

Исследование термоэлектрического эффекта в крови животных

© А.А. Зайцев,¹ В.М. Грабов,² А.В. Сидоров,¹ Д.В. Кузнецов¹

¹ Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина,
399770 Елец, Липецкая обл., Россия

² Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
191186 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: zaitsev@elsu.ru

Поступило в Редакцию 30 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2021 г.

Принято к публикации 1 марта 2022 г.

Приведены результаты экспериментальных измерений термоэлектродвижущей силы и коэффициента электропроводности образцов крови животных и медицинского раствора Рингера, близких по своим свойствам и химическому составу к человеческой крови. Проанализировано влияние вкладов ионной составляющей и вклада форменных элементов крови на величину коэффициента термоэлектродвижущей силы. Изучено влияние на термоэлектрические свойства и электропроводность крови разбавления дистиллированной водой. Проанализировано влияние ионного состава модельного медицинского раствора Рингера на коэффициент термоэлектродвижущей силы. Результаты экспериментов показали, что коэффициент термоэлектродвижущей силы исследуемых образцов крови определяется в большей степени коллоидной компонентой форменных элементов, нежели вкладом ионной подсистемы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что термоэлектрические явления в биологических жидкостях могут оказывать влияние на активацию биохимических процессов в организме животных.

Ключевые слова: термоЭДС, электропроводность, коллоидные растворы, плазма крови.

DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52664.342-21

Введение

Изучению принципов возникновения термочувствительности живых организмов, механизмов терморегуляции теплокровных животных, в том числе человека посвящен целый ряд работ [1,2]. Исследование влияния биопотенциалов на протекание процессов жизнедеятельности представляет значительный интерес, как с точки зрения практической медицины, так и с позиций фундаментальной биофизики [3]. Известны работы, в которых исследуются биологические жидкости, прежде всего кровь животных [4], на предмет химического состава, его связи с процессами нормального жизнеобеспечения, обсуждаются физические методы, в первую очередь, химические и оптические, диагностики по параметрам крови [5,6].

Авторами ранее [7] была выдвинута гипотеза о влиянии термоэлектрических процессов, происходящих в биологических жидкостях, на процессы терморегуляции. Гипотеза была выдвинута на основе исследования термоэлектрических свойств растворов, модельных человеческой крови.

В качестве растворов модельных человеческой крови выступали: раствор Рингера [8], моделирующий ионный состав плазмы человеческой крови, раствор сывороточного альбумина в дистиллированной воде, моделирующий коллоидную подсистему крови, и их смеси. Как следует из результатов экспериментов, термоэлектрическая ЭДС растворов Рингера и его смесей с сывороточным альбумином обладает необычными термоэлектрически-

ми свойствами. В области температур до 33°C коэффициент термоЭДС растворов равен нулю, а выше данной температуры $\alpha = -16 \pm 6 \mu\text{V/K}$.

В то же время в экспериментах, проведенных в работе [8], не учитывалась важнейшая подсистема крови живых организмов — подсистема форменных элементов, которая придает ей свойства суспензии и составляет 40–50% от массы крови у человека и 30–45% у животных [9,10]. Причем из оставшихся 50–60%, приходящихся на плазму крови, 90% принадлежит воде. Поэтому в количественном соотношении именно форменные элементы имеют подавляющий вклад в составе крови живых организмов. В работе [11] было показано, что если в смесях коллоидных растворов с ионными электролитами одна из подсистем доминирует над другой в количественном соотношении, то именно она будет вносить основной вклад в величину термоэлектрической ЭДС смеси.

В соответствии с вышеизложенным целью настоящей работы является исследование вклада подсистемы форменных элементов в итоговую величину термоэлектрической ЭДС крови живых организмов.

1. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для измерения термоэлектрической ЭДС в образцах крови животных использовалась экспериментальная установка на основе U-образной трубки, описанная в [8].

2. Исследование термоэлектрических свойств крови животных

В представленной работе впервые проведены измерения термоэлектрического эффекта на образцах крови животных (свиней, нутрий). Исследовано влияние на величину термоэлектрического коэффициента изменения состава крови за счет разбавления дистиллированной водой, раствором Рингера.

В качестве образцов применялась свежая, не более 24 h от момента получения, охлажденная кровь свиней и нутрий. Перед измерением из образцов механической фильтрацией удалялись крупные фракции коагулята.

