

УДК 536.75; 536-12.01

В. М. Грабов, А. А. Зайцев,
Д. В. Кузнецов, А. В. Сидоров,
И. В. Новиков

ТЕРМОЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СЛАБЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Рассмотрены условия, в которых формируются новые термоэлектродинамические явления, такие как перекрестные явления при наличии в электропроводящей среде переноса массы, теплоты и электрического заряда. Разработана экспериментальная методика исследования предсказанного ранее термоэлектродинамического эффекта, обеспечивающая надежное измерение термоэлектродинамической ЭДС. Выполнены экспериментальные исследования термоэлектродинамического эффекта и влияния на него сопутствующих электрохимического, электродинамического и термоэлектрического эффектов в слабых растворах уксусной кислоты и сернокислого натрия. Проведено количественное определение термоэлектродинамической ЭДС и ее зависимости от скорости протекания электролита.

Термоэлектродинамические явления. К термоэлектрическим явлениям обычно относят возникновение электродвижущей силы или электрических токов при создании градиента температуры в электрически неоднородной или анизотропной среде, а также возникновение тепловых потоков и градиентов температуры при пропускании в таких средах электрического тока [1]. Принципиально важной является возможность протекания термоэлектрических явлений, когда неоднородность среды формируется как самоорганизованная структура в сильно неравновесных условиях. Целью данной работы является исследование термоэлектрических явлений при наличии градиента температуры в условиях кинетической неоднородности среды, когда формируется новый класс явлений, получивших название термоэлектродинамических [2–4].

Стационарные термоэлектрические явления в твердых телах обычно описываются системой уравнений для плотности потока электрического заряда \vec{j}_e и теплоты \vec{j}_Q

$$\begin{aligned} \vec{j}_e &= \sigma \vec{E} + \alpha \sigma \text{grad}T; \\ \vec{j}_Q &= -\kappa \text{grad}T + \pi \vec{j}_e. \end{aligned} \tag{1}$$

Перенос массы и теплоты при действии градиента температуры и наличии динамических процессов описывают уравнения Навье–Стокса и теплопроводности

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} = \frac{\vec{F}}{\rho} - \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \nabla^2 \vec{v}, \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \text{grad}T = a \nabla^2 T, \quad a = \frac{\kappa}{c_p \rho}. \quad (3)$$

В уравнениях (1–3) T — температура; σ , ρ_e , κ , α , π — коэффициенты переноса, в общем случае — тензоры, соответственно удельной электропроводности, удельного сопротивления, удельной теплопроводности, Зеебека, Пельтье, t — время; P — давление; \vec{v} — вектор скорости конвективного течения жидкости; ρ — плотность жидкости; ν — кинематический и η — динамический коэффициенты вязкости; a — коэффициент температуропроводности; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении [3–5].

При наличии переноса массы и теплоты в вязких электропроводящих системах в дополнение к эффектам, описываемым уравнениями (1)–(3), формируются новые перекрестные, обусловленные переносом электрического заряда термоэлектрокинетические явления [2–4].

Условия сильной неравновесности, вызывающей кинетические фазовые переходы, определяются критическими значениями безразмерных параметров типа, например, числа Релея (Ra) при формировании упорядоченных диссипативных структур (типа ячеек Бенара), зависящего от макроскопических параметров системы:

$$\text{Ra} = \frac{g\alpha\beta h^4}{\kappa\nu},$$

g — ускорение свободного падения; α — коэффициент объемного расширения; β — градиент температуры; κ — коэффициент теплопроводности; h — толщина слоя жидкости. Эти критерии являются макроскопическими. Кинетические фазовые переходы в сильно неравновесных условиях осуществляются вследствие нелинейности свойств среды, т.е. зависимости характеристик среды от значений термодинамических параметров и их градиентов [7].

Экспериментальное исследование термоэлектрокинетического эффекта позволяет определить некоторые параметры электролитов (в частности, коэффициенты термодиффузии, подвижности ионов). Подробный анализ термоэлектрокинетических явлений позволит описать процессы, происходящие в самоорганизующихся динамических и электромагнитных структурах при наличии градиента температуры, в том числе в конденсированных средах.

