

УДК 612.118.221:616-006.04:546-022.53

А.Н. Романов<sup>1</sup>, А.О. Ковригин<sup>1,2</sup>, А.Ф. Лазарев<sup>2</sup>, В.А. Лубенников<sup>2</sup>, Д.А. Романов<sup>1</sup>**ГИСТЕРЕЗИС ЗАВИСИМОСТЕЙ****ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРОВИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул<sup>2</sup>Алтайский филиал ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» МЗ РФ, Барнаул**Контактная информация**

Романов Андрей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории атмосферно-гидросферных процессов ИВЭП СО РАН

адрес: 656038 Барнаул, ул. Молодежная, 1; тел. +7(3852)666462

e-mail: [ran@iwep.ru](mailto:ran@iwep.ru)

Статья поступила 16.02.2015, принята к печати 10.06.2015.

**Резюме**

В работе представлены результаты исследований диэлектрических характеристик крови, 20 %-ного р-ра человеческого альбумина, 40 %-ного раствора глюкозы и 0,9 %-ного раствора NaCl, проведенных в температурном диапазоне 30–42 °С на частоте 0,6 ГГц. При температуре +37 °С для крови и альбумина выявлено скачкообразное возрастание показателя поглощения. Обнаружен гистерезис температурных зависимостей показателей поглощения крови и раствора альбумина в циклах нагревания–остывания. Добавление в р-р альбумина наночастиц углерода и оксида железа ведет к изменению температурных зависимостей по сравнению с р-ром альбумина, не содержащего наночастиц.

**Ключевые слова:** диэлектрические характеристики крови, альбумин, злокачественные новообразования, наночастицы углерода и оксида железа.

A.N. Romanov<sup>1</sup>, A.O. Kovrigin<sup>1,2</sup>, A.F. Lazarev<sup>2</sup>, V.A. Lubennikov<sup>2</sup>, D.A. Romanov<sup>1</sup>**HYSTERESIS****OF BLOOD DIELECTRIC CHARACTERISTICS – TEMPERATURE RELATIONSHIP**<sup>1</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul<sup>2</sup>FSBI «N.N. Blokhin Russian Cancer Research Center», Altai Branch, Barnaul**Abstract**

The paper presents the results of the study of dielectric blood characteristics – 20% solution of human albumin, 40% solution of glucose and 0,9% solution of NaCl, at the temperature ranging from 30 to 42 °C and the frequency of 0,6 GHz. At 37 °C the blood and albumin showed an abrupt increase in absorption. The hysteresis of temperature - absorption of blood and albumin in the heating-cooling cycles has been revealed. Addition of nanoparticles of iron oxide and carbon to albumin solution leads to the change of temperature dependence as compared to the nanoparticle-free albumin solution.

**Key words:** dielectric characteristics of blood, albumen, malignant neoplasms, nanoparticles of iron oxide and carbon.

**Введение**

В связи с анатомическими особенностями постоянство температуры человеческого тела является величиной условной. В медицине принято измерять её в подмышечной впадине, где нормой является величина 36,6 °С. Кроме того отмечаются циркадные колебания температуры с минимальными показателями в 3–4 ч ночи и максимальными в 4–6 ч дня. Основную роль в поддержании температуры тела играет кровь. Повышение температуры тела человека может быть обусловлено как физиологической реакцией на физическую, психическую нагрузку или изменение температуры, влажности внешней среды обитания, так и патофизиологической реакцией на возникшее заболевание.

В обоих вариантах повышение температуры тела является защитно-приспособительной реакцией, которая сопровождается изменением структуры белков плазмы крови вплоть до их денатурации. При повышении температуры возрастает скорость химических реакций и процессов как в организме в целом, так и непосредственно в крови. В результате этого обеспечивается возможность ликвидации очага воспаления.

Следует отметить, что при диагностике злокачественных новообразований субфебрильная температура зачастую может быть единственным признаком, который беспокоит больного. Данный симптом может предшествовать основным проявлениям онкологического заболевания за 4–6 мес до манифестации.

