

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А. БУНИНА»

А.А. Зайцев, Д.В. Кузнецов, А.В. Сидоров

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ЭФФЕКТЫ
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

**Учебно-методическое
пособие**

Елец – 2018

УДК 537.322

ББК 22.333

З 17

Печатается по решению редакционно-издательского совета Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина от 29.01.2018 г., протокол №1

Рецензенты:

Ю.В. Хрипунов, кандидат физико-математических наук, доцент
(Орел, Орловский государственный университет),

Е.И. Трофимова, доктор педагогических наук, доцент
(Елец, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

А.А. Зайцев, Д.В. Кузнецов, А.В. Сидоров

З 17 Термоэлектрические эффекты в конденсированных средах: учебно-методическое пособие. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2018. – 41 с.

Учебно-методическое пособие содержит основные сведения о физике термоэлектрических явлений, классификацию и историю обнаружения ряда эффектов. Обсуждаются как широко известные, так и сравнительно недавно открытые явления. Приводится информация о назначении и устройстве термоэлектрических преобразователей, обсуждаются перспективы их применения. Пособие содержит указания к выполнению лабораторных работ, порядок их выполнения, указания по оформлению отчета, контрольные вопросы для проверки усвоенного материала, расчетные задания.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки естественнонаучного и технического профиля.

УДК 537.322

ББК 22.333

© Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектричество – собирательное название раздела физики и техники, в котором исследуются термоэлектрические эффекты, разрабатываются термоэлектрические устройства для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, а также для термоэлектрического охлаждения.

Ранние наблюдения данных явлений, а также их феноменологическое описание датируется первой половиной XIX века (Зеебек, Пельтье), однако полная их классификация и микроскопическая теория были построены лишь к середине XX века. И до настоящего времени проводятся фундаментальные исследования по созданию новых теорий и подходов к описанию термоэлектрических эффектов, предсказываются и обнаруживаются новые явления этого класса.

Экспериментальные и теоретические исследования в физике термоэлектричества и физике полупроводников стали основой для создания современных термоэлектрических преобразователей, широко применяемых для охлаждения устройств бытовой и промышленной электроники. Особый интерес в условиях надвигающихся энергетических и экологических кризисов представляют термоэлектрические генераторы энергии, которые характеризуются прямым (безмашинным) принципом действия, а также имеют значительную величину КПД.

Большинство классических термоэлектрических эффектов были впервые обнаружены и исследованы в твердотельных, в первую очередь кристаллических полупроводниковых системах. В то же время, созданные для их описания теории применимы для конденсированных сред в целом, в том числе для плазмы, для водных растворов электролитов. Использование последних в качестве объекта исследования позволило предсказать и обнаружить новый класс термоэлектрических эффектов. При этом

требования к экспериментальной установке для их изучения являются не столь жесткими, как для твердотельной электроники (дорогостоящая криогеника, низкие давления, импульсные поля и т.д.). Это позволяет организовать практикум в вузовской учебной лаборатории и проводить его как для магистрантов, так и для бакалавров, получающих естественнонаучное или техническое образование.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Контактные явления

В 1797 г. итальянский ученый Алессандро Вольта открыл явление возникновения разности потенциалов между двумя различными соприкасающимися металлами. Величина и знак контактной разности при фиксированной температуре зависит от взаимного расположения металлов в ряду: Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd. В этой последовательности с увеличением номера уменьшается потенциал.

Контактная разность потенциалов возникает из-за различия величины энергии Ферми μ металлов. Указанное отличие приводит к различию концентрации носителей зарядов (электронов проводимости). В случае приведения металлов в соприкосновение начнется процесс диффузии. Уход электронов из металла с большей концентрацией носителей n_1 приведет к возникновению в нем положительного заряда, другой металл, имевший концентрацию n_2 , зарядится отрицательно. Уровень Ферми в первом металле понизится, во втором – повысится. Возникающая на границе в состоянии равновесия разность потенциалов уравнивает процесс диффузии. Химические потенциалы сравниваются: $\mu_1 + e\varphi_{i1} = \mu_2 + e\varphi_{i2}$, следовательно, контактная разность определяется формулой [1]:

$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{e}. \quad (1)$$

Полученная в приближении свободных электронов оценка контактной разности потенциалов по порядку величины совпадает с экспериментальными значениями.

Эффект Зеебека

В 1821 г. немецкий физик Томас Зеебек обнаружил по действию на магнитную стрелку электрический ток в приборе, изображенном на рис.1. Стрелка располагалась между пластинами из сурьмы и меди, при этом один из спаев нагревался:

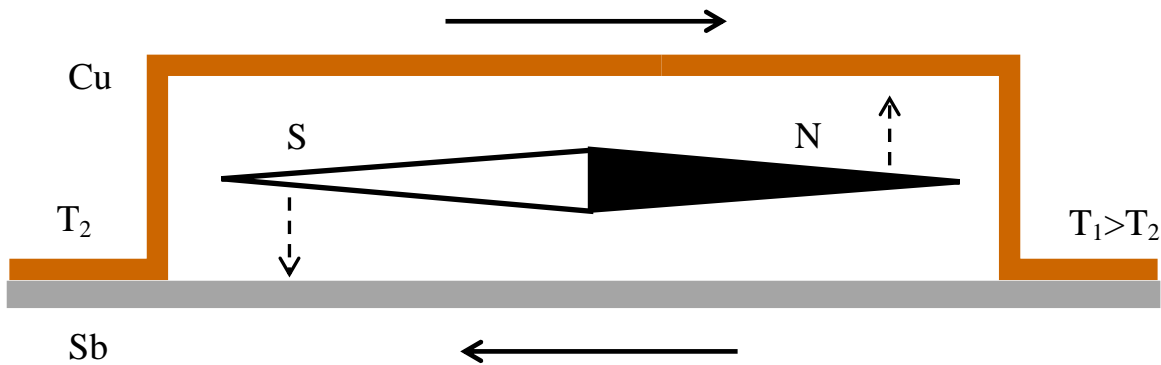


Рис. 1. Схема опыта Зеебека.

Металл, к которому идет ток от спая с более высокой температурой, принято называть положительным. В данной паре в этом качестве выступает сурьма, медь будем называть отрицательным металлом в данной термопаре. Проводя исследования для различных пар металлов, Зеебек получил термоэлектрический ряд.

Для нахождения ЭДС термопары необходимо учитывать соответствующие вклады каждого из спаев $f(T_1), f(T_2)$. При этом возникает зависимость, как от температуры, так и от рода контактирующих веществ. Результирующая ЭДС определяется формулой:

$$\varepsilon = f(T_1) - f(T_2). \quad (2)$$

Коэффициентом термоэлектродвижущей силы называют производную $\alpha = \frac{df}{dT}$. Величину этого коэффициента принято измерять по отношению к одному и тому же металлу – свинцу, т.е. для термопары, в

которой одна из ветвей свинцовая, а другая изготовлена из исследуемого материала.

