

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ГРАНИЦА КОАГУЛЯЦИИ БАКТЕРИЙ В ФИЗИОЛОГИЧЕСКОМ РАСТВОРЕ

А.Е. Баринов

Рассматривается проблема температурных изменений структуры при воздействии на физиологический раствор, несущий физиологический объект. Изучение данных процессов особенно важно для понимания различных воздействий, включая СВЧ излучение, на организм человека. В работе описывается влияние нагрева на размерность кластеров в физиологическом растворе. Данное влияние предложено оценивать посредством температурной границы коагуляции.

Ключевые слова: физиологический раствор, плазма крови, биотехнологии, коагуляция, когезия.

Для понимания механизма воздействия на человека СВЧ электромагнитного поля необходимо исследовать распространение этого поля через ткани человека и его поглощение жидкостной средой. Основной жидкостной средой организма человека является кровь, состоящая из плазмы и форменных элементов. Плазма крови – жидкая часть крови. Процентное содержание плазмы в крови составляет 52–61 %. В состав плазмы крови входят вода (90–92 %) и сухой остаток (8–10 %). Часто для введения лекарств и для иных медицинских целей применяют растворы, изотоничные плазме крови – физиологические растворы.

Наиболее часто применяемым в медицине раствором такого типа является физиологический раствор – это 0,9 % водный раствор хлорида натрия. Известно значение удельной электропроводности при температуре человеческого тела (37 °С) $1,92 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ и при стандартных условиях (25 °С) $1,52 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ [1]. В опытах под воздействием СВЧ-поля малой интенсивности наблюдается эффект уменьшения порога когезии для взвеси стафилококков золотистых в физиологическом растворе при $T=25 \text{ °С}$. Расчеты показывают, что энергия присоединения равняется $6 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$ или $0,4 \text{ эВ}$ [2]. Возможно, эти эффекты вызваны температурным воздействием. Для моде-

лирования тепловых эффектов, вызванных поглощением СВЧ излучения, и проверки этого предположения воспользуемся теорией быстрой коагуляции Смолуховского.

Эффекты коагуляции частиц в крови человека достаточно хорошо известны. Примерами являются: образование холестериновых бляшек на внутренних поверхностях кровеносных сосудов или отложение солей в суставах, которое происходит при нарушениях солевого баланса плазмы крови. Сходный механизм приводит и к агглютинации эритроцитов при свертывании крови.

Данная теория применима при учете следующих положений:

1. Частицы монодисперсны и имеют сферическую форму.
2. Частицы дисперсной фазы имеют коллоидные размеры и перемещаются за счет броуновского движения.
3. Силы взаимодействия между частицами не учитываются.
4. Все столкновения частиц являются эффективными, т.е. каждое столкновение приводит к слипанию.
5. Учитывается взаимодействие только двух частиц, одновременное взаимодействие трех и более частиц считается маловероятным, т.е. кинетика коагуляции подобна кинетике химической реакции второго порядка.
6. Столкновение и слипание частиц происходит при их сближении на расстояние $R = 2r$. [3]

Что соответствует исследуемой среде. Запишем соотношение Эйнштейна-Смолуховского:

$$D = \mu_p kT, \quad (1)$$

где μ_p – величина подвижности, определяемая как:

$$\mu_p = \frac{V}{F}, \quad (2)$$

где V – стационарная скорость перемещения частицы в вязкой среде под действием силы F . Предполагая, что числа Рейнольдса малы, то для силы сопротивления, испытываемой макроскопическим шариком, можно использовать формулу Стокса:

$$F = 6\pi\eta rV, \quad (3)$$

где r – радиус частицы. Тогда подставляя (3) последовательно в (2) и (1) получим:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r}. \quad (4)$$

Назовем число частиц в кластере порядком и будем считать, что при коагуляции последовательно будут сформированы кластеры второго n_2 , третьего n_3 , четвертого n_4 , пятого n_5 и т.д. порядков. В любой момент времени после начала коагуляции в дисперсной системе будет присутствовать набор кластеров частиц, так что частичная концентрация будет опреде-

ляться суммой числа всех кластеров. Выражая скорость коагуляции через уменьшение числа частиц в единице объема за единицу времени и учитывая, что общее число частиц может только уменьшаться, получим:

$$v = aC^2, \quad (5)$$

где a – постоянная скорости коагуляции.