Такое проявление характерно для лимфом, миелолейкозов, лимфолейкозов.

Исследование влияния температуры на диэлектрические свойства крови и составляющих ее белковых компонентов является актуальным, т.к. позволяет разработать новые методы изучения процессов, происходящих с кровью при повышении температуры.

Диэлектрические свойства крови изучают более 50 лет. Исследовались диэлектрические свойства плазмы и сыворотки крови, биологических клеток, протеинов, ДНК, лизосом, различных фаз воды, присутствующей в клеточной мембране [11]. Измерены диэлектрические свойства эритроцитов и цитоплазмы в диапазоне частот 10 кГц–250 МГц при температуре 10–35 °С [17]. Установлено влияние температуры и гематокрита на диэлектрические свойства крови человека в частотном диапазоне 1 Гц–40 ГГц [18]. Разработаны СВЧ-томографические методы определения глубинной температуры, основанные на увеличении интенсивности микроволнового излучения тела, характеризующейся более высокой температурой, что может быть вызвано образованием опухоли [3]. При температуре 25–38 °С в радиодиапазоне обнаружены гистерезисные зависимости модуля диэлектрической проницаемости от температуры, присущие тканям живого организма [13]. Для изучения структуры и фазового состава крови используют дециметровый диапазон, в котором наиболее ярко проявляется влияние белков, аминокислот, растворенных веществ, а также наблюдаются заметные различия в диэлектрических свойствах свободной и связанной воды [5].

Исследовано влияние температуры и концентрации клеток крови на комплексную диэлектрическую проницаемость крови человека в диапазоне частот 30 Гц–30 МГц. Показано, что диэлектрические параметры крови зависят от степени агрегации клеток. Зависимость статической диэлектрической проницаемости крови от температуры имеет максимум при +37 °С [16]. Установлено, что диэлектрические свойства крови здорового человека и крови диабетиков с разным содержанием глюкозы различаются. Влияние глюкозы на диэлектрические свойства крови проявляется в изменении времени диэлектрической релаксации. Это может быть использовано в качестве диагностического признака диабета [14].

Для описания диэлектрических свойств крови, эритроцитов, биологических жидкостей используются модели Максвелла-Вагнера-Ханаи, Лоэнга [15]. В белковых структурах присутствуют водные фракции, различающиеся по диэлектрическим свойствам: прочно связанная вода, первый и второй гидратные слои воды, имеющие разное время релаксации, объемная вода [4]. С ростом температуры уменьшается количество связанной воды, изменяется способность белка сорбировать воду. В результате этого затрудняется перестройка структуры в процессе сорбции воды и возникает гистерезис [12].

При исследовании диэлектрических параметров концентрированных водных р-ров белков и

лизосом в диапазоне частот 1 МГц–40 ГГц при температурах 275–330 °К обнаружено 3 области дисперсии. Они могут быть связаны с вращением полярных молекул белка в их водной среде, реориентационным движением свободных молекул воды и движением молекул связанной воды в гидратных оболочках [19].

Исследование диэлектрических свойств биологических жидкостей человека (кровь, слюна, пот, моча) и находящихся в них металлических наночастиц показало, что диэлектрические свойства биологических жидкостей различаются.

При этом различие зависит как от видов биологической жидкости, так и от типа и концентрации наночастиц [7; 8]. Результаты проведенных исследований указывают на возможность разработки радиофизических методов обнаружения наночастиц в организме человека.

В настоящей работе исследовали в температурном диапазоне 30–42 °С на частоте 0,6 ГГц диэлектрические характеристики крови, р-ра альбумина человека, р-ра глюкозы и р-ра NaCl.

### Материалы и методы

Основными характеристиками, описывающими диэлектрические свойства материальных сред, являются комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП), которая может быть выражена через действительную ( $\epsilon'$ ) и мнимую ( $\epsilon''$ ) части [3]:

$$\epsilon = \epsilon' + i \cdot \epsilon''$$

и комплексный показатель преломления (КПП), связанный с КДП следующим выражением:

$$N = \sqrt{\epsilon} = n + i \cdot \kappa, \text{ где}$$

$n$ ,  $\kappa$  – показатели преломления и поглощения.