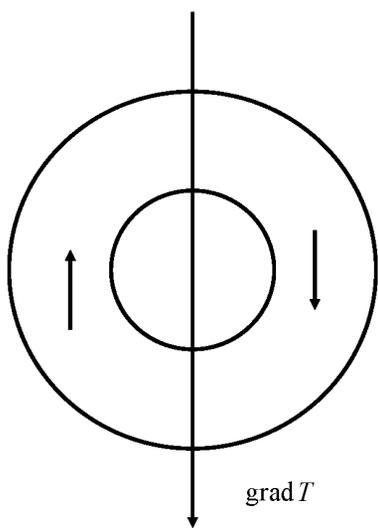


Рис. 1. Идеальная модель конвективной ячейки

числа Релея через критическое значение в тороиде формируется вихревое движение жидкости, направленное случайным образом (обозначено на рис. 1 стрелками). В данной конфигурации опыта в случае электропроводящей жидкости ее вихревое движение приведет к формированию замкнутых термоэлектрокинетических токов, которые можно обнаружить, например, по их магнитному полю [4].

Таким образом, простейшей моделью для исследования конвективной неустойчивости и возникновения вихревого движения и вихревых термоэлектрокинетических токов в электропроводящей жидкости является модель заполненного жидкостью тороида, находящегося в поле силы тяжести при наличии вертикального градиента температуры (см. рис. 1) [4]. Однако экспериментальная реализация модели тороида представляет существенные трудности.

Поэтому в представленной работе была исследована открытая система в виде U-образной трубки в поле силы тяжести, через которую может протекать электропроводящая жидкость, при наличии вертикального градиента температуры [3, 9, 10].

Отличие от модели тороида заключается в том, что в данном случае система является открытой для переноса тепла, массо- и электропереноса, поток жидкости формируется не градиентом температуры, а внешним, создаваемым искусственно, малым перепадом давления. Отличие заключается также в том, что в данном случае электрическая цепь может быть разомкнутой; это обеспечивает возможность измерения термоэлектрокинетической ЭДС.

Установка для наблюдения термоэлектрокинетического эффекта состоит из U-образной трубки (рис. 2.) и измерительного прибора. В

Постановка эксперимента. Примером пространственных диссипативных структур являются ячейки Бенара. Моделью такой конвективной структуры может служить тороид, заполненный вязкой жидкостью, находящийся в гравитационном поле Земли при наличии градиента температуры (рис. 1) [4, 8]. Очевидно, что в случае электропроводящей жидкости в условиях динамического и термодинамического равновесия перенос массы и электрического заряда отсутствует, так что ЭДС в замкнутом контуре тороида будет равна нулю. Если в данной системе создать вертикальный градиент температуры, то при переходе

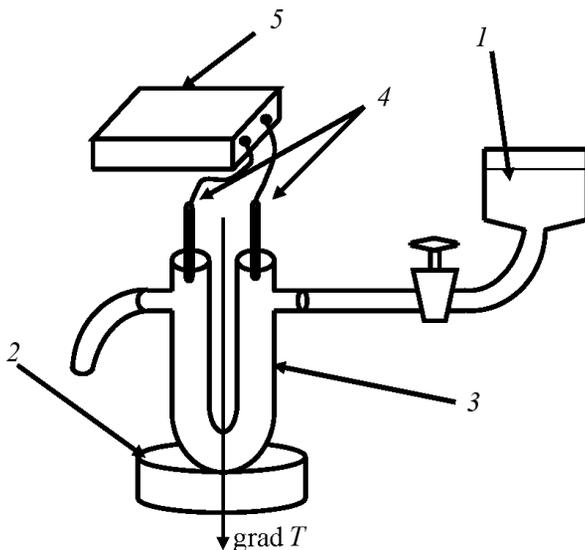


Рис. 2. Схема установки:

