

06

Исследование термоэлектрокинетического эффекта в крови ЖИВОТНЫХ

© А.А. Зайцев,¹ В.М. Грабов,² Д.В. Кузнецов,¹ А.В. Сидоров,¹ Н.И. Тиньков¹

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 28 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 3 июня 2024 г.

Принято к публикации 3 июня 2024 г.

Приведены результаты экспериментальных измерений термоэлектрокинетической ЭДС образцов крови животных. Перекрестный термоэлектрокинетический эффект, возникающий в водных растворах ионных соединений под действием трех термодинамических сил, исследован в случаях, когда кинетические и температурные параметры изучаемых проб соответствовали реальным условиям функционирования живых организмов. Обнаружено, что формируемые ЭДС соизмеримы по величине с известными значениями биопотенциалов человека. С целью изучения влияния ионного состава на электрические и термоэлектрические свойства крови проведены измерения в образцах с измененным соотношением концентраций ионов калия и натрия по сравнению с нормальными исходными. Выявлено влияние ионного баланса на величину формируемой термоЭДС. Полученные зависимости могут быть использованы для диагностики электролитных нарушений, в том числе гипо- и гиперкалиемии.

Ключевые слова: термоЭДС, плазма крови, гиперкалиемия, гипокалиемия.

DOI: 10.61011/JTF.2024.09.58676.57-24

Введение

Исследование физико-химических свойств крови животных, в том числе человека, представляет значительный интерес для решения задач диагностики. Изучение кинетических эффектов, протекающих в образцах плазмы крови, позволяет определять ее ионный состав. Электрохимические [1,2] и фотометрические [3] методы широко применяются в медицине [4] и ветеринарии [5].

Ранее в работе [6] показано, что в условиях течения и перепада температуры в жидких системах живых организмов могут формироваться термоэлектрические и термоэлектрокинетические ЭДС. Измерения проводились на модельных плазмы крови растворах.

В работе [7] исследовались термоэлектрические свойства и электропроводность плазмы крови животных, а также влияние разбавления раствором Рингера и дистиллированной водой на измеряемые характеристики. Высказана гипотеза о влиянии термоэлектрической ЭДС, соизмеримой по величине с известными значениями биопотенциалов человека, на протекание биохимических процессов в организме, а также на механизм терморегуляции. Сказанное подтверждает актуальность темы исследования и необходимость его продолжения.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование термоэлектрических эффектов в условиях *in vitro* моделирующих перекрестные явления, возникающие в кровеносной системе теплокровных животных.

1. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для измерения термоэлектрокинетической ЭДС в образцах плазмы крови животных использовалась экспериментальная установка на основе U-образной трубки, описанная в [8]. Схематически установка приведена на рис. 1.

1.1. Измерение термоэлектрокинетической ЭДС в образцах свиной крови

В настоящей работе впервые проведены измерения термоэлектрокинетического эффекта в плазме свиной крови. Исследовано влияние на величину термоэлектрокинетической ЭДС скорости массопереноса и разности температур.

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

Выбор свиной крови в качестве объекта исследования обусловлен схожестью ионного состава ее плазмы с плазмой крови человека. Расхождение содержания основных определяющих элементов является незначительным [9,10]:

— Na^+ у человека 135–155 mmol/l, у свиней 180 mmol/l.

— K^+ у человека 3.6–5.0 mmol/l, у свиней 7 mmol/l.

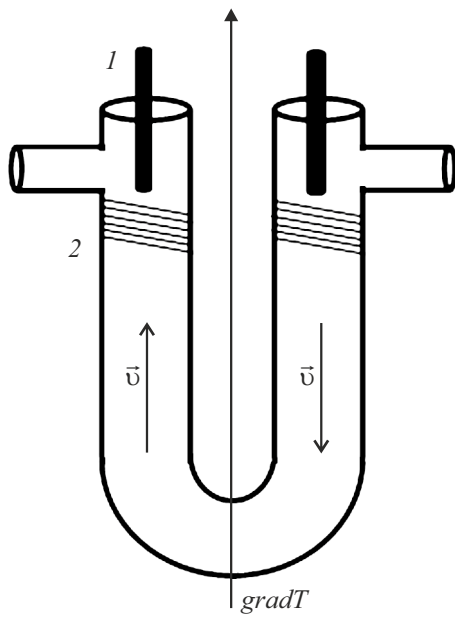


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по измерению термоэлектрокинетической ЭДС в жидких растворах электролитов: 1 — электроды сравнения, 2 — проволочный нагреватель.