Кровь теплокровных животных, прежде всего свиней, близка по своему составу к крови человека. Ионный состав плазмы крови в основном определяют катионы натрия, калия и кальция, а также анионы хлора. Содержание их в плазме человеческой крови составляет: 135–155 mmol/l (Na^+), 3.6–5.0 mmol/l (K^+), 2.25–2.75 mmol/l (Ca^{2+}), 97–108 mmol/l (Cl^-) [9]. Расхождение с составом плазмы свиной крови незначительно: 180 mmol/l (Na^+), 7 mmol/l (K^+), 3 mmol/l (Ca^{2+}), 100 mmol/l (Cl^-) [10]. В плазме крови взрослых нутрий содержание ионов составляет: 126 mmol/l (Na^+), 7.5 mmol/l (K^+), 115 mmol/l (Cl^-) [12].

В качестве первого объекта исследования, модельного человеческой крови, была выбрана кровь свиней. Измерение термоэлектрических потенциалов проводилось в условиях, когда температура более холодной части оставалась неизменной и составляла 18°C. Противоположная область образцов крови нагревалась до 40°C, что позволяло предотвращать деградацию форменных элементов крови вследствие денатурации белков. Таким образом, данная конфигурация опыта в значительной степени моделирует условия функционирования теплокровных живых организмов.

На рис. 1 приведены зависимости термоэлектрической ЭДС трех образцов свиной крови от разности температур между нагреваемой и холодной областями. Методом линейной аппроксимации получено значение коэффициента термоЭДС $\alpha = -26.6 \pm 4 \mu\text{V/K}$. Указанное значение превышает измеренную ранее величину коэффициента термоЭДС раствора Рингера в 1.5 раза. Кроме того, меняется характер зависимости: если в растворе Рингера коэффициент термоэлектродвижущей силы существенно зависел от температуры, то в образцах крови наблюдается монотонное изменение разности термоэлектрических потенциалов с ростом разности температур.

Полученные данные о характере влияния концентрации плазмы на ее термоэлектрические свойства свидетельствуют о преобладающем вкладе коллоидной компоненты форменных элементов крови.

С целью уменьшения методической погрешности ряд измерений проводился как на участке роста температуры (нагрев трубки), так и на участке уменьшения тем-

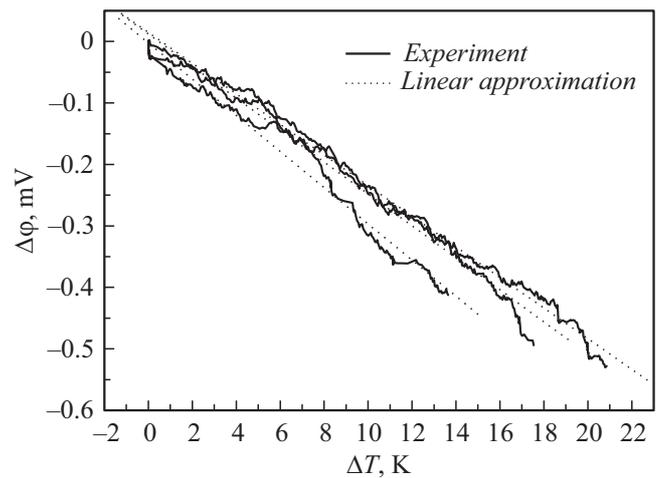


Рис. 1. Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от разности температур для образцов свиной крови. Температура более холодной области равна 18°C.

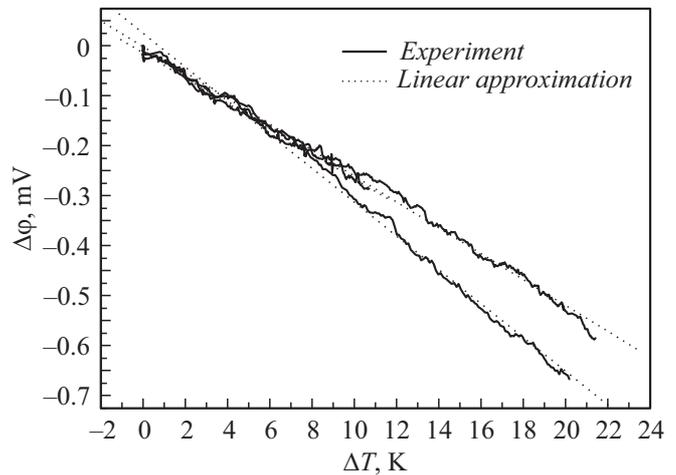


Рис. 2. Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от разности температур для образцов крови нутрий. Температура более холодной области равна 18°C.