1 — электролит; 2 — баня лабораторная; 3 — U-образная трубка; 4 — электроды; 5 — электроизмерительный прибор

опыте были использованы трубки из стекла, имеющие следующие размеры: площадь сечения $\approx 1 \text{ см}^2$, длина колена 10, 20 или 30 см (выполнены из хлоркальциевого стекла). С целью создания градиента температуры область изгиба трубки погружалась в нагретую неэлектропроводящую жидкость или лабораторную баню (водную либо песочную). Перепад температуры между подогреваемой областью изгиба и концами трубки составлял примерно 30 К. Для измерения ЭДС использовались медные, молибденовые и хлорсеребряные электроды, которые приводились в контакт с электропроводящей жидкостью через открытые концы U-образной трубки. Измерение напряжения между электродами производилось микровольтнаноамперметром Ф-136 или иономером ИПЛ-113 с возможностью дифференциального измерения и подключения к компьютеру.

Сущность кинетической неоднородности заключается в том, что в одном из колен U-образной трубки вектор скорости течения жидкости совпадает по направлению с градиентом температуры, а в другом колене эти направления противоположны. Таким образом, обусловленные термодиффузией потоки ионов направлены в одном колене по течению, а в другом — против течения электропроводящей жидкости, что является причиной формирования термоэлектрокинетической ЭДС [2–4]. Для четкого наблюдения термоэлектрокинетического эффекта и измерения термоэлектрокинетической ЭДС электролит необходимо подобрать таким образом, чтобы обеспечить наибольшую разницу подвижностей положительных и отрицательных ионов [3, 9, 10]. Выполненные ранее исследования [3, 9] показали, что для целей изучения

термоэлектрокинетического эффекта с применением металлических электродов может быть использован слабый водный раствор уксусной кислоты CH_3COOH , как химически мало активной, с большим различием подвижностей положительных и отрицательных ионов. Поэтому в данной работе основные исследования выполнены с применением водного раствора уксусной кислоты. Однако водные растворы уксусной кислоты характеризуются высоким значением электрического сопротивления, что, в частности, при измерении ЭДС приводит к высокому уровню шумов, так что ряд исследований термоэлектрокинетического эффекта выполнен с применением водных растворов сернокислого натрия Na_2SO_4 и щелочи KOH . Использование слабых растворов одно-одновалентных электролитов (например, KOH , KI) упрощает теоретический анализ получаемых экспериментальных результатов, так как в этом случае можно ожидать простые закономерности [5].

Экспериментальные результаты и их обсуждение. При измерении термоэлектрокинетической ЭДС главной задачей было выделить соответствующий ей сигнал, минимизировать вклад сопутствующих явлений. К ним относятся: электрохимический, электрокинетический и термоэлектрический эффекты. Рассмотрим их влияние на протекание термоэлектрокинетического эффекта.

Электрохимический эффект. При контакте проводника первого рода (металлического электрода) с полярным растворителем (водой) либо раствором электролита на границе электрод–жидкость возникает двойной электрический слой [11]. Вследствие неконтролируемой асимметрии электродов и их контактов с раствором электролита даже в условиях термодинамического равновесия скачки потенциала на контактах с электролитом в различных коленах U-образной трубки будут различными, что приводит к установлению разности потенциалов электрохимической природы порядка нескольких милливольт.

Электрокинетический эффект. Электрокинетический эффект возникает при движении электролита по U-образной трубке (потенциал течения) в отсутствие градиента температуры. Устанавливаемая при данном эффекте разность потенциалов обусловлена различным взаимодействием ионов раствора со стенками трубки. Значение электрокинетической ЭДС зависит от материалов электродов и трубки, от электролита и скорости его протекания.

При исследовании термоэлектрокинетического эффекта в растворах уксусной кислоты с применением электродов из меди наблюдался сравнимый вклад ЭДС электрохимической и электрокинетической природы — порядка нескольких милливольт.