Для произвольной пары металлов коэффициент термоэлектрической силы находим как разность коэффициентов каждого из металлов по отношению к свинцу:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2. \quad (3)$$

Для большинства термопар в широком диапазоне температур функция $f(T)$ линейна и ЭДС термопары выражается формулой:

$$\varepsilon = [\alpha(T)]_1 - T_2. \quad (4)$$

Для некоторых термопар зависимость $f(T)$ более сложная – квадратичная, и термоэлектрическая ЭДС принимает вид:

$$\varepsilon = [\alpha(T)]_1 - T_2 \left[1 + \frac{\beta}{\alpha} [(T)]_1 + T_2 \right]. \quad (5)$$

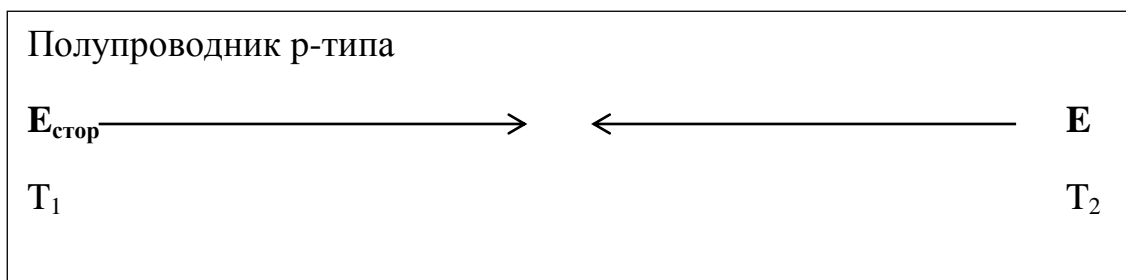
При этом ЭДС при определенных соотношениях температур спаев может становиться равной нулю и менять знак.

Возникновение термоэлектрического тока объясним на примере полупроводников, носителями заряда в которых могут быть двух типов (вариант с электронным механизмом переноса заряда в металлических проводниках представляется частным, более простым случаем).

Нагреем один конец однородного стержня, изготовленного из электронного полупроводника (рис. 2, а). Концентрация электронов здесь увеличится, электроны начнут диффундировать в сторону холодного конца. Горячий конец зарядится положительно по отношению к холодному. Возникшее электрическое поле E будет препятствовать процессу диффузии, т.о. установится стационарное состояние. Сложившийся градиент концентраций внутри полупроводника можно приписать действию сторонних сил со стороны поля $E_{стор}$, уравнивающего поле E : $E_{стор} = E$.

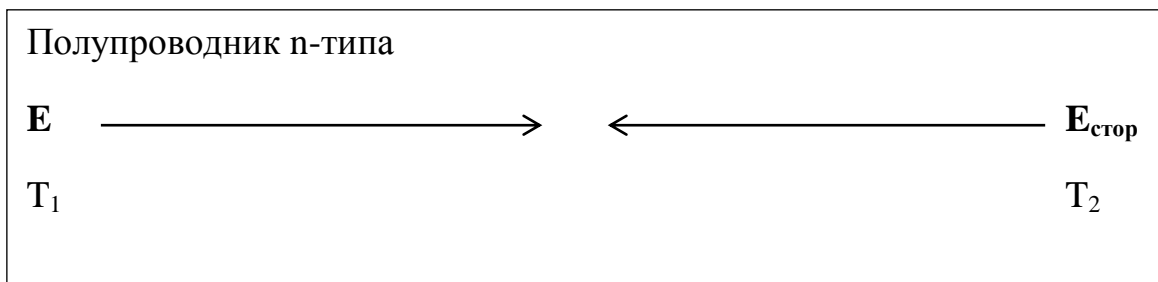
На рис. 2 б показан дырочный проводник, в котором диффузия основных носителей приводит к противоположной конфигурации полей.

Если принимать в рассмотрение одновременно носители двух типов, то диффузионные процессы будут давать взаимно противоположный вклад и даже полностью компенсировать друг друга, что имеет место в свинце. Как следствие, термоэлектродвижущую силу для всех материалов определяют относительно свинца.



$T_1 > T_2$

а)



$T_1 > T_2$

б)

Рис.2. Возникновение термодиффузии в полупроводниках различного типа

Соединим в термопару полупроводниковый образец и, например, проволоку из свинца, в которой термоЭДС равна нулю (рис.3). Создадим между спаями разность температур. Учитывая сделанное выше заключение, получим различные направления для термоэлектрических токов в термопаре на основе электронного и дырочного полупроводника:

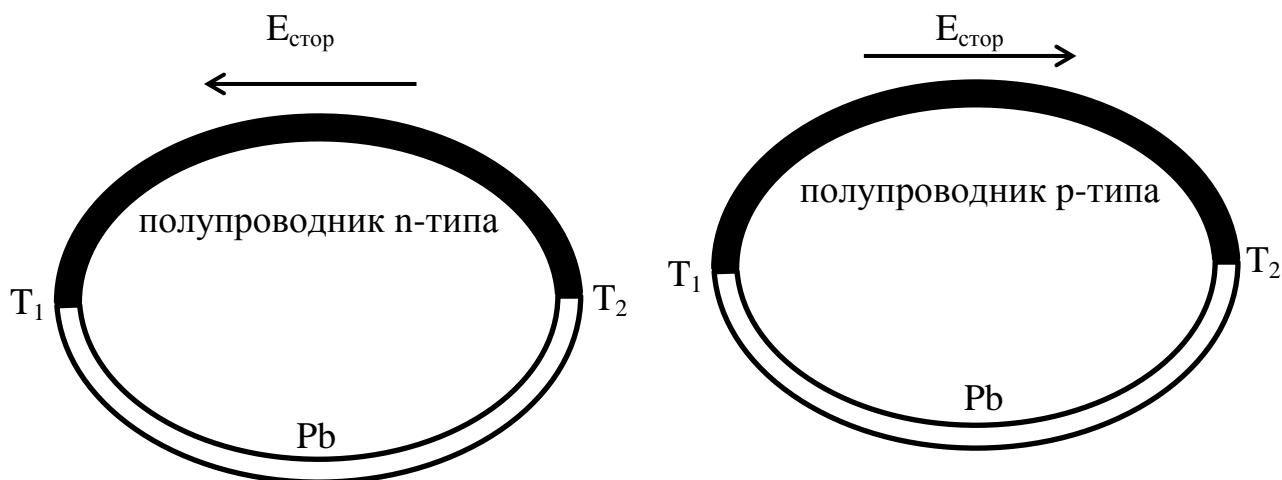


Рис.3. Возникновение термоэлектрического тока в термопаре свинец-полупроводник, для различного типа проводимости. ($T_1 > T_2$)

Эффективность термопары, как генератора ЭДС напрямую связана со степенью влияния температуры на концентрацию носителей заряда в ее составляющих. Для большинства металлов электроны в широком диапазоне температур находятся в состоянии вырождения и их концентрации практически неизменны. Как следствие, коэффициент термоЭДС металлов составляет единицы мкВ/К. Сильное влияние температуры на концентрацию носителей в полупроводниках приводит к значениям α в 1000 мкВ/К и выше.

Для повышения значения термоЭДС отдельные термоэлементы соединяют в батареи. Все четные спаи имеют одну температуру, нечетные – другую (рис. 4), таким образом ЭДС складываются:

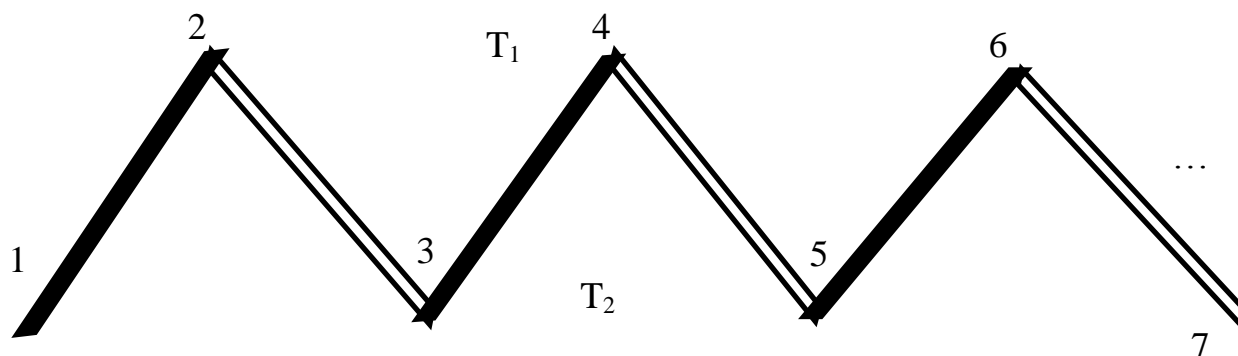


Рис. 4. Соединение термоэлементов в термобатарею

Количество термоэлементов в изготавливаемых промышленным образом полупроводниковых термоэлектрических преобразователях

превышает 100 штук, при этом достигается КПД в 15% и более. Металлические термопары обладают КПД в доли процента, в этой связи они находят применение только в качестве датчиков температуры.