— Ca^{2+} у человека 2.25–2.75 mmol/l, у свиней 3 mmol/l.

— Cl^- у человека 97–108 mmol/l, у свиней 100 mmol/l.

Термоэлектрокинетический эффект, как перекрестный процесс, формируется в жидких дисперсных системах при наличии трех термодинамических сил — градиентах термодинамических параметров (давления, электрического потенциала, температуры), вызывающих отклонение от равновесного состояния.

В ранней работе авторов [8] представлена методика его экспериментального исследования. Описана установка, состоящая из U-образной трубки, заполненная исследуемым раствором, скорость течения которого регулируется перистальтическим насосом. Электрический сигнал снимается с открытых концов U-образной трубки с помощью электродов второго рода и передается на компьютер посредством интерфейса. В результате формируется таблица данных: время, напряжение, температура. В установке имеется возможность регулировки и измерения температуры жидкости в областях расположения электродов и области сгиба трубки. Такая конфигурация позволяет измерять термоэлектрокинетическую ЭДС, измерять и впоследствии учитывать сопутствующий термоэлектрический эффект, ЭДС которого увеличивает или уменьшает измеряемый сигнал. Установка позволяет изменять: направление и величину создаваемого градиента температуры, направление и величину скорости течения исследуемого раствора — наиболее важные факторы, формирующие кинетическую неоднородность в U-образной трубке.

Измеряемая величина ЭДС складывается из термоэлектрической E_{TE} и термоэлектрокинетической E_{TEK} составляющих: $E = E_{TE} + E_{TEK}$.

Таким образом, для нахождения величины собственно термоэлектрокинетической ЭДС необходимо учитывать термоэлектрический эффект, возникающий между открытыми концами U-образной трубки. Его формирование обусловлено тем, что в правое колено втекает раствор с температурой, выше, чем раствор, поднимающийся по левому колену от сгиба, находящегося при температуре таяния льда. Выравнивание температур областей жидкости, в которые помещены электроды, осуществляется с помощью дополнительных нагревателей, контроль распределения температурного поля осуществляется с помощью тепловизора FLIR EXTECH i5.

Экспериментальные ограничения, связанные с передачей тепла и погрешностями измерений температур текущих жидкостей ограничивают возможности по снижению разности температур между коленами значением в 1–2°C. В работе [7] были проведены измерения термоэлектрической ЭДС в плазме крови животных и получен коэффициент термоЭДС $\alpha = -26.6 \mu\text{V}/\text{K}$. Это значение позволяет рассчитать и учесть сопутствующую термоэлектрическую ЭДС.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость разности потенциалов, возникающих в образце плазмы свиной крови от времени. Разность температур раствора между нагретой и охлаждаемой частями трубки составляла 30°C, массовый расход изменялся от 1.5 до 3 ml/min, что соответствовало скоростям массопереноса 0.09 и 0.18 mm/s.

Опишем характерные этапы проведенного экспериментального измерения.

1–2: сгиб U-образной трубки погружен в воду при температуре, близкой 0°C. Течение жидкости отсутствует. Происходят переходные процессы, устанавливается

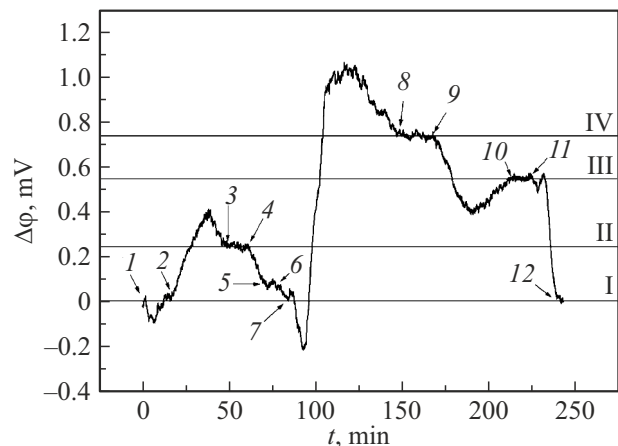


Рис. 2. Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от времени для образцов плазмы свиной крови. Температура охлаждаемой области 5°C, максимальная температура нагретой части равна 35°C.