В ходе дальнейших экспериментальных исследований термоэлектрокинетического эффекта в растворах уксусной кислоты было уста-

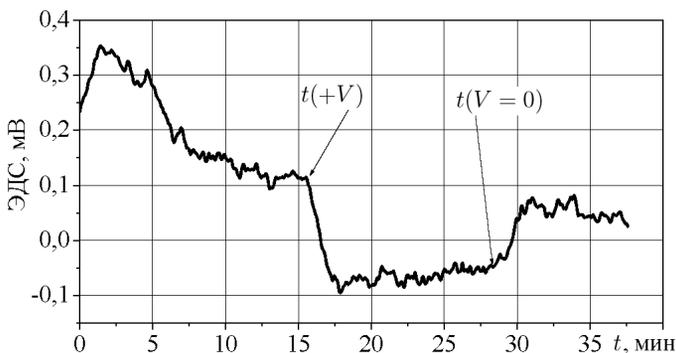


Рис. 3. Электрокинетический эффект с использованием хлорсеребряных электродов в растворе Na_2SO_4 концентрацией 0,085 моль/(л·мл) при скорости течения $V = 6,8$ мл/мин

новлено, что при использовании электродов из молибдена ЭДС электрохимического и электрокинетического происхождения имеют значения, меньшие по сравнению с медными электродами, что обеспечивает возможность более четкого наблюдения и количественного измерения термоэлектрокинетической ЭДС [9, 10].

Следующим шагом в исследовании термоэлектрокинетического эффекта является переход от металлических (необратимых) электродов к хлорсеребряным (обратимым и защищенным от потока). На рис. 3 приведен график электрокинетического эффекта. Обозначения $t(+V)$ и $t(V = 0)$ соответствуют моментам включения и выключения потока жидкости. От точки $t = 0$ до $t(+V)$ жидкость находится в динамическом равновесии, следовательно, наблюдаемая ЭДС имеет электрохимическую природу. В интервале от $t(+V)$ до $t(V = 0)$ к электрохимической добавляется электрокинетическая ЭДС. Как видно из рис. 3, при использовании хлорсеребряных электродов значение электрохимической и электрокинетической ЭДС составляет около 0,1 мВ, что существенно меньше по сравнению с металлическими электродами [9].

Термоэлектрический эффект. Влияние термоэлектрического эффекта проявляется при создании градиента температуры вдоль заполненной раствором электролита U-образной трубки. Термоэлектрическая ЭДС, устанавливающаяся в данном случае, обуславливается зависимостью электродного потенциала от температуры и различной скоростью термодиффузии ионов различных знаков. В случае применения хлорсеребряных электродов с насыщенным раствором соли KCl вклад в термоэдс может вносить зависимость коэффициентов диффузии и диффузионных потенциалов ионов калия и хлора в исследуемый электролит от температуры [5, 12].

В отсутствие протекания электролита вследствие симметрии термоэдс в каждом из колен трубки одинаковы, так что термоэдс между

электродами будет равна нулю. При наличии градиента температуры и протекании электролита его температура на выходе из U-образной трубки несколько выше, чем на входе. Вследствие этого устанавливается разность температур на контактах, зависящая от скорости протекания электролита. При температуре электролита на входе $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и его температуре в области подогреваемого сгиба U-образной трубки около $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура электролита на выходе превышала температуру на входе в зависимости от скорости V на величину ΔT .

По результатам отдельных измерений была проведена оценка значения термоэлектрической ЭДС в растворе уксусной кислоты с концентрацией $0,17$ моль/л. С применением молибденовых электродов ее значение составило 1680 мкВ/К. При использовании хлорсеребряных электродов термоэлектрическая ЭДС оказалась примерно 100 мкВ/К, что заметно меньше, чем в случае молибденовых электродов. Результаты указывают на заметный вклад в термоэдс температурной зависимости электродных потенциалов молибдена от температуры. Для подтверждения данного вывода были проведены следующие исследования: в установке (см. рис. 2) устанавливались электроды молибденовый (исследуемый) и хлорсеребряный (электрод сравнения). В начале опыта температура электролита во всем объеме, включая приэлектродные области, была одинаковой, примерно равной $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При создании градиента температуры путем подогрева сгиба U-образной трубки температура электролита повышалась, оставаясь при отсутствии протекания примерно одинаковой вблизи обоих электродов. Зависимость напряжения между электродами от температуры приэлектродных областей приведена на рис. 4. Наблюдаемое существенное возрастание ЭДС обусловлено зависимостью потенциала молибденового электрода относительно хлорсеребряного электрода от температуры.