Для измерений с помощью термопар применяют две методики: стабилизации температуры холодного спая и т.н. «технику компенсации холодного спая». Первая предполагает термостатирование одного из двух спаев (рис.5 а), например, посредством погружения в тающий лед ($T_0=273$ К).

Вторая методика проще с точки зрения технической реализации, так как требует лишь фиксации температуры T_0 измерителем (рис.5 б). Однако, затем необходимо вычесть термоЭДС холодного спая из измеренного сигнала.

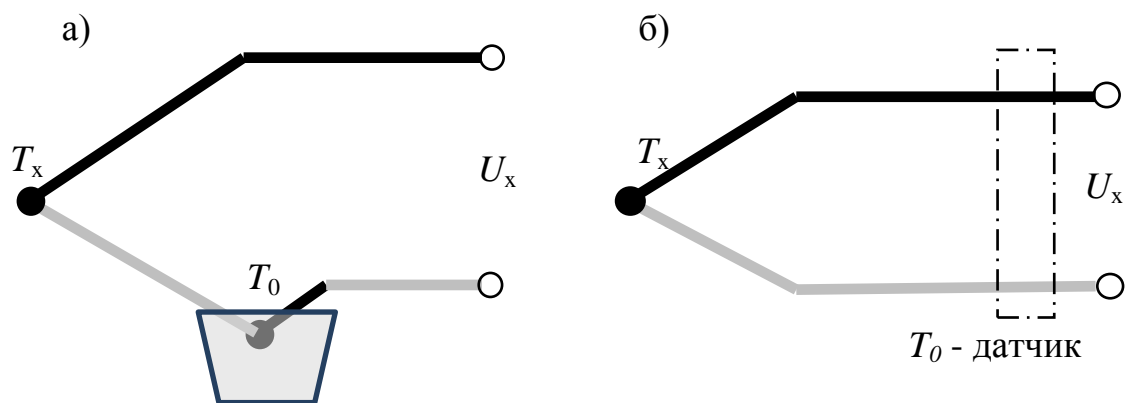


Рис.5. Методы подключения измерительных термопар

Эффект Пельтье

Процесс выделения или поглощения тепла в контактах разнородных проводников при протекании через них изменяющихся по направлению токов впервые пронаблюдал в 1834 г. Жан Пельтье, французский часовщик. Физическую природу явления определил в 1838 г. Эмилий Ленц, российский физик.

Для демонстрации явления применялся т.н. крест Пельтье, представляющий две полоски из сурьмы и висмута (рис. 6). К одной паре концов подключался источник ЭДС, к другой гальванометр. Пропускание электрического тока в одном случае (от сурьмы к висмуту) нагревало спай. Подключение гальванометра позволяло фиксировать термоэлектрический ток в направлении от висмута к сурьме (рис. 6). Изменение полярности

подключения источника меняло направление тока и приводило к охлаждению спая. В этом случае гальванометр фиксировал полярность тока от сурьмы к висмуту.

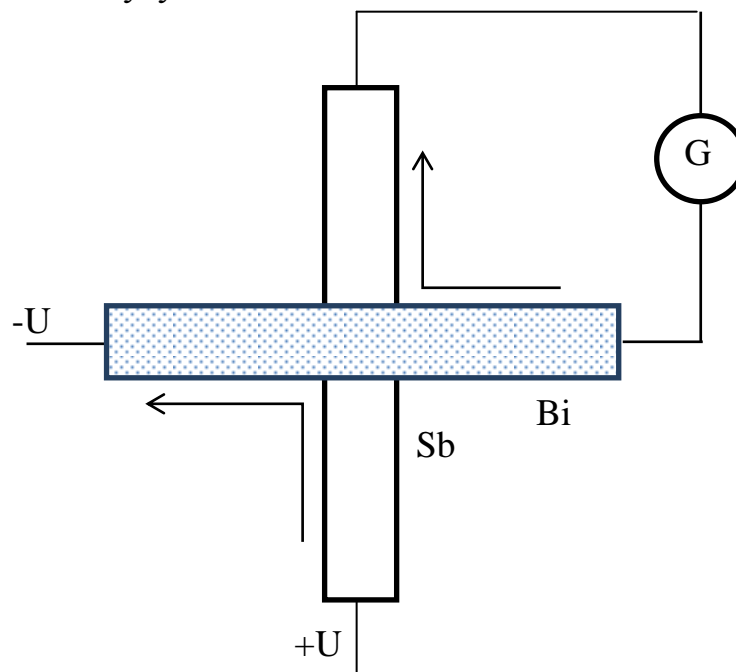


Рис.6. Демонстрация эффекта Пельтье

В 1838 г. Ленц представил более наглядную конфигурацию опыта. В углубление на контакте он помещал каплю воды, которая замерзала при одном направлении тока (полярности напряжения батареи) и плавилась при изменении направления тока.

Дальнейшие экспериментальные исследования показали прямую пропорциональность между теплотой Пельтье и величиной прошедшего через спай заряда:

$$Q_{\text{п}} = \Pi q, \quad (6)$$

где Π – коэффициент Пельтье, зависящий от свойств контактирующих проводников и их температуры.

Следует отметить, что теплота Пельтье аддитивна джоулевой теплоте, которая неизбежно выделяется при протекании тока через проводники с конечным сопротивлением.

Причину возникновения эффекта можно объяснить на примере контакта между электронным и дырочным полупроводниками. Если выбрано направление поля, которое создает ток от p -области к n -области, то движение основных носителей в полупроводниках будет встречным. Электроны из зоны проводимости n -области попадают в валентную зону p -

области. Рекомбинация электрона с дыркой происходит с выделением энергии. Если поменять направление электрического поля, то основные носители зарядов в областях будут расходиться. Для восполнения числа дырок необходимо генерировать новые. Этот процесс в p -области происходит при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости, что, в свою очередь, требует энергию. Соответственно происходит поглощение теплоты.

Термоэлектрические охладители, работающие на данном эффекте, находят широкое применение в компактных устройствах электроники. Основным преимуществом таких устройств является отсутствие подвижных частей, т.е. преобразование энергии осуществляется прямым, безмашинным способом.

Эффект Томсона

Эффект Томсона, в отличие от эффектов Пельтье и Зеебека, был прежде предсказан, лишь затем, после серии экспериментальных попыток, был продемонстрирован в 1956 году. Исходя из термодинамических соображений, Томсон заявил, что в однородном проводнике, если он нагрет неравномерно, при протекании тока происходит дополнительное выделение или поглощение тепла, помимо выделения тепла согласно закону Джоуля-Ленца.

Схема опыта, подтверждающего это явление, а также позволяющая количественно исследовать эффект, предложена Франсуа Леру и представлена на рис. 6.

Концы двух одинаковых стержней термостатируются, при этом температура $T_1 > T_2$. Внешнее напряжение имеет такую полярность, что в одном стержне (верхнем) электрический ток и градиент температуры совпадают по направлению, в другом они противоположно направлены. С помощью дифференциальной термопары фиксируется разность температур в точках а и б. В отсутствии тока температуры безусловно равны.