Таблица 1. Результаты измерений термоэлектрокинетической ЭДС плазмы крови свиней в зависимости от скорости массопереноса v . Доверительная вероятность для всех измерений 0.95

№ п/п	Образец	v , mm/s	E , mV	Относительная погрешность, %
1	Плазма свиной крови	0.09	0.05	$\pm 10\%$
2	Плазма свиной крови	0.11	0.15	$\pm 10\%$
3	Плазма свиной крови	0.18	0.44	$\pm 10\%$

стационарная, фоновая разность потенциалов, близкая к 0 mV (на графике — уровень I).

2–3: установлена фиксированная скорость течения, соответствующая массовому расходу 1.5 ml/min.

3–4: устанавливается стационарная разность потенциалов, соответствующая сумме $E_{ТЕК}$ и $E_{ТЕ}$.

4–5: с помощью дополнительных нагревателей выравниваются температуры областей раствора, в которые установлены электроды, для минимизации вклада сопутствующего термоэлектрического эффекта.

5–6: устанавливается стационарная разность потенциалов (уровень II) соответствующая сумме $E_{ТЕК}$ и $E_{ТЕ}$. При $\alpha = -26.6 \mu\text{V/K}$ и $\Delta T = 2 \text{ K}$ величина термоэлектрической ЭДС составляет 0.05 mV. Как видно из графика, величина термоэлектрокинетической ЭДС и термоэлектрической ЭДС при данной скорости массопереноса сравнимы по величине.

6–7: отключение перистальтического насоса, разность потенциалов снижается до значения, близкого к фоновому.

7–8: установлена постоянная скорость течения, соответствующая массовому расходу 3 ml/min.

8–9: устанавливается стационарная разность потенциалов (уровень IV) соответствующая сумме $E_{ТЕК}$ и $E_{ТЕ}$. При $\alpha = -26.6 \mu\text{V/K}$ и $\Delta T = 4 \text{ K}$ величина термоэлектрической ЭДС составляет 0.1 mV. Как видно из графика, величина термоэлектрокинетической ЭДС превосходит значение термоэлектрической ЭДС при данной скорости массопереноса.

10–11: устанавливается стационарная разность потенциалов (уровень III) соответствующая сумме $E_{ТЕК}$ и $E_{ТЕ}$. При $\alpha = -26.6 \mu\text{V/K}$ и $\Delta T = 2 \text{ K}$ величина термоэлектрической ЭДС составляет 0.05 mV.

11–12: отключение массопереноса, разность потенциалов снижается до значения, близкого к фоновому.

Результаты измерений термоэлектрокинетической ЭДС в образцах плазмы свиной крови для различных скоростей массопереноса приведены в табл. 1.

1.2. Исследование влияния ионного баланса на термоэлектрические свойства крови

Для обнаружения влияния концентрации ионов калия на значение коэффициента термоЭДС была проведена серия экспериментов на медицинском растворе Рингера, с различным процентным содержанием компонент.

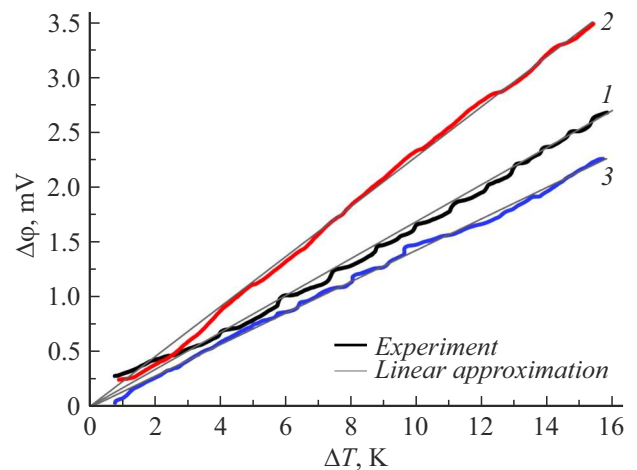


Рис. 3. Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от разности температур для образцов раствора Рингера, с различным содержанием ионов калия. 1 — стандартный баланс (4 mmol/l), 2 — избыток ионов (5.5 mmol/l), 3 — нехватка ионов (3 mmol/l). Температура более холодной области равна 18°C.