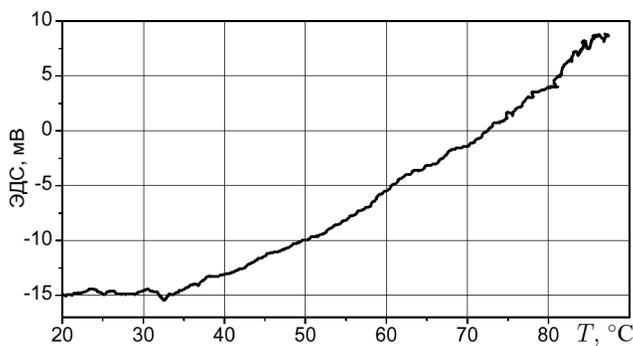


Рис. 4. Зависимость потенциала молибденового электрода относительно хлорсеребряного электрода сравнения от температуры приэлектродных областей в растворе уксусной кислоты концентрацией $0,17$ моль/л

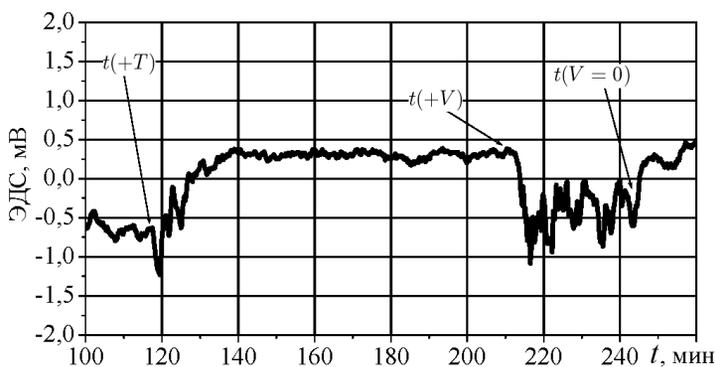


Рис. 5. Термоэлектродкинетическая ЭДС для раствора уксусной кислоты, концентрацией 0,17 моль/л с использованием хлорсеребряных электродов; скорость течения $V = 3$ мл/мин

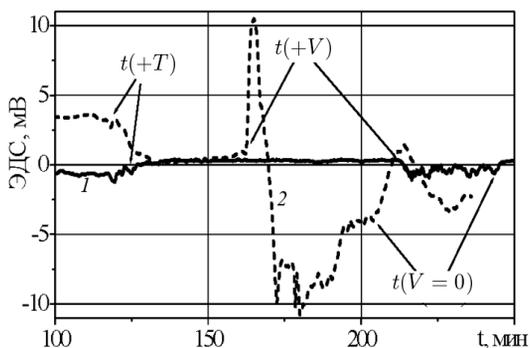


Рис. 6. Термоэлектродкинетическая ЭДС для раствора уксусной кислоты концентрацией 0,17 моль/л: 1 — хлорсеребряные электроды, $V = 2,6$ мл/мин; 2 — молибденовые электроды, $V = 3$ мл/мин

На основе приведенных результатов можно сделать вывод, что влияние термоэлектрического эффекта при малых концентрациях и малых скоростях течения электролита не оказывает заметного влияния на значение термоэлектродкинетической ЭДС при использовании хлорсеребряных электродов в отличие от металлических электродов.