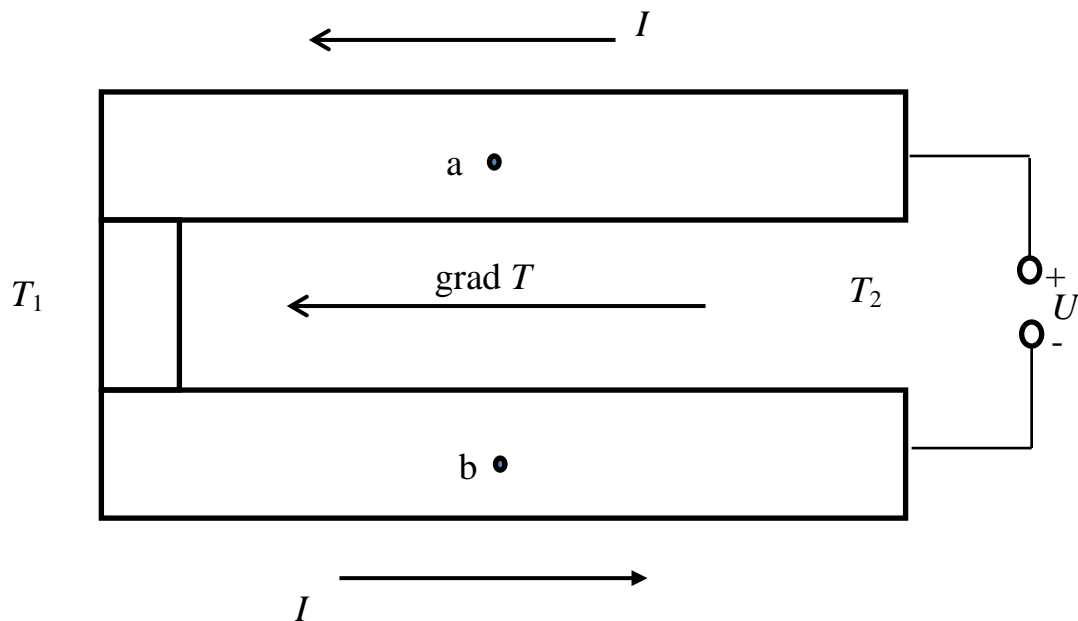


Рис.6 Схема для наблюдения эффекта Томсона

Включение электрического тока приводит к возникновению разности температур точек. Изменение полярности напряжения изменяет направление токов в стержнях, при этом знак разности ΔT_{ab} принимал противоположное значение.

Связь величины теплоты Томсона с величиной тока линейная (ср. с джоулевой теплотой), и выражается формулой:

$$dQ_T = \tau I \frac{dT}{dx} dx \quad (7)$$

Коэффициент Томсона τ зависит от материала стержней и от температуры. За положительный эффект принимается в случае, когда при совпадении направлений тока и градиента температуры выделяется тепло. Это имеет место для сурьмы, железа, платины. Поглощение тепла в подобной конфигурации принято называть отрицательным эффектом, что характерно для висмута, цинка. Следует отметить, что абсолютная величина этого коэффициента для металлов весьма мала, порядка 10^{-5} В/К, что усложняет наблюдение эффекта. В то же время, точные расчеты термоэлектрических устройств обязательно учитывают его наличие. Значение КПД будет зависеть от вклада эффекта в процесс передачи тепловой энергии. Заметим также, что сам по себе эффект Томсона не имеет технического применения.

Рассмотрение термодинамических процессов дает следующее объяснение явлению Томсона.

Пусть в проводнике имеется градиент температуры и ток, направленный в сторону ее возрастания. Следовательно, электроны из области высоких температур переходят в область низких температур. Их энергия уменьшается, таким образом, они передают ее кристаллической решетке, нагревая последнюю. Это позволяет сравнить эффект Томсона с эффектом Пельтье для однородных проводников, неоднородность в которых сформирована градиентом температур.

Томсон, обобщая термодинамический подход, получил два фундаментальных соотношения, связывающих между собой коэффициенты Зеебека, Пельтье и Томсона:

$$\tau = T \frac{\partial \alpha}{\partial T}. \quad (9)$$

Рассмотренный выше эффект Томсона, обсуждался нами для случая однородной изотропной среды. В анизотропных средах, свойства которых зависят от направления, возникает ряд новых эффектов. Их описание требует применение элементов тензорного исчисления, более громоздко и выходит за рамки нашего рассмотрения. Мы лишь приведем названия этих эффектов: *поперечные эффекты Зеебека, Пельтье, Томсона и эффект Бриджмена*. Подробное описание приводится в монографии [2].

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Классические опыты по наблюдению термоэлектрических эффектов были поставлены на твердотельных образцах: металлах, кристаллических полупроводниках. При этом последние, характеризующиеся двумя типами носителей зарядов, особыми электрическими свойствами, позволили от демонстрации явлений перейти к решению задач создания эффективных термоэлектрических преобразователей.

Развитые ранее подходы позволяют описывать термоэлектрические эффекты в любых конденсированных средах, в том числе, жидкостях и плазме. Термоэлектрические эффекты относительно просто пронаблюдать в растворах электролитов. При этом перенос зарядов в них осуществляется, как и в полупроводниках, двумя типами носителей, в данном случае положительными и отрицательными ионами.

Термодиффузионные и термоэлектрические явления в жидких электролитах

В формирование термоэлектрической ЭДС существенный вклад вносят зависящие от температуры диффузионные процессы.

Диффузия ионов в растворах — самопроизвольный процесс перемещения ионов под действием градиента концентрации, характеризующего неравномерность распределения растворенного вещества. Диффузионный потенциал зависит от общей электропроводности электролита и уменьшается с ее ростом, например, в растворах, содержащих фоновый электролит.

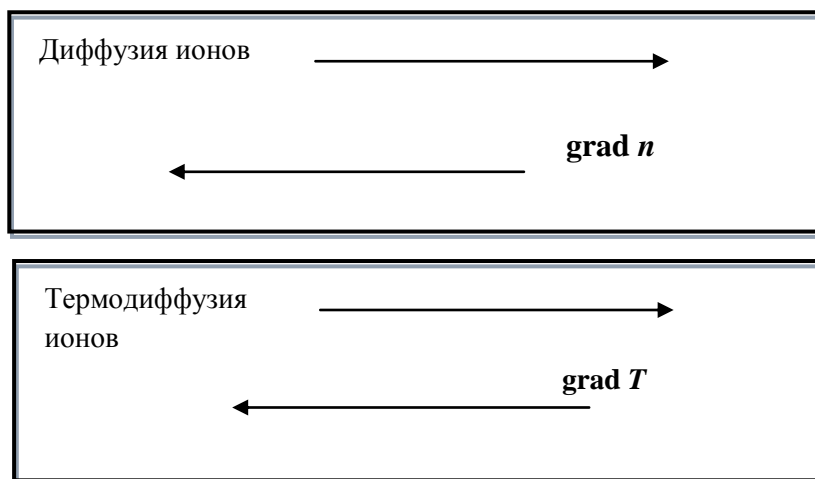


Рис.13. Направление диффузии и термодиффузии ионов в конденсированных средах

В гомогенном (относительно концентрации) растворе электролита, находящемся в температурном поле, благодаря перемещению ионов практически мгновенно возникает внутреннее электрическое поле. Этому электрическому полю соответствует электрический потенциал, который называют термодиффузионным потенциалом, распределению которого соответствует термоэлектрическое поле, напряженность которого E обычно пропорциональна градиенту температуры с коэффициентом пропорциональности, являющимся коэффициентом термоЭДС электролита

$$E = \alpha \text{grad} T. \quad (10)$$

По истечении некоторого времени за счет эффекта термодиффузии в растворе возникает также градиент концентрации, который приводит к появлению потенциала диффузии. Очевидно, эти разности потенциалов термодиффузионная в узком смысле и диффузионная имеют противоположные знаки. Сумма термодиффузионного потенциала (в узком смысле) и диффузионного потенциала называют термодиффузионным потенциалом φ_{th} в широком смысле.

