне реально. Наличие сосудов и теплообмен с организмом создают неравномерное распределение молекул замерзшей воды по объему. Поскольку предполагаемая длина волны (12,6 см) значительно превышает линейные размеры молекул воды, диэлектрическая проницаемость каждого элементарного слоя, перпендикулярного направлению распространения волны, будет пропорциональна объему незамерзшей воды.

Известно, что на частоте 2450 МГц мышечный слой имеет $\epsilon_- = 47,4$ и $\operatorname{tg} \delta = 0,306$, тогда для мышечной ткани на частоте 2450 МГц: $a = 15$, $b = 0,3$. Тогда с учетом (16) и (17) выражение (15) примет вид

$$\Pi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\pi}}{\mu_0} \sqrt{1 + \frac{a}{L} z} E_0^2} \exp \left[-2\omega \sqrt{\frac{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_{\pi}}{2} \left(1 + \frac{a}{L} z\right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{b}{L} z\right)^2} - 1\right)} z \right]. \quad (18)$$

Поскольку по условиям задачи $\left(\frac{b}{L} z\right)^2 \ll 1$, так как $b = 0,3$ и z в максимуме достигает значения L ,

$$\Pi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\pi}}{\mu_0} \sqrt{1 + \frac{a}{L} z} E_0^2} \exp \left[-2\omega \frac{b}{L} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_{\pi}}{4} \left(1 + \frac{a}{L} z\right)} z^2 \right].$$

С учетом формулы

$$\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = \frac{1}{z_0} = \frac{1}{120\pi} \text{ Ом}^{-1},$$

где $z_0 = 120\pi \text{ Ом}$ — волновое сопротивление вакуума; $\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Выражение (18) теперь имеет вид

$$\Pi(z) = \frac{\sqrt{\epsilon_{\pi}} E_0^2}{240\pi} \sqrt{1 + \frac{a}{L} z} \exp \left[-2\pi \frac{b}{L\lambda} \sqrt{\epsilon_{\pi} \left(1 + \frac{a}{L} z\right)} z^2 \right]. \quad (19)$$

В выражении (19) энергетика процесса определяется выражением под экспонентой. Сомножитель $\sqrt{1 + \frac{a}{L} z}$ определяет структуру самого поля, т. е. при возрастании диэлектрической проницаемости возрастает концентрация поля.

Обозначим $\Pi_0(z)$ — вектор Пойнтинга в точке z при условии отсутствия потерь. Это соответствует некой гипотетической среде, которая имеет такое же

значение действительной части диэлектрической проницаемости и нулевую мнимую часть. В данной среде отсутствуют потери, изменяется только концентрация самого поля:

$$P_0(z) = \frac{\sqrt{\epsilon_n} E_0^2}{240\pi} \sqrt{1 + \frac{a}{L}z}.$$

Поскольку отношение векторов Пойнтинга равно отношению соответствующих мощностей, отношение мощности волны в точке с координатой z в среде с потерями ($a \neq 0$) к мощности в точке с координатой z в среде без потерь ($a = 0$) имеет вид

$$\frac{P(z)}{P_0(z)} = \exp \left[-2\pi \frac{b}{L\lambda} \sqrt{\epsilon_n \left(1 + \frac{a}{L}z \right) z^2} \right], \quad (20)$$

где $P_0 = \frac{E_0^2}{210\pi}$ — средняя за период мощность падающей волны, приходящаяся на единичную площадь обмороженной поверхности.

Обозначим $\frac{\lambda}{L} = n$. Тогда (20) в относительных единицах глубины проникновения (отношение координаты к глубине промерзания) примет вид

$$\frac{P(z)}{P_0(z)} = \exp \left[-2\pi \frac{b}{n} \sqrt{\epsilon_n \left(1 + a \frac{z}{L} \right) \left(\frac{z}{L} \right)^2} \right]. \quad (21)$$

Температура в каждой области разогреваемой биоткани напрямую зависит мощности поглощенной в этой области электромагнитной энергии. В свою очередь, поглощаемая биотканью мощность СВЧ в исследуемом объеме равна мощности СВЧ-волны, пришедшей в объем, минус мощность СВЧ-волны, прошедшей данный объем.

Как следует из формулы (21), поглощаемая мощность P_{II} в некоем объеме с координатой z подчиняется соотношению

$$\frac{P_{II}(z)}{P_0(z)} = 1 - \frac{P(z)}{P_0(z)} = 1 - \exp \left[-2\pi \frac{b}{n} \sqrt{\epsilon_n \left(1 + a \frac{z}{L} \right) \left(\frac{z}{L} \right)^2} \right]. \quad (22)$$

Выражение (22) позволяет узнать зависимость градиента изменения мощности поглощения от глубины проникновения излучения в биоткань, т. е. от координаты z :

$$\text{Grad} \left(\frac{P_{II}}{P_0} \right) = \pi \frac{b\sqrt{\epsilon_n}}{n} \frac{z/L}{\sqrt{1 + a \frac{z}{L}}} \left(5a \frac{z}{L} + 4 \right) \exp \left[-2\pi \frac{b}{n} \sqrt{\epsilon_n} \sqrt{\left(1 + a \frac{z}{L} \right) \left(\frac{z}{L} \right)^2} \right].$$