Экспериментальные результаты по исследованию термоэлектродкинетического эффекта в водных растворах электролитов. На рис. 5, 6 изображены графики термоэлектродкинетической ЭДС с использованием хлорсеребряных электродов (см. рис. 5) и сравнение эффекта для молибденовых и хлорсеребряных электродов (см. рис. 6). График изменения напряжения при использовании молибденовых электродов на рис. 6 приведен для иллюстрации резких выбросов, обусловленных импульсом скорости в начале протекания электролита, что указывает на необходимость плавного изменения скорости до стационарного значения. Применение хлорсеребряных электродов,

защищенных от потока, делает экспериментальную установку менее чувствительной к резким изменениям скорости протекания электролита.

Из обсуждения сопутствующих эффектов вытекает процедура экспериментального определения термоэлектрокинетической ЭДС. Прежде всего следует произвести измерение напряжения между электродами в случае термодинамического равновесия, чтобы оценить значение электрохимической ЭДС. Далее следует установить определенную скорость протекания электролита в отсутствие градиента температуры. Значение измеряемого в этих условиях напряжения соответствует вкладу ЭДС электрохимической и электрокинетической природы. Следующим этапом является установление стационарного градиента температуры между областью изгиба и концами U-образной трубки. Изменение напряжения между электродами по сравнению с его значением в отсутствие градиента температуры представляет собой вклад термоэлектрокинетического и термоэлектрического эффектов. При известных значениях коэффициента термоэдс и определенной при данной скорости протекания электролита разности температур на выходе и входе U-образной трубки следует вычислить значение термоэлектрической ЭДС и вычесть его из определенной на предыдущем этапе суммы значений напряжения термоэлектрокинетического и термоэлектрического эффектов. В итоге получим значение термоэлектрокинетической ЭДС в данных условиях эксперимента. На основе результатов обсуждения природы и величины сопутствующих эффектов можно сделать вывод, что использование хлорсеребряных электродов позволяет уменьшить их влияние. Таким образом, обеспечивается надежное определение термоэлектрокинетической ЭДС с учетом воспроизводимости и статистической обработки результатов.

С использованием указанной процедуры были проведены измерения термоэлектрической и термоэлектрокинетической ЭДС для раствора едкого калия (КОН) с использованием хлорсеребряных электродов. Результаты, отраженные на рис. 7, получены в ходе специально поставленных экспериментов. Диаграмма на рис. 8 показывает результаты измерения термоэлектрокинетической ЭДС в растворе КОН. При малых скоростях протекания электролита будет невелика и разность температур между электродами (см. рис. 2), обусловленная небольшим снижением температуры электролита около правого электрода после включения тока жидкости. По полученному коэффициенту a термоэдс можно рассчитать величину сопутствующего термоэлектрического эффекта, который соответственно будет мал при небольших скоростях протекания электролита. В ходе измерения термоэлектрокинетического эффекта максимальное значение термоэдс приходится на начальный

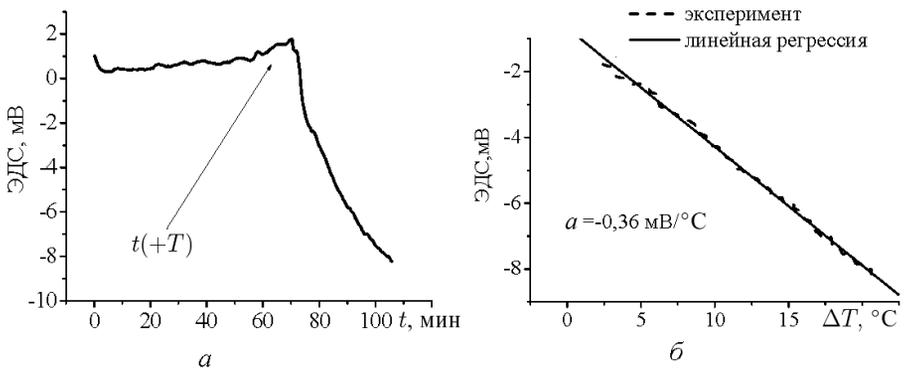


Рис. 7. Термоэлектрическая ЭДС в растворе едкого калия концентрацией 0,017 моль/л:

a — изменение ЭДС при увеличении разности температур между электродами в отсутствие протекания электролита; *b* — зависимость термоэдс от разности температур (*a* — коэффициент термоэдс)