Используя эти формулы можно установить связь между действительными и мнимыми частями КДП и КПП:

$$\begin{cases} \epsilon' = n^2 - \kappa^2, \\ \epsilon'' = 2n\kappa. \end{cases}$$

Приведенные параметры являются основными диэлектрическими характеристиками биологических жидкостей.

Диэлектрические характеристики биологических жидкостей исследовали на лабораторной установке, изготовленной с использованием прибора ФК2-18 («Измеритель разности фаз») и позволяющей определять диэлектрические параметры жидкостей в диапазоне частот 0,3–12 ГГц. Технические характеристики: диапазон однозначных измерений фазы  $180 \pm 1$  град.; диапазон измерения

затуханий –  $0 \div 60 \pm 0,5$  дБ. Блок-схема установки изображена на рис. 1. В состав входят следующие элементы: Г – генератор сигналов высокочастотный Г4-76А; ДМ – делитель мощности согласованный; ЛПД – линия переменной длины; А1, А2, А3 – attenuаторы согласующие коаксиальные; И – измерительный блок фазометра; К – измерительный контейнер для образца, выполненный в виде отрезка коаксиальной линии. Это в подпись к рисунку

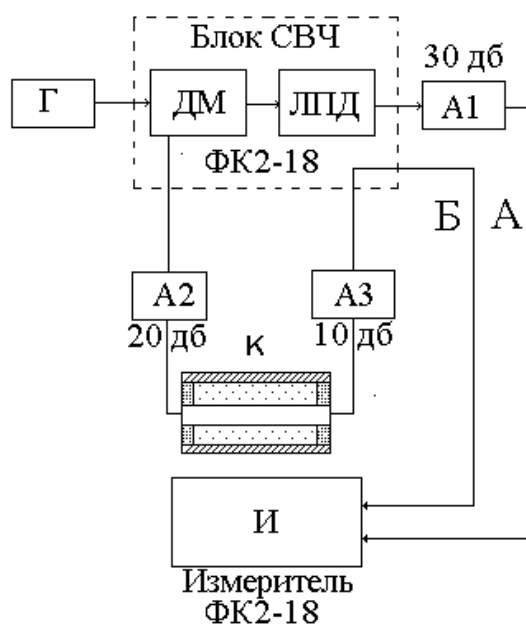


Рис. 1. Схема установки мостового типа на основе измерителя фаз.

Процесс измерений: с помощью ДМ производили балансировку мостовой схемы, в плечо которой устанавливали пустой измерительный контейнер, сигнал от генератора подавали на ДМ и делили поровну между опорным (А) и измерительным (Б) каналами. В начале измерений, при отсутствии в контейнере исследуемого образца, устанавливали нулевое значение разности фаз и амплитуд на ФК2-18, затем в контейнер помещали образец и по индикатору отсчитывали значения разности фаз и затухание.

Для эксперимента использовали образцы цитратной крови, 20 %-ного р-ра альбумина, 40 %-ного р-ра глюкозы, 0,9 %-ного р-ра NaCl. Измерения проводились в температурном интервале  $28 \div 42$  °С на частоте 0,6 ГГц. Для оценки влияния наночастиц на температурные зависимости диэлектрических свойств альбумина использовались наночастицы оксида железа ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и углерода (нанодиаз). Магнитный наноразмерный порошок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  был получен методом механохимического синтеза из солевых систем (материал изготовлен в Отделе структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН [2; 6; 9]). Исследованные образцы представляли собой наноразмерные сферические частицы  $\phi$  3–15 нм, объединенные в сла-

босвязанные агрегаты. Доля наночастиц, меньших 10 нм, составляла 65 %, площадь удельной поверхности  $\sim 150 \text{ м}^2/\text{г}$  [2].