Термоэлектрокинетические явления в жидких электролитах

Термоэлектрокинетический эффект возникает при действии 3-х термодинамических сил, т.е., например, при наличии термоэлектрического и электрокинетического явлений [3]. Если скорость течения жидкости равна нулю – эффект близок к термоэлектрическому, если градиент температуры равен нулю – электрокинетическому. При оптимальных

условиях термоэлектродинамическая и термоэлектрическая ЭДС близки по порядку величины, но по ряду факторов это новый класс явлений.

На основе теории Онзагера [4] можно сделать вывод о существовании класса термоэлектродинамических эффектов:

- перенос массы, обусловленный наличием одновременно градиента температуры и переносом электрического заряда;
- перенос внутренней энергии, обусловленный наличием одновременно переноса массы и переносом электрического заряда;
- перенос электрического заряда, обусловленный одновременно наличием переноса массы и переноса внутренней энергии (наличием градиента температуры).

Установка для измерения термоэлектродинамической ЭДС состоит из U-образной трубки, рис. 14 [4], через которую может протекать электропроводящая жидкость, при наличии вертикального градиента температуры.

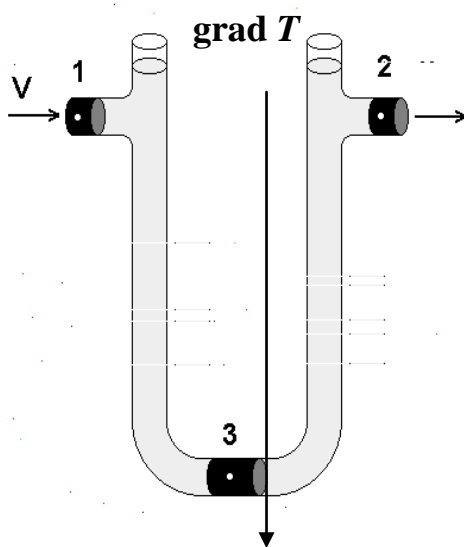


Рис. 14. Схема установки для наблюдения термоэлектродинамического эффекта

Сущность кинетической неоднородности, как это видно из рис.15, заключается в том, что в одном из колен U-образной трубки скорость 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 (рис. 15, а) по течению, а в другом – против течения электропроводящей

жидкости (рис. 15, б). Следует ожидать, что термоэлектродвижущая сила будет наибольшей при наибольшем различии подвижностей положительных и отрицательных ионов электролита [6].

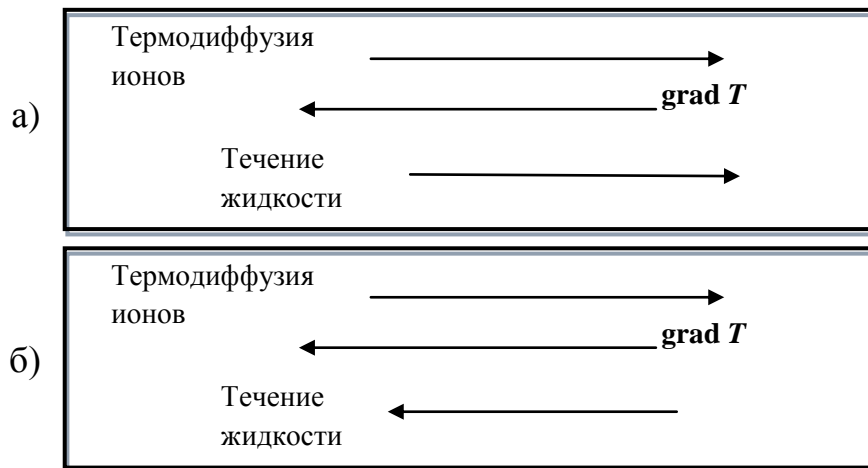


Рис.15. Направления потоков переноса массы, тепла и заряда в левом (а) и правом (б) коленах U-образной трубки

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ

В окружающем нас мире жидкие среды, как правило, представляют собой коллоидные системы. По своему определению такие системы являются гетерогенными и состоят из взвеси или аэрозоля одной фазы в другой. Более общее название таких систем, охватывающее помимо жидкостей, также газы и твердые тела – дисперсные системы. Такие системы состоят из непрерывной фазы или среды, называемой дисперсионной и прерывистой фазы, равномерно распределенной в дисперсионной и называемой дисперсной. Если мы говорим о жидких системах, то это или взвеси мельчайших твердых частиц или мелких пузырьков газа в жидкости [8].

В зависимости от размера взвешенных частиц коллоидные жидкие системы подразделяют на суспензии и коллоидные растворы. К первым относятся грубодисперсные взвеси частицы дисперсной фазы, которой имеют размеры более 1000 нм. Отличительной особенностью таких систем является то, что дисперсные частицы в таких системах можно увидеть в оптический микроскоп. Например, в широко известном явлении броуновского движения броуновские частицы как раз представляют собой дисперсную среду, и поскольку их можно было наблюдать в оптический микроскоп, то данная система представляет собой суспензию. Также отличительной особенностью суспензий является возможность механического разделения двух фаз в поле силы тяжести.

Дисперсные системы, в которых размер частиц менее 1000 нм называются уже коллоидными растворами. Внешне они очень похожи на истинные растворы, и частицы твердой фазы уже невозможно различить в оптический микроскоп, по сравнению с суспензиями они более устойчивы к разделению на две фазы.

Важную роль в устойчивом существовании частиц твердой фазы в коллоидных растворах играет явление адсорбции – избирательного поглощения поверхностью коллоидных частиц ионов одного знака, присутствующих в жидкости. В результате коллоидные частицы заряжаются электрическими зарядами одного знака, что приводит к их электростатическому отталкиванию и препятствует их агрегации.

Существует несколько способов получения коллоидных растворов, однако все их можно подразделить на два пути.

1. Дисперсионный – в этом случае частицы коллоидного размера получают измельчением более крупных частиц. Для этого используют специальные коллоидные мельницы.

2. Конденсационный – противоположный дисперсионному. Частицы дисперсионной фазы получают путем укрупнения частиц истинных растворов (ионов или молекул) до размера коллоидных частиц. Как правило, к данному способу относятся различные химические методы.

Таким образом, поскольку в коллоидных растворах дисперсные частицы имеют заряд одного знака, а дисперсионная среда соответственно другой знак, то в таких растворах наблюдаются различные электрические явления. Например, при приложении электрической разности потенциалов к такой системе будет происходить направленное перемещение заряженных коллоидных частиц и дисперсионной среды в противоположные стороны. Для коллоидной системы, в которой дисперсионная среда является жидкостью, а дисперсные частицы – относятся к твердой фазе, будет наблюдаться направленное перемещение дисперсных частиц в электрическом поле. Данное явление носит название электрофореза и широко применяется в настоящее время.

В конце прошлого века было открыто, что коллоидные растворы имеют рекордные значения коэффициента S_{ore} , который на 2-3 порядка превышает максимальные значения для ионных электролитных систем. При наличии градиента температуры заряженные коллоидные частицы будут испытывать тепловой дрейф, формируя градиент концентрации $\nabla n/n = -s_T \nabla T$, пропорциональный градиенту температуры, где s_T – коэффициент S_{ore} . Неоднородное распределение заряженных частиц в жидкой среде вызовет формирование внутреннего электрического поля $E = \alpha \nabla T$, пропорционального градиенту температуры с коэффициентом пропорциональности α , имеющим смысл коэффициента термоэлектродвижущей силы.

Коэффициенты S_{ore} и термоэлектродвижущей силы заряженных коллоидных частиц зависят от энтропии переноса заряженных коллоидных частиц S_i . Причем абсолютное значение энтропии переноса увеличивается с увеличением размера заряженной частицы, вследствие этого коллоидные растворы обладают рекордными по сравнению с истинными растворами электролитов значениями коэффициента S_{ore} . Так в ряде исследований, наблюдалось интенсивное движение таких коллоидных частиц как

двуокись кремния, молекулы ДНК, полистирольные сферы в неоднородном температурном поле.