На рис. 4 представлена зависимость градиента поглощения мощности СВЧ-излучения от зависимости глубины прохождения в биоткань для следующих случаев: $n = 12$ (глубина промерзания 1 см, сплошная линия), $n = 6$ (глубина промерзания 2 см, штриховая линия) и $n = 4$ (глубина промерзания 3 см, штрихпунктирная линия). На графике можно условно выделить три зоны: 1 — зона возрастания градиента мощности поглощения, 2 — зона очевидного максимума поглощения, 3 — зона уменьшения поглощения. Казалось бы, в зоне 3 поглощение должно быть больше, поскольку эта зона имеет большую температуру, следовательно, в ней меньше льда и больше свободной воды. Однако амплитуда СВЧ-волны, дошедшей до зоны 3, будет значительно меньше, чем в зоне 2, следовательно, в абсолютном значении поглощение будет меньше.

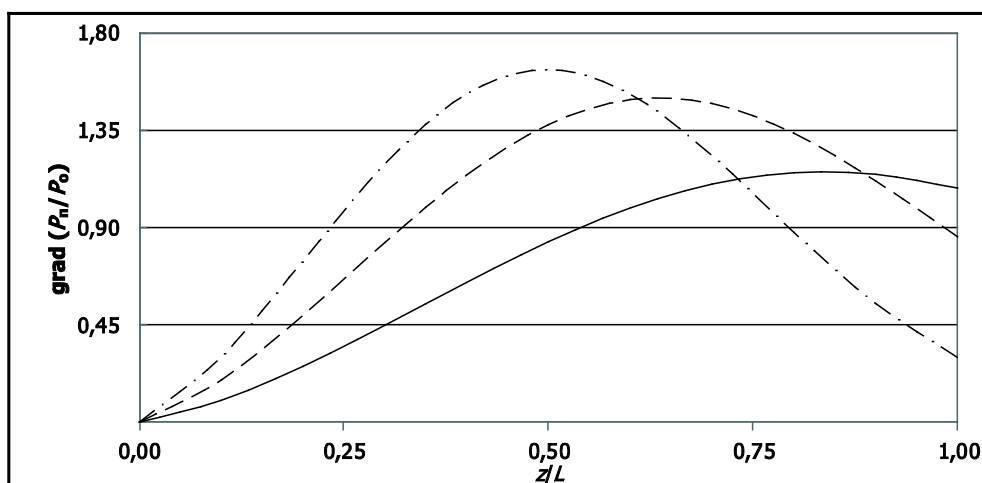


Рис. 4. Зависимость градиента относительной мощности поглощения от относительной глубины проникновения СВЧ-волны в замороженную живую биоткань

Температура биоткани пропорциональна поглощенной СВЧ-энергии, которая, в свою очередь, пропорциональна поглощенной мощности. Таким образом, наиболее прогретыми являются глубинные слои биоткани. Отогревая области в глубине, фронт температуры будет перемещаться из глубины наружу. Отметим также, что для отогретой биоткани в зоне 3 создаются достаточно комфортные условия. В этом случае уровень поглощения снижается и не ведет к перегреву. Если при отогреве по существующим методикам важен фактор времени и пациент подвергается интенсивному разогреву, то СВЧ-метод позволяет сделать сам процесс отогрева медленным без нанесения травм пострадавшему. Процесс отогрева очень болезненный, и чем он длительнее, тем меньше объем тела, охваченный отогревом, и тем меньше болезненность процесса.

Важным фактором является наличие одежды, примерзшей к телу. В существующих методиках отогрева одежду сразу же удаляют вместе с фрагментами кожи. В СВЧ-методе в этом нет необходимости, поскольку СВЧ-волна проходит через замерзшую одежду, практически не поглощаясь. Наиболее важным мо-

ментом применения СВЧ-метода является недопущение самовольного отогрева наружных слоев тела, когда размороженная клетка в отсутствие кровообращения превращается в кормовую базу для вредной микрофлоры. Для решения этой проблемы в замороженной области тела поддерживают отрицательную температуру.

Выводы. 1. В настоящее время существует множество методов борьбы с обморожениями — от научно обоснованных до «домашних». Все они малоэффективны, поскольку практически всегда дело заканчивается ампутацией. Поиск новых методов является актуальной задачей.

2. При разморозке обычным способом, за исключением случая идеальной скорости ранее полученного обморожения (см. рис. 1), клетка повреждается и перестает выполнять свои функции, в том числе защитного характера, создавая тем самым возможности для проникновения вредоносной микрофлоры из окружающего пространства в организм.

3. СВЧ-волны почти не поглощаются наружным обмороженным слоем тела. Практически вся СВЧ-энергия поглощается в глубине, на границе с неповрежденной тканью. Это определяет возникновение тепловой волны, направленно изнутри наружу, и дает организму возможность входить в норму в идеальных условиях, исключая возможность проникновения вредоносной микрофлоры из окружающего пространства.