пературы (остывание трубки после отключения печи). Различие в измеренных значениях α не превысило 10%.

Аналогичные измерения были проведены на образцах крови нутрий. Экспериментальные результаты представлены в форме зависимостей термоЭДС от разности температур на рис. 2. Значение коэффициента термоЭДС $\alpha = -28 \pm 4 \mu\text{V/K}$.

В работе [13] показано, что коэффициент термоэлектродвижущей силы $\alpha = \Delta\varphi/\Delta T$ до момента времени, когда в растворе еще не сформировались высокие градиенты концентрации, определяется аддитивными вкладами отдельных заряженных частиц, каждый из которых пропорционален произведению подвижностей u_i на их теплоту переноса Q_i :

$$\alpha \propto - \sum_i \frac{u_i Q_i}{T z_i}$$

где z_i — электрический заряд частицы вида i в единицах заряда электрона.

Анализ приведенных выше данных о химическом составе плазмы крови животных показывает, что отношение концентрации ионов калия к концентрации ионов натрия максимально для крови нутрий и составляет порядка 1:17, а для крови свиней не превышает 1:26. С целью определения влияния на величину коэффициента термоЭДС крови ионов калия были проведены измерения на модельной образцах: медицинском растворе Рингера и его модификации с увеличенным содержанием ионов калия.

Медицинский раствор Рингера по своему ионному составу изотоничен плазме крови человека. Изготовленный промышленным образом раствор содержит неорганические соли — 8.60 g/l NaCl, 0.30 g/l KCl и 0.33 g/l CaCl₂ и вспомогательные вещества — гидроксид натрия, соляную кислоту. Таким образом, отношение концентраций ионов калия к концентрации ионов натрия составляет в нем 1:37. Коэффициент термоЭДС раствора Рингера был измерен нами ранее [7], его величина составляет $\alpha = -16 \pm 6 \mu\text{V/K}$. Добавление в раствор хлорида калия в концентрации 0.1 g/l уменьшало значение α до $10 \mu\text{V/K}$, а в концентрации 0.3 g/l практически сводило его к нулю (менее $5 \mu\text{V/K}$).

Таким образом, концентрация ионов калия, оказывающая существенное влияние на протекание биохимических процессов в живых организмах [9], также определенным образом влияет на величину термоэлектрических потенциалов, возникающих в крови под действием градиентов температур.

3. Исследование электропроводности коллоидной подсистемы крови

Коллоидные растворы, такие как кровь животных и человека, достаточно хорошо изучены на предмет химического состава, имеется исчерпывающая информация об электропроводности данных объектов [13]. Методами кондуктометрии получены как абсолютные значения электропроводности, так и оценки вклада отдельных подсистем в процессы переноса электрических зарядов в крови.

Коэффициент электропроводности среды σ определяется аддитивными вкладами всех видов заряженных частиц и зависит от их подвижности u_i [14]

$$\sigma = F \sum_i |z_i| c_i u_i,$$

где F — постоянная Фарадея, z_i — электрический заряд частицы в единицах заряда электрона, c_i — объемная концентрация частиц вида i .

Согласно [9], электропроводность цельной крови на 70% определяется присутствующими в плазме солями (главным образом хлоридом натрия), на 25% белками плазмы и лишь на 5% клетками крови. При

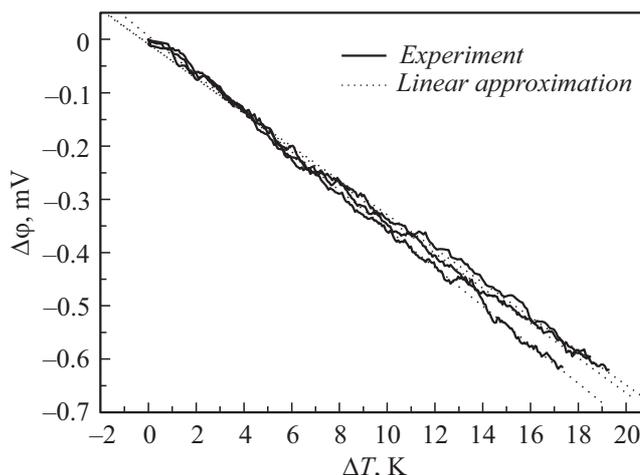


Рис. 3. Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от разности температур для образцов свиной крови, разбавленной дистиллированной водой в отношении 70:40.