Для исследования углеродных наночастиц использовалась алмазная шихта детонационного синтеза, изготовленная в ФГУП ФНПЦ «Алтай» [6; 10] (промышленная марка УДА, средний размер наночастиц – 3–5 нм, площадь удельной поверхности  $\sim 400 \text{ м}^2/\text{г}$ ).

В р-р альбумина объемом 3–4 мл добавлялись наночастицы до их выпадения в осадок. Затем раствор тщательно перемешивали и отстаивали течение суток при температуре +5 °С. Для эксперимента отбирали требуемое количество образца с оставшейся в нем взвесью наночастиц. Наночастицы, выпавшие в осадок, удалялись из р-ра и в дальнейшем не использовались. Для измерений отбирались образцы объемом 1–2 мл. Массовая доля жидкой компоненты составляла  $81 \pm 1\%$ , массовая доля сухого остатка –  $19 \pm 0,5\%$ . Массовая доля наночастиц в альбумине не превышала 0,3 %. Плотности исследованных образцов составляли для чистого альбумина и альбумина с добавками оксида железа и нанодиазов  $1,16 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $1,21 \text{ г}/\text{см}^3$  и  $1,13 \text{ г}/\text{см}^3$  соответственно. Незначительное отличие плотностей чистого альбумина и альбумина, содержащего тяжелые металлические и легкие углеродные наночастицы, объясняется тем, что часть белкового раствора заменяли тяжелыми или легкими (по сравнению с чистым альбумином) наночастицами.

Для оценки случайной погрешности проводились 20-кратные измерения диэлектрических параметров крови и альбумина. Суммарная погрешность определялась как сумма случайной погрешности, рассчитанной по известным методикам (см., например [1]), и стандартной погрешности, указанной в паспорте прибора.

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены измеренные при разных температурах (t) значения показателей поглощения ( $\kappa$ ) крови с суммарными погрешностями. На этом же рисунке приведены построенные методом наименьших квадратов (с использованием программы Origin.6.1) эмпирические зависимости  $\kappa(t)$  крови на частоте 0,6 ГГц при нагревании (1/1, 1/2, 1/3) и последующем остывании (2). Видно, что зависимости  $\kappa(t)$  заметно различаются, образуя гистерезис. В цикле «нагревание» поведение величин  $\kappa$  в разных температурных интервалах различно. Зависимость  $\kappa(t)$  была аппроксимирована тремя прямыми линиями (1/1, 1/2, 1/3), имеющими вид:

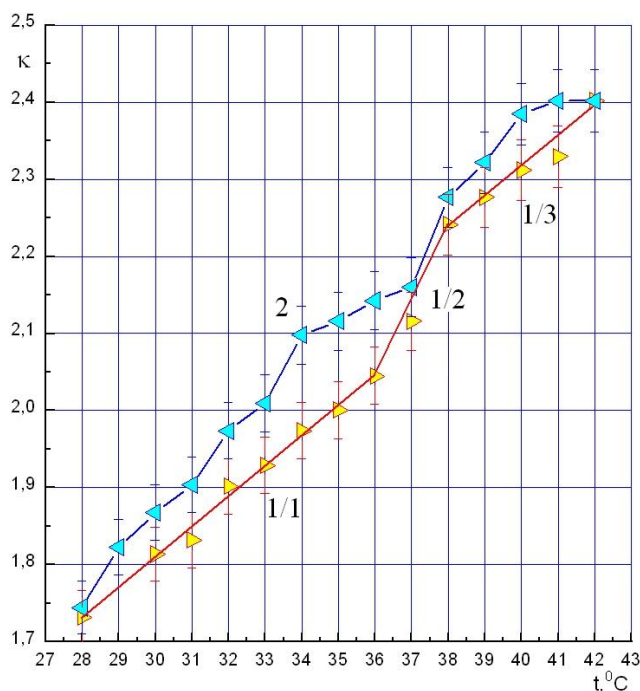
$$1/1: t = 28 \dots 36^\circ\text{C}: \kappa = (0,9 \pm 0,045) + (0,039 \pm 0,0014)t, \sigma = 0,0098, \quad (1)$$

$$1/2: t = 36 \dots 38^\circ\text{C}: \kappa = -(1,5 \pm 0,58) + (0,10 \pm 0,0016)t, \sigma = 0,022, \quad (2)$$

$$1/3: t = 38 \dots 42^\circ\text{C}: \kappa = (0,7 \pm 0,3) + (0,039 \pm 0,008)t, \sigma = 0,017, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическая погрешность.