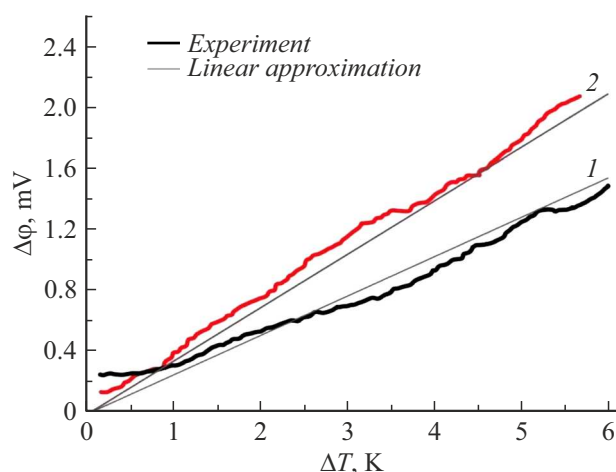
При этом учитывалось, что стандартный состав медицинского раствора Рингера (147.2 mmol/l NaCl, 4 mmol/l KCl и 2.25 mmol/l CaCl₂) [9], является изотоничным по отношению к плазме крови человека, а отклонения от исходных пропорций позволяет имитировать случаи ионного дисбаланса. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости термоэлектрической ЭДС трех образцов модифицированного раствора Рингера от разности температур. Сравнение графиков подтверждает зависимость коэффициента термоЭДС от ионного баланса.

На следующем этапе проводилось исследование термоэлектрического эффекта в образцах плазмы свиной крови с модифицированным ионным составом.

Измерение термоэлектрических потенциалов проводилось при максимальном приближении к условиям функционирования организмов теплокровных существ, учитывая температуру крови в области сердца 38°C и температуру крови в конечностях 25°C. Температура холодной части трубки равнялась комнатной температуре 18°C и оставалась неизменной в течение всего эксперимента, в то время как для горячей части трубки максимальная температура ограничивалась температурой коагуляции белка и была снижена до 40°C.

Таблица 2. Результаты измерений коэффициента термоэлектрической ЭДС α растворов Рингера и плазмы свиной крови. Доверительная вероятность для всех измерений 0.95

№ п/п	Вещество	α , mV/K	$\pm\Delta\alpha$, mV/K	Относительная погрешность, %
1	Раствор Рингера (4 mmol/l)	0.168	0.010	6
2	Раствор Рингера с избытком ионов К (5.5 mmol/l)	0.227	0.010	4
3	Раствор Рингера с недостатком ионов К (3 mmol/l)	0.143	0.010	7
4	Плазма свиной крови (7 mmol/l)	0.271	0.010	5
5	Плазма свиной крови с избытком ионов К (8 mmol/l)	0.367	0.010	10

**Рис. 4.** Зависимость разности термоэлектрических потенциалов от разности температур для образцов плазмы свиной крови, с различным содержанием ионов калия. 1 — стандартный баланс (7 mmol/l), 2 — избыток ионов (8 mmol/l). Температура более холодной области равна 18°C.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости термоэлектрической ЭДС двух образцов плазмы свиной крови от разности температур между нагреваемой и холодной областями. Образец № 1 представлял исходную плазму крови, образец № 2 моделировал отклонение ионного состава от физиологической нормы за счет внесения дополнительного количества хлорида калия. Отличия измеренных значений коэффициента термоЭДС значимы, и превышают погрешность эксперимента.

Для повышения релевантности часть измерений проводилась не только на участке увеличения разницы температур ΔT , но и в процессе остывания, т.е. на участке уменьшения разницы температур ΔT . Измере-

ния указанным образом были проведены на более чем 40 образцах раствора Рингера, плазмы свиной крови, в том числе, модифицированных по ионному составу. Сводные данные о влиянии концентрации ионов калия на термоэлектрические свойства приведены в табл. 2. Расчетная погрешность измерения коэффициента термоЭДС α не превышала 10%.

Представленные в табл. 2 данные свидетельствуют о том, что концентрация ионов калия, оказывающая существенное влияние на протекание биохимических процессов в живых организмах [9,10], также определенным образом влияет на величину термоэлектрических потенциалов, возникающих в крови под действием градиентов температур.

Таким образом, измеряемые термоэлектрическая и термоэлектрокинетическая ЭДС имеют порядок единиц mV, что сопоставимо с величинами биопотенциалов. Согласно [11], значения параметров биопотенциалов тканей и органов человека находятся в следующих диапазонах: сердце — до 5 mV; головной мозг (на поверхности скальпа / на открытом мозге) — 0.2 и 5 mV соответственно; желудок — до 10 mV; мышечные ткани — до 10 mV; спинной мозг — не более 0.1 mV.

1.3. Исследование влияния ионного баланса на электропроводность плазмы крови

Измерения электропроводности проводились с помощью лабораторного кондуктометра S30-K SevenEasy (Mettler Toledo). Образцы плазмы свиной крови приготавливались по методике, описанной выше для термоэлектрических измерений. Измерения проводились при постоянной температуре $t = 22^\circ\text{C}$.