Интерес к термоэлектрическим свойствам коллоидных систем обусловлен, прежде всего, перспективами их применения в термоэлектрoхимических генераторах.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная работа №1. Изготовление и градуировка термопары

Цель работы: изучить эффект Зеебека, освоить процедуру изготовления термопары, освоить методику измерений температуры с помощью термопары, определить коэффициент термоЭДС готовой и самостоятельно изготовленной термопар.

Приборы и материалы: готовая термопара, лабораторная печь, сосуд с водой, сосуд с колотым льдом, ртутный термометр, милливольтметр, набор проводов из различных металлов, принадлежности для пайки.

Порядок выполнения работы:

1. Подключите готовую медь-константановую термопару к милливольтметру (рис. 5, б), опустив измерительный спай в воду при комнатной температуре. Зафиксируйте значение температуры.
2. Включите нагреватель.
3. Проведите измерения термоЭДС с определенным шагом, практически не доводя воду до кипения.
4. Постройте градуировочную кривую. Сравните с имеющимися в литературе. Определите коэффициент термоЭДС.
5. Посредством пайки изготовьте термопару из двух предложенных проводов длиной не менее 0,5 м.
6. Соберите схему для градуировки термопары со стабилизацией температуры холодного спая (рис. 5, а), опустив один спай в стакан с колотым льдом, второй в сосуд с нагреваемой водой.
7. Повторите измерения п.п. 3,4.
8. Сравните результаты, полученные по методики компенсации и стабилизации температуры холодного спая.
9. По результатам градуировки определите материалы, выбранных в п. 5 проводников.

Лабораторная работа №2. Изучение эффекта Пельтье

Цель работы: изучить эффект Пельтье, ознакомиться с устройством термоэлектрического модуля Пельтье и принципами его функционирования, освоить методику расчета характеристик модуля, определить коэффициент Пельтье.

Приборы и материалы: элементы Пельтье промышленного и лабораторного изготовления, регулируемый источник ЭДС, амперметр, ограничительное сопротивление, термопара (тепловизор).

Методика и техника измерений:

В качестве исследуемых применены термоэлектрический модуль, изготовленный в лаборатории кафедры физики СПбГУТиД [5] и серийно изготовленные модули ТЕС-12704/12706 различной мощности.

При пропускании тока через модуль в «горячей» и «холодной» частях будет выделяться джоулево тепло и тепло, обусловленное эффектом Пельтье:

$$Q_h = Q_{Дж} + Q_{П}, \quad Q_c = Q_{Дж} - Q_{П} \quad (11)$$

при этом величина $Q_{Дж}$ пропорциональна квадрату тока и всегда положительно, а $Q_{П}$ линейно зависит от него и изменяет знак при изменении направления тока.

В случае теплового равновесия в установившемся режиме джоулево тепло одинаково для обеих частей и разность температур определяется только теплом Пельтье. Оно в свою очередь пропорционально числу спаев в термоэлектрическом модуле n (в исследуемых устройствах – 127 шт.):

$$Q_{П} = n \cdot \Pi \cdot I. \quad (12)$$

Если оснастить одну из поверхностей модуля радиатором с интенсивным воздушным охлаждением, то температуру этой поверхности можно принять равной комнатной T_0 . Между второй поверхностью и окружающей средой возникает разность температур ΔT и происходит теплообмен за счет теплопроводности и в установившемся режиме уравнение теплового баланса примет вид:

$$\lambda \Delta T = (RI^2)/2 - \Pi I. \quad (13)$$

где λ – коэффициент теплопроводности. Джоулево тепло распределяется поровну между поверхностями, т.о. в (13) имеем деление на 2.

Величину ΔT в работе предлагается измерять непосредственно тепловизором, либо с помощью термопары с известными

характеристиками (линейными для небольшого интервала измеряемых температур):

$$U = \alpha \Delta T. \quad (14)$$

Подставляя (13) в (14) получаем для напряжения термопары:

$$U = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{RI^2}{2} - \Pi I \right), \quad (15)$$

т.е. измеряемая величина ΔT выражается квадратичной функцией тока $\Delta T(I) = AI^2 + BI$.

Зависимость (15), построенная экспериментально, позволяет отыскать значение искомого коэффициента Пельтье Π посредством аппроксимации параболической зависимостью на ПЭВМ.

Порядок выполнения работы:

1. Подключите исследуемый модуль к источнику питания через ограничительное сопротивление. Включите вентилятор.
2. Увеличивайте ток через модуль от нуля с шагом 0,2 А. После каждого изменения тока дождитесь установления теплового равновесия (не менее 1 мин) и фиксируйте значение напряжения термопары.
3. Доведя значение тока до максимально разрешенного (в паспорте к модулю), повторите измерения при противоположной полярности включения модуля.
4. Постройте зависимость $\Delta T(I)$ с помощью пакета для численного анализа на ПЭВМ. Получите значение коэффициента Пельтье.
5. Повторить п.п. 1-4 на следующем элементе Пельтье. Сравнить полученные результаты.

Лабораторная работа №3. Использование термоэлектрического генератора для измерения тепловой мощности

Цель работы: изучить устройство термоэлектрического генератора, освоить методику измерений слабых тепловых потоков.

Приборы и материалы: элементы Пельтье промышленного или лабораторного изготовления, нагрузочное сопротивление, вольтметр.

Методика и техника измерений:

В качестве исследуемых применены термоэлектрический модуль, изготовленный в лаборатории кафедры физики СПбГУТиД [5] и серийно изготовленные модули ТЕС-12704/12706 различной мощности.

Одна из пластин (нижняя) находится на массивном радиаторе, т.о. ее температура практически равна комнатной. При создании разности температур на поверхностях термоэлектрического генератора (ТЭГ), в нем возникает ЭДС, пропорциональная ΔT :

$$U_1 = \alpha \Delta T = \alpha(T_1 - T_2) \quad (16)$$

Для исследуемого элемента $\alpha = 10^{-3} \text{ В/К}$, что позволяет вычислить возникающую разность температур.

Схема измерений в режиме холостого хода и в режиме согласованной нагрузки $R=r$ приведена на рисунке:

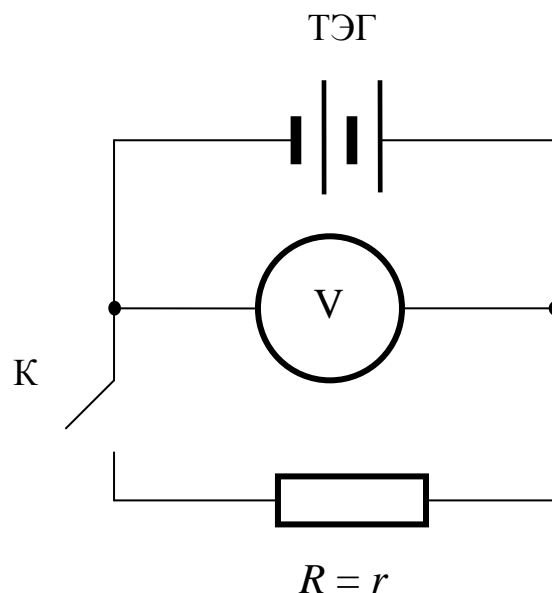


Рис. 16. Схема включения ТЭГ, R – сопротивление нагрузки, r – внутреннее сопротивление ТЭГ.

Величина КПД генератора определяется по формуле [1] и для малых разностей температур не превышает 10^{-2} :

$$\eta = \frac{\Delta T}{4T_1} Z_0 \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{U_1/\alpha}{4(T_2 + U_1/\alpha)} Z_0 \frac{(2T_2 + U_1/\alpha)}{2}, \quad (17)$$

где Z_0 – термоэлектрическая добротность полупроводникового материала для данного диапазона температур ($Z_0=10^{-3} \text{ К}^{-1}$), T_2 – комнатная температура (температура холодильника), T_1 – температура нагревателя.