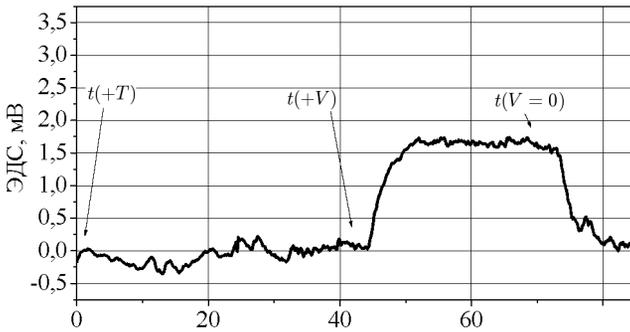


Рис. 8. Термоэлектрокинетическая ЭДС в растворе едкого калия концентрацией 0,017 моль/л; скорость течения электролита 6 мл/мин

этап протекания электролита. В дальнейшем происходит выравнивание температур в течение 20–30 мин (рис. 8), небольшое повышение в правом и понижение в левом колене и установление стационарной разности температур. При этом влияние термоэлектрического эффекта заметно отражается на экспериментальном графике в случае высоких скоростей протекания. Из результатов, приведенных на рис. 8, видно, что разность температур между электродами, от которой зависит разность потенциалов на рис. 7, б, мала, следовательно, мал и вклад сопутствующего термоэлектрического эффекта.

Таким образом, анализ приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что величина вклада сопутствующих эффектов в измеряемую термоэлектрокинетическую ЭДС незначительна и составляет порядка 10 %.

В серии экспериментов были произведены измерения термоэлектрокинетической ЭДС для разных скоростей течения жидкости при

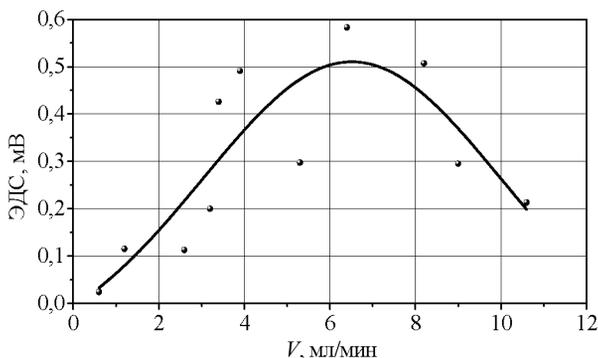


Рис. 9. Зависимость термоэлектрокинетической ЭДС от скорости протекания электролита для раствора серноокислого натрия концентрацией 0,085 моль/л

температуре сгиба U-образной трубки около 75 °С. На рис. 9 приведена зависимость термоэлектрокинетической ЭДС от скорости протекания электролита для раствора соли Na₂SO₄, полученная с использованием хлорсеребряных электродов.

Выводы. 1. Предложенная методика позволяет надежно наблюдать термоэлектрокинетический эффект в растворах жидких электролитов.

2. Использование в установке хлорсеребряных электродов позволяет уменьшить величину и вычесть из измеряемого напряжения вклады сопутствующих явлений электрокинетической электрохимической и термоэлектрической природы, достоверно измерять термоэлектрокинетическую ЭДС.