Как видно из рис. 2, после прекращения нагревания и начала остывания значения  $\kappa$  не изменяются при понижении температуры на два градуса. Видимо, это связано с инерционностью системы, не успевающей вернуться в исходное состояние.



**Рис. 2.** Зависимости  $\kappa$  крови на частоте 0,6 ГГц от температуры в циклах нагревание (1) и остывания (2): линии 1/1 – 1/3 построены по формулам (1) – (3).

В результате этого возникает гистерезис. При дальнейшем понижении температуры также наблюдается различие в значениях  $\kappa$  при одинаковой температуре в циклах «нагревание/остывание». Это может быть связано с различиями пространственных структур белковых элементов.

Таким образом, можно говорить о двух петлях гистерезиса, возникающих в результате разных физических механизмов.

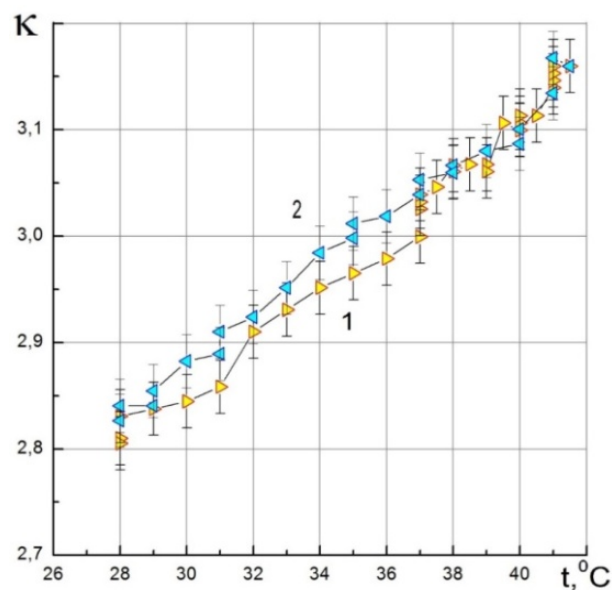
Появление гистерезиса может быть связано с изменением структуры крови и составляющих ее белков. На зависимостях  $n(t)$  и  $\kappa(t)$  р-ров NaCl и глюкозы гистерезис не образуется. Зависимости, построенные методом наименьших квадратов, имеют вид:

$$n = (A_0 \pm \Delta A_0) + (A_1 \pm \Delta A_1), \quad (4)$$

$$\kappa = (B_0 \pm \Delta B_0) + (B_1 \pm \Delta B_1), \quad (5)$$

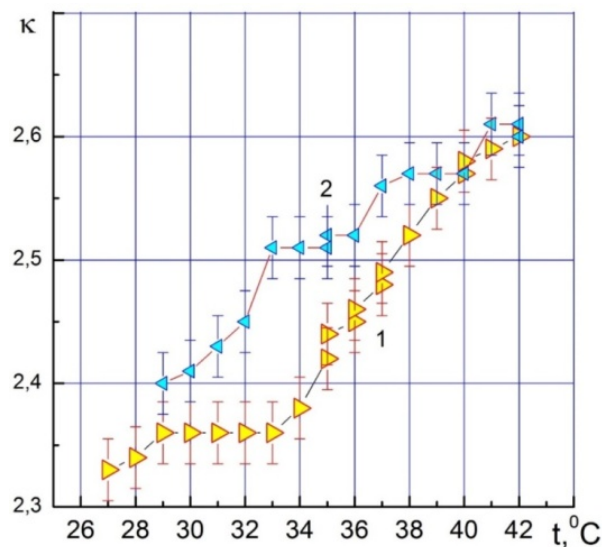
где  $A_0$ ,  $\Delta A_0$ ,  $A_1$ ,  $\Delta A_1$ ,  $B_0$ ,  $\Delta B_0$ ,  $B_1$ ,  $\Delta B_1$  – численные коэффициенты и их погрешности, значения которых приведены в табл.