Замыкание ключа К переводит генератор в режим согласованной нагрузки: $R = r$, (для исследуемого ТЭГ $R = 3 \text{ Ом}$). Полезная мощность выражается через показания вольтметра:

$$P = \frac{U_2^2}{R}. \quad (18)$$

Зная КПД, можно оценить полную мощность, производимую за счет теплоотдачи:

$$P_n = \frac{2P}{\eta} = \frac{2U_2^2}{R \cdot \eta}. \quad (19)$$

Подставляя (17) в (19), получаем:

$$P_n = \frac{16 \cdot U_2^2 \cdot \alpha (T_2 + \frac{U_1}{\alpha})}{R \cdot U_1 \cdot Z (2 \cdot T_2 + \frac{U_1}{\alpha})}. \quad (20)$$

Порядок выполнения работы:

1. Измерить температуру T_2 в лаборатории. (Примем ее за температуру радиатора, на котором установлен ТЭГ).
2. При разомкнутом ключе, касаясь поверхности генератора пальцем, измерить U_1 . Повторить измерения несколько раз, дожидаясь остывания поверхности. (Касания осуществлять осторожно, чтобы не допустить механических повреждений ТЭГ).
3. Определить значение температуры человеческого тела (пальца).
4. Повторить измерения п. 2 для замкнутого ключа, измеряя значения U_2 .
5. Определить полезную мощность ТЭГ.
6. Измерив площадь чувствительной площадки, определить величину измеренного теплового потока.

7. Принимая человека за абсолютно черное тело площадью порядка 1 м^2 , по закону Стефана-Больцмана оценить тепловой поток от поверхности пальца. Сравнить с п.6.

Лабораторная работа №4. Измерение коэффициента термоЭДС в водных растворах электролитов

Цель работы: изучить термоэлектрический эффект в электролитах, освоить методику измерений коэффициента термоЭДС в водных растворах электролитов, определить коэффициент термоЭДС.

Приборы и материалы: U-образная трубка, нагреватель, источник питания, микровольтметр с подключением к РС, терморезистор, бесконтактный термометр, электроды (металлические или хлорсеребряные [7]), дистиллированная вода, электролиты.

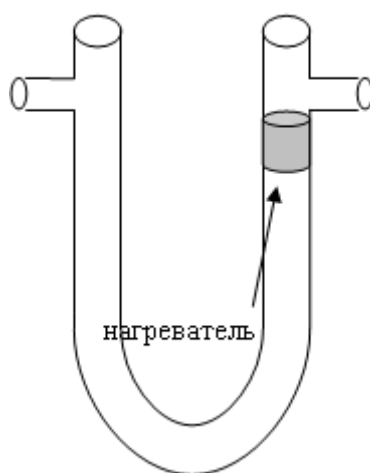


Рис.17. Положение нагревателя на U-образной трубке

Методика и техника измерений:

1. Заполнить U-образную трубку раствором электролита, поместить ее в песочную баню. Установить в открытые концы электроды.
2. Подать напряжение на нагреватель, находящийся на колене U-образной трубки ($U = 5 \text{ В}$, $I = 0,5 \text{ А}$).
3. Измерять напряжение с помощью микровольтметра и разности температур с помощью терморезистора и бесконтактного термометра.
4. Построить график зависимости термоЭДС от величины разности температур $E = f(\Delta T)$.
5. Используя график вычислить коэффициент термоЭДС для данного раствора.

Лабораторная работа №5. Термоэлектрокинетический эффект в вязких электропроводящих средах

Цель работы: изучить термоэлектрокинетический эффект в электролитах, освоить методику измерений коэффициента термоэлектрокинетической ЭДС в водных растворах электролитов, определить значение термоэлектрокинетической ЭДС для различных концентраций ионов электролита.

Приборы и материалы: U-образная трубка, нагреватель, источник питания, микровольтметр с подключением к ПЭВМ, перистальтический насос, терморезистор, бесконтактный термометр, электроды (металлические или хлорсеребряные [7]), дистиллированная вода, электролиты.

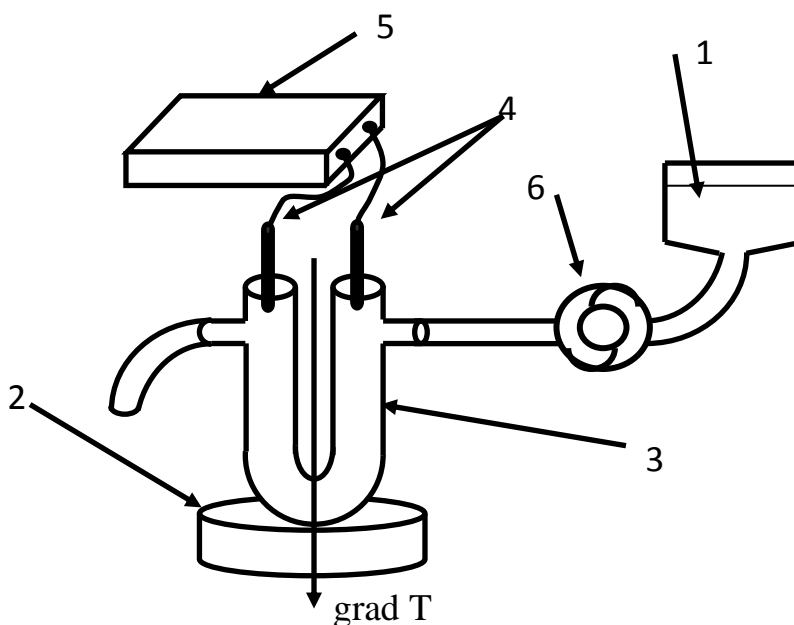


Рис.18. Схема установки для измерения термоэлектрокинетической ЭДС.
1-электролит, 2-нагреватель, 3-U-образная трубка, 4-электроды, 5-
электроизмерительный прибор, 6 – перистальтический насос.

Методика и техника измерений:

1. Заполнить U-образную трубку раствором электролита, поместить ее в песочную баню. Установить в открытые концы электроды.
2. Произвести измерение напряжения между электродами в случае термодинамического равновесия, чтобы оценить величину электрохимической ЭДС (фоновой ЭДС).

3. Установить стационарный градиент температуры между областью изгиба и концами U-образной трубки.
4. Установить определенную скорость протекания электролита
5. Произвести минимизацию разности температур на входе и выходе U-образной трубки с помощью дополнительного нагревателя.
6. Получить величину термоэлектрокинетической ЭДС в данных условиях эксперимента вычитанием фоновой ЭДС из установившегося стационарного сигнала.

Лабораторная работа № 6. Термоэлектрический эффект в коллоидных растворах.

Цель работы: изучить термоэлектрокинетический эффект в заряженных коллоидных растворах, освоить методику приготовления водных коллоидных растворов, определить значение термоэлектрической ЭДС для различных концентраций дисперсных частиц.

Приборы и материалы: U-образная трубка, нагреватель, источник питания, микровольтметр с подключением к ПЭВМ, терморезистор, электроды (металлические или хлорсеребряные [7]), дистиллированная вода, химические реактивы, электрическая плитка.