этом систематизированные данные о термоэлектрических свойствах крови в литературе отсутствуют.

С целью определения вклада подсистемы форменных элементов в итоговую величину термоэлектрической ЭДС измерения были продолжены на образцах крови модифицированных добавлением дистиллированной воды. Отношения масс компонент цельной крови к дистиллированной воде составляло 70:40 (рис. 3). Данная пропорция применялась как для крови нутрии, так и для крови свиней. Непосредственно перед измерением полученные растворы подвергались перемешиванию для сохранения однородности состава.

Помимо исследования термоэлектрической ЭДС, на указанных образцах разбавленной крови свиней и нутрий были проведены измерения коэффициента электропроводности. Измерения проводились с помощью лабораторного кондуктометра Mettler Toledo S30. При этом фиксировалось значение электропроводности в нагретом и холодном концах U-образной трубки.

Сводные данные о величине электропроводности для различных температур цельной крови свиней и нутрий, а также для их водных растворов приведены в табл. 1.

Как показали измерения, коэффициент электропроводности растворов пропорционально меньше коэффициента электропроводности исходных образцов крови. Это связано с уменьшением концентрации ионов в плазме, дающих, как уже было сказано, основной вклад в механизм переноса электрических зарядов.

Значения электропроводности нагретых участков образцов крови в значительной степени превышают значения для холодных концов трубки. Указанное соотношение выполняется как для исходных образцов крови свиней и нутрий, так и для их водных растворов. При этом электропроводность цельной крови свиней и нутрий возрастает соответственно на 3.0% на 1°C и 2.5% на 1°C, что согласуется с данными по человеческой

Таблица 1. Результаты измерений электропроводности крови свиной и нутрий, а также их водных растворов при температурах 20 и 40 °С

№ п/п	Вещество	$\sigma, \mu\text{S/cm}$		Относительная погрешность, %
		$T = 20^\circ\text{C}$	$T = 40^\circ\text{C}$	
1	Кровь свиная	39.9	64.8	± 5
2	Кровь свиная, разбавленная дистиллированной водой в отношении 70:40	28.7	44.8	± 5
3	Кровь нутрии	41.5	62.8	± 5
4	Кровь нутрии, разбавленная дистиллированной водой в отношении 70:40	31.0	42.7	± 5

Примечание. Разбавление производилось дистиллированной водой в отношении 70:40; доверительная вероятность для всех измерений 0.95.

Таблица 2. Результаты измерений коэффициента термоэлектрической ЭДС крови свиной и нутрий, а также их водных растворов

№ п/п	Вещество	$\alpha, \mu\text{V/K}$	$\pm\Delta\alpha, \mu\text{V/K}$	Относительная погрешность, %
1	Кровь свиная	-26.6	4	± 15
2	Кровь свиная, разбавленная дистиллированной водой в отношении 70:40	-33.7	2	± 6
3	Кровь нутрии	-28.0	4	± 14
4	Кровь нутрии, разбавленная дистиллированной водой в отношении 70:40	-31.2	4	± 13

Примечание. Разбавление производилось дистиллированной водой в отношении 70:40; доверительная вероятность для всех измерений 0.95.

крови: примерно 2.1% на 1°С [9]. Температурный коэффициент проводимости водных растворов крови свиной и нутрий несколько меньше, нежели для цельной крови: соответственно 2.5 и 2% на 1°С. Указанный характер зависимости электропроводности разбавленных электролитов от температуры согласуется с [15].

Сводные значения коэффициента термоЭДС для цельной крови свиной и нутрий, а также для их водных растворов приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что разбавление коллоидного раствора приводит к увеличению коэффициента термоЭДС. Эта зависимость получена как для свиной крови, так и для крови нутрий.

Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования термоэлектрических свойств крови животных (свиной и нутрий) позволяют сделать следующие выводы.

1. Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от температуры в образцах крови животных в отличие от медицинского раствора Рингера имеет монотонный характер, а величина термоэлектрической ЭДС по абсолютному значению в 1.5 раза выше и составляет $\alpha = -26.6 \pm 4 \mu\text{V/K}$ для свиной крови и $\alpha = -28 \pm 4 \mu\text{V/K}$ для крови нутрий.

2. Характер зависимости термоэлектрических разностей потенциалов от температуры определяют, главным образом, форменные элементы крови, и в меньшей степени ионная составляющая плазмы крови.

3. Электропроводность крови животных и ее температурная зависимость практически совпадают с известными данными для человеческой крови и определяются ионной составляющей.

Формируемые в результате термоэлектрических явлений потенциалы, вероятно, могут оказывать влияние на протекание биохимических процессов в организме, в том числе быть одним из физических механизмов обуславливающих терморегуляцию.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Липецкой области в рамках научного проекта 20-42-480001.

Соблюдение этических стандартов

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Настоящая работа не содержит каких-либо исследований с участием в качестве объекта людей.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. McKemy, W. Neuhausser, D. Julius. *Nature*, **416**, 52–58 (2002). DOI: 10.1038/nature719
- [2] C.L. Lim, C. Byrne, J.K. Lee. *Ann. Acad. Med. Singap.*, **37** (4), 347–353 (2008).
- [3] N. Sperelakis. *Electrogenesis of Biopotentials in the Cardiovascular System* (Springer, Boston, MA, 1995), DOI: 10.1007/978-1-4615-2590-5
- [4] J.B. Tasker. In: *Clinical Biochemistry in Domestic Animals*, ed. by J.J. Kaneko (Academic Press, 1980), p. 401–446.
- [5] M. Laposata. *Laposatás Laboratory Medicine Diagnosis of Disease in Clinical Laboratory*, ed. by M. Weitz, Peter J. Boyle (McGraw-Hill Education, 2018)
- [6] I.L. Jernelv, K. Milenko, S.S. Fuglerud, D.R. Hjelme, R. Ellingsen, A. Aksnes. *Appl. Spectrosc. Rev.*, **54** (7), 543–572 (2019). DOI: 10.1080/05704928.2018.1486324
- [7] А.В. Сидоров, В.М. Грабов, А.А. Зайцев, Д.В. Кузнецов. *ЖТФ*, **90** (10), 1650–1655 (2020). DOI: 10.21883/ЖТФ.2020.10.49795.399-19 [A.V. Sidorov, V.M. Grabov, A.A. Zaitsev, D.V. Kuznetsov. *Tech. Phys.*, **65** (10), 1580–1584, (2020). DOI: 10.1134/S1063784220100205]
- [8] В.М. Грабов, А.А. Зайцев, Д.В. Кузнецов, А.В. Сидоров. *ЖТФ*, **88** (10), 1462–1466 (2018). DOI: 10.21883/ЖТФ.2018.10.46486.8-18 [V.M. Grabov, A.A. Zaitsev, D.V. Kuznetsov, A.V. Sidorov. *Tech. Phys.*, **63** (10), 1415–1419 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218100122]
- [9] *Большая медицинская энциклопедия*, гл. ред. Б.В. Петровский (Советская энциклопедия, М., 1980), т. 12: Криохирurgia, с. 93–132.
- [10] Л.С. Пожарская, С.Г. Либерман, В.М. Горбатов. *Кровь убойных животных и ее переработка* (Пищепром, М., 1960)
- [11] А.В. Сидоров, А.А. Зайцев, Д.В. Кузнецов. *Вестник Московского гос. областного ун-та. Сер. физика-математика*, (3), 29–38 (2021). DOI: 10.18384/2310-7251-2021-3-29-38
- [12] С.П. Данников. *Аграрная Россия*, (8), 29–33 (2018). DOI: 10.30906/1999-5636-2018-8-29-33
- [13] L.A. Geddes, C. Sadler. *Med. Biol. Eng.*, **11**, 336–339 (1973).
- [14] Р. Хаазе. *Термодинамика необратимых процессов* (Мир, М., 1967)
- [15] С.С. Духин. *Электропроводность и электрокинетические свойства коллоидных систем* (Наукова думка, Киев, 1975)