На рис. 3 приведена зависимость  $\kappa(t)$  р-ра альбумина от температуры, измеренная на частоте 0,6 ГГц. Видно, что зависимости  $\kappa(t)$  в циклах нагревания-остывания образуют гистерезис. В цикле нагревания виден скачок  $\kappa$  при температуре 37 °C, который может быть связан с изменениями, происходящими в структуре молекул альбумина при данной температуре. Соответственно, гистерезис, возникающий при нагревании-остывании может быть обусловлен тем, что нагретый до 42 °C альбумин при охлаждении образует другую структуру, отличную от той, которую он имел до нагревания.



**Рис. 3.** Зависимости  $\kappa$  р-ра альбумина от температуры на частоте 0,6 ГГц

Известно что структура альбумина зависит не только от температуры, но и от различных веществ с которыми взаимодействуют его молекулы. При этом в разных температурных интервалах влияние одних и тех же веществ может быть различным. Для оценки этих изменений исследовалось влияние температуры на диэлектрические характеристики р-ра альбумина, содержащего углеродные и металлические наночастицы. Как видно из рис. 4, добавка наноалмазов существенно образом меняет зависимость  $\kappa(t)$ . На ней прослеживается скачок  $\kappa$  в диапазоне 33–42 °C. Возможно, присутствие наноалмазов, представляющих собой наночастицы, размером 1–10 нм с большой удельной поверхностью способствует изменению фазового состава воды в р-ре альбумина.



**Рис. 4.** Зависимости крахтвора альбумина с добавлением наноалмазов от температуры на частоте 0,6 ГГц.

Таблица

Численные коэффициенты и их погрешности в формулах (4)-(5)

| Вещество        | Цикл       | $A_0 \pm \Delta A_0$ | $A_1 \pm \Delta A_1$   | $\sigma_n^*$ | $B_0 \pm \Delta B_0$ | $B_1 \pm \Delta B_1$   | $\sigma_k^*$ |
|-----------------|------------|----------------------|------------------------|--------------|----------------------|------------------------|--------------|
| 0,9% p-p NaCl   | Нагревание | $9,7 \pm 0,1$        | $-(0,006 \pm 0,003)$   | 0,033        | $1,68 \pm 0,05$      | $0,049 \pm 0,001$      | 0,017        |
|                 | Остывание  | $9,62 \pm 0,07$      | $-(0,003 \pm 0,002)$   | 0,027        | $0,4 \pm 0,11$       | $0,078 \pm 0,003$      | 0,04         |
| 40% p-p глюкозы | Нагревание | $7,77 \pm 0,03$      | $-(0,009 \pm 0,001)$   | 0,012        | $0,63 \pm 0,01$      | $-(0,004 \pm 0,0003)$  | 0,005        |
|                 | Остывание  | $7,54 \pm 0,03$      | $-(0,0047 \pm 0,0001)$ | 0,012        | $0,55 \pm 0,018$     | $-(0,0025 \pm 0,0001)$ | 0,019        |

\* $\sigma_n$ ,  $\sigma_k$  – среднеквадратические отклонения n и k

Также обращает на себя внимание нелинейная зависимость  $\kappa(t)$  (рис. 5) в цикле остывания. Видно, что скачкообразное уменьшение значений  $\kappa$  чередуется с плавными изменениями при уменьшении температуры. Причины подобных изменений могут быть связаны с изменениями структуры, происходящими в разных температурных интервалах.