Порогом концентрации ионов калия в плазме человеческой крови диагностируемым как гиперкалиемия принято считать 5.0 mmol/l [2,10]. В этой связи для

получения образца, моделирующего гиперкалиемию, в плазму свиной крови добавлялся хлорид калия из расчета 160 mg на 1 l плазмы.

В результате были получены следующие значения электропроводности для исходной и модифицированной плазмы свиной крови соответственно:

- 1) нормальный баланс $\sigma = 232 \pm 3 \text{ mS/cm}$;
- 2) гиперкалиемию $\sigma = 256 \pm 3 \text{ mS/cm}$.

Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования термоэлектрических свойств крови животных (свиней) позволили получить ряд результатов и сделать следующие выводы.

1. Экспериментально обнаружено формирование термоэлектродинамической ЭДС в образцах плазмы крови животных, находящихся в рамках, соответствующих условиям функционирования живых организмов.

2. Измеренная величина термоэлектродинамической ЭДС (0.5 mV) сравнима с известными значениями биохимических потенциалов [11], при этом скорость массопереноса (0.1 mm/s) [9] и разность температур (10 K) соотносятся с реальными значениями параметров кровотока.

3. Экспериментально установлена связь концентрации ионов калия в образцах плазмы крови и модельных ей растворах электролитов с величиной, измеряемой термоЭДС.

4. Совместные измерения величины коэффициента термоЭДС и электропроводности образцов физиологических жидкостей (плазмы крови) могут быть использованы для экспресс-диагностики электролитных нарушений.

Полученные впервые в работе результаты позволяют оценить влияние термоэлектрических явлений на термоэлектромеханические процессы в организмах теплокровных животных.

Заявление о соблюдении этических норм и стандартов работы с людьми и животными

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] М. Laposata. *Laposatas Laboratory Medicine Diagnosis of Disease in Clinical Laboratory*. ed. by M. Weitz, P.J. Boyle (McGraw-Hill Education, 2018)
- [2] О.Г. Писаков, А.А. Борисенко, В.Г. Гуслев, В.В. Егоров, К.К. Коваленко, С.В. Ломако, Б.А. Николаев, Е.М. Романько, А.А. Ратько Вестник БелГУ Серия 2: Химия. Биология. География, 1, 22 (2000)
- [3] *Клиническая диагностика внутренних болезней сельскохозяйственных животных*, под ред. В.И. Зайцева (Колос, М., 1964), 351 с.
- [4] *Гистология, цитология и эмбриология*, под ред. Ю.А. Афанасьева, С.Л. Кузнецова, Н.А. Юриной (Медицина, М., 2006), 768 с.
- [5] J.B. Tasker. *Fluids, Electrolytes, and Acid-Base Balance*. In: *Clinical Biochemistry in Domestic Animals*, 3rd eds, ed. by J.J. Kaneko (Academic Press, 1980), p. 401–446.
- [6] В.М. Грабов, А.А. Зайцев, Д.В. Кузнецов, А.В. Сидоров. ЖТФ, **88** (10), 1462 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.10.46486.8-18 [V.M. Grabov, A.A. Zaitsev, D.V. Kuznetsov, A.V. Sidorov. *Tech. Phys.*, **63** (10), 1415 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218100122]
- [7] А.А. Зайцев, В.М. Грабов, А.В. Сидоров, Д.В. Кузнецов. ЖТФ, **92** (7), 1069 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52664.342-21 [A.A. Zaitsev, V.M. Grabov, A.V. Sidorov, D.V. Kuznetsov. *Tech. Phys.*, **67** (7), 893 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.07.54487.342-21]
- [8] А.А. Зайцев, В.М. Грабов, Д.В. Кузнецов. *Indian J. Sci. Technol.*, **8** (10), 1 (2015). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i10/84884
- [9] *Большая медицинская энциклопедия* гл. ред. Б.В. Петровский. 3-е изд. (Советская энциклопедия, М., 1980), т. 12: Крихирургия — Ленегр. с. 93–132.
- [10] Л.С. Пожарская, С.Г. Либерман, В.М. Горбатов. *Кровь убойных животных и ее переработка* (Пищепром, М., 1960), 304 с.
- [11] *Съем и обработка биоэлектрических сигналов* К.В. Зайченко, О.О. Жаринов, А.Н. Кулин и др. (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, СПб., 2001), 140 с. ISBN 5-8088-0065-X. — EDN THFSLK.