3. Получены зависимости термоэлектрокинетической ЭДС от скорости переноса для растворов электролитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А н а т ы ч у к Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – Киев: Наук. думка, 1979. – 766 с.
2. Г р а б о в В. М. Термоэлектрические явления в условиях, далеких от термодинамического равновесия // Термоэлектрики и их применения. Доклады VIII Межгосударственного семинара. – СПб. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – 2002. – С. 42–47.
3. Г р а б о в В. М., К о м а р о в В. А., К л и м а н т о в М. М. Экспериментальное наблюдение нового термоэлектрокинетического эффекта в электропроводящей среде // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара (16–17 ноября 2004 г.). – СПб. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – 2004. – С. 110–113.
4. Г р а б о в В. М. Термоэлектрокинетические и термоэлектромагнитные явления в условиях, далеких от термодинамического равновесия // Journal of Thermoelectricity. – 2005. – № 2. – Р. 44–51 (англ.). Термоэлектричество. – 2005. – № 2. – С. 45–53 (рус.). Термоэлектрика. – 2005. – № 2. – С. 45–53 (укр.).
5. Х а а з е Р. Термодинамика необратимых процессов. – М.: Мир, 1967. – 544 с.
6. Ф и л и п п о в Л. П. Явления переноса. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 121 с.
7. Э б е л и н г В. Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир, 1979. – 279 с.

8. Л а н д а П. С. Нелинейные колебания и волны. – М.: Наука, 1997. – 496 с.
9. Г р а б о в В. М., З а й ц е в А. А., К у з н е ц о в Д. В., М а р т ы н о в И. А. Экспериментальное наблюдение термоэлектрического эффекта в жидких электролитах // Материалы IV Всерос. конф. “Необратимые процессы в природе и технике”. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
10. Г р а б о в В. М., З а й ц е в А. А., С и д о р о в А. В., К у з н е ц о в Д. В. Экспериментальная установка для наблюдения термоэлектрокинетического эффекта. – Липецк: ЛГТУ.
11. А н т р о п о в Л. И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высш. шк., 1975. – 568 с.
12. Б о к ш т е й н Б. С. Термодиффузия // СОЖ. – 1999. – № 4. – С. 40–43.

Статья поступила в редакцию 23.11.2007

Владимир Минович Грабов родился в 1939 г., окончил Ленинградский ГПИ в 1960 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики РГПУ им. А.И. Герцена. Автор более 100 научных работ в области физики конденсированного состояния.

V.M. Grabov (b. 1939) graduated from the Leningrad State Polytechnic Institute in 1960. D. Sc. (Phys.-Math.), professor of department of general and experimental physics of RGPU n. a. A.I. Gerzen, Honored Worker of Science of the Russian Federation. Author of more than 100 publications in the field of physics of condensed state.

Андрей Анатольевич Зайцев родился в 1968 г., окончил Московский физико-технический институт в 1991 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент, проректор по учебной работе Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина. Автор более 20 научных работ в области физики конденсированного состояния.

A.A. Zaitsev (b. 1968) graduated from the Moscow Physical and Technical Institute in 1991. Ph. D. (Phys.-Math.), vice-rector for teaching of the Yelets State University n. a. I.A. Bunin. Author of more than 20 publications in the field physics of condensed state.

Александр Валентинович Сидоров родился в 1977 г., окончил Елецкий ГПИ в 1999 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина. Автор более 10 научных работ в области физики конденсированного состояния.

A.V. Sidorov (b. 1977) graduated from the Yelets State Polytechnic Institute in 1999. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of department of physics of of the Yelets State University n.a. I.A. Bunin. Author of more than 10 publications in the field of physics of condensed state.

Денис Владимирович Кузнецов родился в 1981 г., окончил Елецкий государственный университет в 2004 г. Ассистент кафедры физики Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина. Автор семи научных работ в области физики конденсированного состояния.

D.V. Kuznetsov (b. 1981) graduated from the Yelets State University n. a. I.A. Bunin in 2004. Assistant of department of physics of the Yelets State University n. a. I.A. Bunin. Author of 7 publications in the field of physics of condensed state.

Иван Васильевич Новиков родился в 1983 г., окончил Елецкий Государственный университет в 2006 г. Аспирант кафедры физики Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина. Автор двух научных работ в области физики конденсированного состояния.

I.V. Novikov (b. 1983) graduated from the Yelets State University n. a. I.A. Bunin in 2006. Post-graduate of department of physics of the Yelets State University n. a. I.A. Bunin. Author of 2 publications in the field of physics of condensed state.