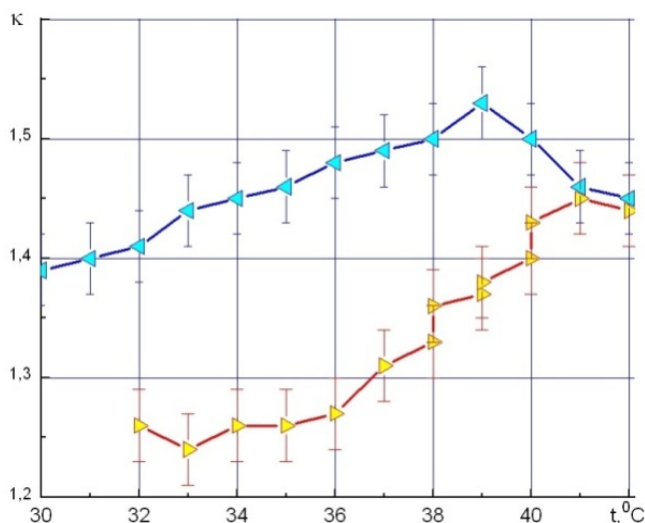


Рис. 5. Зависимости  $\kappa$  раствора альбумина с добавлением  $Fe_3O_4$  от температуры на частоте 0,6 ГГц.

На рис. 4 приведена зависимость  $\kappa(t)$  p-ра альбумина с добавкой наночастиц  $Fe_3O_4$ , измеренная на частоте 0,6 ГГц. Добавка  $Fe_3O_4$  как и наноалмазов существенным образом изменяет зависимость  $\kappa(t)$ . На ней прослеживается резкое возрастание  $\kappa(t)$  в диапазоне 36–40 °C. При этом наблюдаются отдельные скачки  $\kappa$  при температурах 38 и 40 °C. Причиной этих скачков может быть изменение структуры альбумина при взаимодействии с металлическими наночастицами, хорошо проводящими тепло.

При остывании наблюдается возрастание величины  $\kappa$ . Причиной этого может быть образование в альбумине компоненты с более

высокими значениями  $\kappa$ , либо изменение фазового состава воды в результате нагрева до температуры, близкой к температуре денатурации белка и появления свободной воды, возможно, выделившейся при денатурации белка.

Из графиков зависимостей  $\kappa(t)$  на рис. 4 видно, что наблюдаемые отличия значительны, и система не возвращается в первоначальное состояние. Одной из причин такого поведения может быть локальный перегрев белковых структур при контакте с металлическими наночастицами, ведущий к денатурации белка. В результате связанная с белком вода становится свободной. Данный вопрос является важным, так как в последние годы одной из актуальных тем является использование магнитных частиц для доставки лекарств к злокачественным опухолям и уничтожения их путем воздействия магнитным полем на металлические наночастицы [6].

### Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Обнаружена петля гистерезиса на зависимостях показателей поглощения крови от температуры в циклах нагревания–остывания.
2. Обнаружен скачок показателя поглощения  $\kappa$  при температуре +37 °C для крови и альбумина. Сделан вывод, что реакция воспаления отражается на белковой фракции.
3. Добавление в p-р альбумина наночастиц углерода и оксида железа способствует существенному изменению вида зависимости  $\kappa(t)$  по сравнению с p-ром альбумина, не содержащего наночастиц. При этом интервал скачкообразных изменений величины  $\kappa$  для растворов с добавками наночастиц оказывается различным.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях влияния температуры на диэлектрические свойства крови, белков и других биологических жидкостей.

### Литература

1. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М., Атомиздат, 1978. – 232 с.
2. Найденов Е.П., Журавлев В.А., Итин В.И. и др. Магнитные свойства и параметры структуры наноразмерных порошков оксидных ферритов, полученных методом механохимического синтеза из солевых систем // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 5. – С. 857–63.