Из [5] известно значение для времени половинной коагуляции, то есть такого времени, за которое начальное число частиц уменьшится вдвое:

$$\theta = \frac{3\eta}{8TkC_0}, \quad (6)$$

где η – вязкость среды (для физиологического раствора известно значение – 1050 Па*с[4]), T – температура, k – постоянная Больцмана, а C_0 – начальная концентрация частиц в среде. Известно, что концентрация элементов, состоящих из i исходных частиц, зависит от времени, прошедшего с начала процесса, как:

$$C_i = \frac{C_0 \left(\frac{t}{\theta}\right)^{i-1}}{\left(1 + \frac{t}{\theta}\right)^{i+1}}. \quad (7)$$

Расчеты показали, что для физиологического раствора $\theta = \frac{9,73 \cdot 10^{22}}{C_0}$ с.

Приведем уравнение:

$$C_i = \frac{C_0 \left(\frac{t}{\theta}\right)^{i-1}}{\left(1 + \frac{t}{\theta}\right)^{i+1}}, \quad (8)$$

к безразмерному виду, разделив обе части на C_0 и исследуем получившуюся функцию $\frac{C_i}{C_0}(t)$, и подставим в нее выражение для времени половинной коагуляции:

$$\theta = \frac{3\eta}{8TkC_0}, \quad (9)$$

проведя замену $x = \frac{3\eta}{8kT}$, тогда получим $\frac{C_i}{C_0}(t) = \frac{t^{i-1} x^2 C_0^{i-1}}{(x+tC_0)^{i+1}}$. Рассчитаем предел от этой функции: $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_i}{C_0}(t) = 0$. Исследуем эту функцию на возрастание/убывание на положительном участке (т.к. время отрицательным быть не может). Для этого найдем значение первой производной, получим:

$$\frac{C_i}{C_0}(t) dt = \frac{x^2 C_0^{i-1} t^{i-2} (xi - x - 2tC_0)}{(x+tC_0)^{i+2}}, \quad (10)$$

тогда очевидно, что только последний член числителя влияет на ее знак, на этом участке, тогда очевидно, что на этом участке функция имеет один экстремум (максимального значения), при:

$$t = \frac{x}{2C_0} (i - 1) = \theta \frac{i-1}{2} \quad (11)$$

Тогда, имеем функцию, монотонно возрастающую от 0 до своего максимального значения, а затем монотонно убывающую и асимптотически стремящуюся к нулю. Рассчитаем максимальное значение этой функции:

$$\frac{c_i}{c_{0max}} = \frac{4(i-1)^{i-1}}{(i+1)^{i+1}}. \quad (12)$$

Очевидно, что это число меньше $1/i$ при любом значении $i > 1$. Следовательно, с течением времени можно говорить о нарастании многообразия размерностей кластеров, которые существуют в среде и об уменьшении числа кластеров малых размерностей, образованных в начальные моменты времени.

Температурной границей коагуляции назовем ту границу, когда определенная часть частиц находится в кластерном состоянии. Тогда для требуемого размера кластера, исходя из (6), эта граница зависит исключительно от времени половинной коагуляции, то есть от температуры среды. Тогда ее значение выражается как:

$$T = \frac{3\eta(i-1)}{16tkC_0}, \quad (13)$$

где t – время, за которое требуется достичь данного состояния.

Рассматривая средний размер биологического объекта (стафилококка золотистого) (0,9 мкм) и границы применимости теории быстрой коагуляции Смолуховского, получим, что уже после объединения двух бактерий полученный кластер не будет являться частицей коллоидного размера. Таким образом, дальнейшие процессы объединения следует рассматривать с применением других моделей, а граничная температура, тогда, может быть получена путем подстановки $i=2$ в выражение (13). Тогда ее значение:

$$T = \frac{3\eta}{16tkC_0}. \quad (14)$$

В рамках данной работы исследовано влияние параметров коллоидной среды на температурную границу коагуляции. Результаты данных исследований потенциально могут найти применение в медицинской сфере, пищевой и других сферах промышленности, в частности водоподготовки. Дальнейшие исследования также могут быть направлены на оценку влияния электролита NaCl на скорость коагуляции и температурную границу.

Библиографический список

1. Баринов, А.Е. О воздействии СВЧ излучения малой мощности на физиологический раствор / А.Е. Баринов, Н.В. Вдовина, И.И. Прокопов // Материалы XII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Нижний Новгород – Самара, 2014. – С. 217–219.
2. Даровских, С.Н. Уменьшение порога когезии в СВЧ-поле для взвеси бактерий в физиологическом растворе на примере стафилококков / С.Н. Даровских, В.И. Тамбовцев, Ю.С. Шишкова // Материалы XII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»: Нижний Новгород – Самара, 2014.

3. Волков, В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы / В.А.Волков. – М.: МГТУ.

4. Влияния вязкости плазмы и гематокрита на деформацию эритроцитов / А.В. Муравьев, Н.В. Кислов, И.А. Тихомирова и др. // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17. – № 2 (60).

5. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии. Учеб. для вузов / Д.А. Фридрихсберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.