4. Процесс разогрева СВЧ-полем тела, находящегося при отрицательных температурах, исключает саморазмораживание наружных слоев тела, которое может привести к проникновению вредоносной микрофлоры из окружающего пространства в организм с последующим его заражением.

Литература

- [1] Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Кершенгольц Б.М. Климатические изменения как фактор риска здоровья населения Российской Арктики. *Проблемы здравоохранения и социального развития Арктической зоны России*. Москва, Paulsen, 2011, с. 10–11.
- [2] Гаврилова М.К., ред. *Районирование (зонирование) Севера РФ*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2007, с. 64–98.
- [3] Чащин В.П., Деденко И.И. *Труд и здоровье человека на Севере*. Мурманск, Книжное издательство, 1990, 104 с.
- [4] How can a microwave save a frostbitten rabbit? URL: <http://www.bionity.com/en/news/152417/how-can-a-microwave-save-a-frostbitten-rabbit.html> (дата обращения 27.01.2017).
- [5] Парамонов Б.А., Хамин Е.Н. *Микроволновая терапия отморожения конечностей*. Клин. хирургия. 1992. № 3.
- [6] Zebrafish fin regeneration after cryoinjury-induced tissue damage. *Biology Open*, 2016, no. 5, pp. 819–828. URL: <http://bio.biologists.org/content/5/6/819>.
- [7] Диэлектрические свойства воды и льда. URL: http://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice (дата обращения 29.03.2017).
- [8] Справочник химика 21. Химия и химическая технология. URL: <http://chem21.info/info/87953/> (дата обращения 19.05.2017).

[9] Волны в диэлектрике. URL: http://know.sernam.ru/book_ter.php?id=26 (дата обращения 08.02.2017).

Горелова Анастасия Витальевна — студентка кафедры «Биомедицинская техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

THE MATHEMATICAL MODEL OF MICROWAVE ABSORPTION IN A PARTIALLY FROZEN BIOOBJECT

A.V. Gorelova

anastacia.gorelova@mail.ru
SPIN-code: 3721-4040

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We consider the problems arising when freezing and defrosting the bioissues. The article emphasizes the urgency of the issue and the statistical estimate of the people with cold-related injuries for the period from 1 January to 13 February 2017. It examines the processes of insult to cells under different speeds of freezing and defrosting by means of the most commonly used up-to-date techniques and shows their inefficiency. We suggest a new treatment mode for severe tissues injuries caused by low temperature impact on the organism. The work analyzes the characteristic features of the microwave wavelength absorption process in the living tissue under the hypothermia conditions and leads out the mathematical model of this process. The article elicits and justifies the viability of warming-up the partially frozen bioobject in the microwave field.

Keywords

Freezing injury, microwave field, heat wave, water relative permittivity, ice relative permittivity, freezing speed of the cell, microwave heating, energy-flux vector, ablation, cork cell

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Kershengol'ts B.M. Klimaticheskie izmeneniya kak faktor riska zdorov'ya naseleniya Rossiyskoy Arktiki. Problemy zdavookhraneniya i sotsial'nogo razvitiya Arkticheskoy zony Rossii [Climatic changes as a risk factor for health of the population. In: Problems of health and social development the Russian arctic]. Moscow, Paulsen publ., 2011, pp. 10–11.
- [2] Gavrilova M.K., ed. Rayonirovanie (zonirovanie) Severa RF [Zoning of the RF North]. Yakutsk, Izd-vo Instituta merzlotovedeniya SO RAS publ., 2007, pp. 64–98.
- [3] Chashchin V.P., Dedenko I.I. Trud i zdorov'ye cheloveka na Severe [Labour and human health in the North]. Murmansk, Knijnoe Izdatelstvo publ., 1990, 104p.
- [4] How can a microwave save a frostbitten rabbit? Available at: <http://www.bionity.com/en/news/152417/how-can-a-microwave-save-a-frostbitten-rabbit.html> (accessed 27 January 2017).
- [5] Paramonov B.A., Khamin E.N. Microwave therapy of frostbite of the extremities. Clinical surgery. 1992. no. 3.
- [6] Zebrafish fin regeneration after cryoinjury-induced tissue damage. *Biology Open*, 2016, no. 5, pp. 819–828. Available at: <http://bio.biologists.org/content/5/6/819>.
- [7] Dielektricheskie svoystva vody i l'da [Dielectric properties of water and ice]. Available at: http://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice (accessed 29 March 2017).

- [8] Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [Chemist handbook 21. Chemistry and chemical technology]. Available at: <http://chem21.info/info/87953/> (accessed 19 May 2017).
- [9] Volny v dielektrike [Waves in dielectric]. Available at: http://know.sernam.ru/book_ter.php?id=26 (accessed 08 February 2017).

Gorelova A.V. — student, Department of Biomedical Engineering Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.