3. Поляков В.М., Шмаленюк А.С. СВЧ-термография и перспективы ее развития. Применение в медицине и народном хозяйстве / Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып. 8 (1640). – М.: Изд-во ЦНИИ Электроника, 1991. – 58 с.
4. Применение КВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине (сб. тезисов докладов VII Всесоюзного семинара). – М.: ИРЭ АН СССР, 1989.
5. Романов А.Н., Винокурова Е.Ю., Ковригин А.О. и др. Диэлектрические характеристики биологических жидкостей человека при развитии онкологических заболеваний. – Барнаул, 2008. – 72 с.
6. Романов А.Н., Романова Н.А., Яворовский Н.А. и др. Сравнительный анализ диэлектрических свойств наноразмерных порошков алюминия, железа и углерода в микроволновом диапазоне // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 6/2. – С. 225–31.
7. Романов А.Н., Романов Д.А. Диэлектрические свойства биологических жидкостей человека, содержащих наночастицы // Сборник трудов VI Троицкой конференции «Медицинская физика и инновации в медицине». – 2014. – С. 261–3.
8. Романов Д.А. Оценка влияния наночастиц на диэлектрические свойства биологических жидкостей человека // Естественные научные основы теории и методов защиты окружающей среды: тезисы докладов III Всероссийской молодежной научной конференции, 23–24 апреля 2014 г. – СПб.: СПбГУКиТ, 2014. – С. 30–1.
9. Романова Н.А., Магаева А.А., Романов А.Н. и др. Диэлектрические свойства наноразмерного порошка  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в микроволновом диапазоне (тезисы) // Труды научно-технической конференции с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение». V Ставеровские чтения. Красноярск. – 2009. – С. 104–5.
10. Романова Н.А., Романов А.Н., Ларионова И.С., Ладыгин Ю.И. Диэлектрические свойства водных растворов ультрадисперсных алмазов в микроволновом диапазоне // Труды научно-технической конференции с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение». V Ставеровские чтения. Красноярск. – 2009. – С. 24–6.
11. Седунов Б.И., Франк-Каменецкий Д.А. Диэлектрическая проницаемость биологических объектов // Успехи физических наук. – 1963. – LXXIX, Вып. 4. – С. 617–39.
12. Файзуллин Д.А., Сироткин В.А., Соломонов Б.Н., Федотов В.Д. Межмолекулярные взаимодействия и вторичная структура сывороточного альбумина человека в системе белок-вода-ацетонитрил по данным ИК-спектроскопии // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. – 1999. – № 2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://chem.kstu.ru/butlerov\\_comm/vol1/cd-a1/data/JCHEM&CS/RUSSIAN/n2/appl2/c-mcs44/c-mcs44.htm](http://chem.kstu.ru/butlerov_comm/vol1/cd-a1/data/JCHEM&CS/RUSSIAN/n2/appl2/c-mcs44/c-mcs44.htm). (дата обращения 12.01.2015).
13. Шестунеров В.А., Колмаков Д.Н. О нелинейности температурной зависимости диэлектрической проницаемости живых тканей на сверхвысоких частотах // Биофизика. – 1990. – Т. 35, Вып. 5. – С. 846–9.
14. Abdalla S. Gaussian distribution of relaxation through human blood // Physica B: Condensed Matter. – 2011. – 406(3). – P. 584–7.
15. Bordi F., Cametti C., Gili T. Dielectric spectroscopy of erythrocyte cell suspensions. A comparison between Looyenga and Maxwell–Wagner–Hanai effective medium theory formulations // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2002. – 305(1–3). – P. 278–84.
16. Chelidze T. Dielectric spectroscopy of blood // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2002. – 305(1–3). – P. 285–94.
17. Sudsiri J., Wachner D., Gimsa J. On the temperature dependence of the dielectric membrane properties of human red blood cells // Bioelectrochemistry. – 2007. – 70(1). – P. 134–40.
18. Wolf M., Gulich R., Lunkenheimer P., Loidl A. Broadband dielectric spectroscopy on human blood // Biochimica et Biophysica Acta (BBA). – 2011. – 1810(8). – P. 727–40.
19. Wolf M., Gulich R., Lunkenheimer P., Loidl A. Relaxation dynamics of a protein solution investigated by dielectric spectroscopy // Biochimica et Biophysica Acta (BBA). – 2012. – 1824(5). – P. 723–30.