Методика и техника измерений:

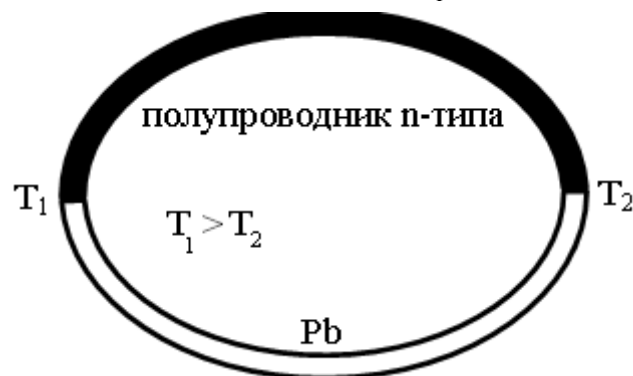
1. Получить гидрофобный коллоидный раствор гидроокиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Для этого в химическом стакане на электроплитке доведите до кипения 200 мл дистиллированной воды. Затем в кипящую воду по каплям добавьте 20 мл предварительно подготовленного 2-х % - го раствора хлорного железа FeCl_3 . В результате реакции гидролиза и последующей адсорбции, образующиеся в растворе молекулы $\text{Fe}(\text{OH})_3$ захватывают ионы FeO^+ и заряжаются положительно.
2. Заполнить U-образную трубку предварительно охлажденным коллоидным раствором гидроокиси железа (III), поместить ее в песочную баню. Установить в открытые концы электроды.
3. Подать напряжение на нагреватель, находящийся на колене U-образной трубки ($U = 5 \text{ В}$, $I = 0,5 \text{ А}$).
4. Измерять напряжение с помощью микровольтметра и разности температур с помощью терморезистора и бесконтактного термометра.
5. Построить график зависимости термоЭДС от величины разности температур $E = f(\Delta T)$.
6. Используя график вычислить коэффициент термоЭДС для данного раствора.
7. Разбавить оставшийся коллоидный раствор в соотношении 1 к 3 и 1 к 6 дистиллированной водой и повторить шаги 2-6.
8. Построить график зависимости величины термоэлектрической ЭДС от концентрации коллоидного раствора.

КОНТРОЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

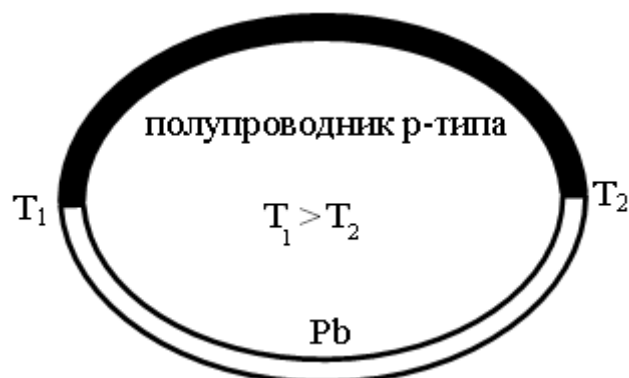
Вопросы к лабораторному практикуму

1. Что такое контактная разность потенциалов?
2. При контакте *Al* и *Cu* какой металл зарядится положительно?
3. Для какой пары металлов контактная разность потенциалов будет больше?
а) *Al-Sn* или *Al-Bi* б) *Cu-Zn* или *Pb-Fe* в) *Hg-Fe* или *Zn-Au* г) *Bi-Fe* или *Zn-Ag*
4. Какова физическая причина возникновения контактной разности потенциалов при соприкосновении металлов?
5. Если привести в контакт два гипотетических металла с одинаковой концентрацией свободных электронов, возникнет ли между ними контактная разность потенциалов?
6. Что произойдет с энергиями Ферми двух проводников при их контакте?
7. Как контактная разность потенциалов связана с работами выхода контактирующих металлов?
8. Пусть при соприкосновении тел *A* и *B* тело *A* зарядилось положительно. У какого из тел работа выхода больше и почему?
9. В чем отличие внешней и внутренней контактных разностей потенциалов?
10. Возникнет ли ток за счет контактной разности потенциалов в замкнутом проводнике, состоящем из двух различных проводников при условии, что температура их спаев одинакова?
11. Заряд, какого знака будет иметь при контакте металл, имеющий большую концентрацию свободных электронов?
12. Чем обусловлено отклонение магнитной стрелки в классическом опыте Зеебека?
13. Почему коэффициент термоЭДС свинца мал?
14. Каково среднее значение КПД типичных термогенераторов?
15. При использовании термопар для измерения температур основной измеряемой величиной является электрический ток или разность потенциалов?
16. Какой заряд будет иметь горячая часть однородного электронного полупроводника по отношению к более холодной части? Почему?

17. При измерении температуры предпочтительно выбирать термопару с большей или меньшей удельной термоЭДС?
18. Чем определяется нижний и верхний предел измеряемых температур с помощью термопар?
19. Какие требования предъявляются к материалам для изготовления термопар?
20. Какие типы стандартных термоэлектрических преобразователей известны? Каков диапазон измеряемых температур для каждого типа термоэлектрических преобразователей?
21. Какой заряд будет иметь горячая часть однородного дырочного полупроводника по отношению к более холодной части? Почему?
22. Что такое коэффициент термоэлектродвижущей силы?
23. Как определяется коэффициент дифференциальной термоЭДС для пары металлов или полупроводников?
24. Как будет направлен термоэлектрический ток на рисунке? Какой заряд будет иметь спай с температурой T_1 ?



25. Как будет направлен термоэлектрический ток на рисунке? Какой заряд будет иметь спай с температурой T_1 ?



26. Какое значение по порядку величины имеет коэффициент термоЭДС металлов?

27. Для чего в методе «стабилизации температуры холодного спая» один из спаев термопары опускается в сосуд с тающим льдом?
28. Из представленных термопар определите, какую используют в методе «стабилизации температуры холодного спая», а какую в методе «компенсации холодного спая»?
29. С какой целью проводят градуировку термопары?
30. Как практически можно проградуировать термопару в интервале температур 77 К – 300 К?
31. Термопары, составленные из каких материалов, чаще всего используют для измерения температуры? Перечислите наиболее распространенные.
32. В чем состоит явление Пельтье?
33. Опишите и объясните опыт с крестом Пельтье.
34. Ток, текущий через крест Пельтье увеличился в два раза, во сколько раз изменилось тепло Джоуля, тепло Пельтье?
35. В чем разница между джоулевым теплом и теплом Пельтье?
36. На контакт из двух полупроводников n и p типа подано напряжение, создающее ток, направленный от полупроводника n -типа к полупроводнику p -типа. Что будет происходить с этим спаем? Почему?
37. Каков типичный КПД полупроводниковых модулей Пельтье?
38. В каких областях используются термоэлектрические охладители? В чем их преимущества и недостатки?
39. В чем состоит явление Томпсона?
40. Почему экспериментальное подтверждение эффекта Томпсона удалось не сразу?
41. В чем разница между теплом Томпсона и теплом Джоуля?
42. Для того чтобы в опыте для наблюдения эффекта Томпсона увеличить разность температур между идентичными точками двух стержней, демонстрирующую выделение тепла Томпсона, лучше увеличить ток или увеличить градиент температур?
43. В чем состоит разница между положительным и отрицательным эффектом Томпсона?
44. Может ли создаваться разность потенциалов в однородном проводнике, имеющего в разных точках различную температуру? Ответ обосновать.

45. Как связаны между собой коэффициенты Зеебека, Пельтье и Томпсона?
46. По справочным данным для коэффициентов Зеебека и Пельтье висмута оцените его коэффициент Томпсона.
47. Зависит ли выделение джоулева тепла от направления тока, зависит ли тепло Пельтье от направления тока?
48. Для чего в термоэлектрических охладителях используют множество спаев? Изобразите схему термоэлектрического охладителя.
49. Для чего в работе одну из поверхностей модуля оснащают радиатором с интенсивным охлаждением?
50. Зачем в работе после каждого увеличения тока следует ожидать некоторое время, прежде чем фиксировать напряжение на термопаре?
51. Для чего в работе используется ограничительное сопротивление?
52. Как в работе определяется коэффициент Пельтье?
53. Оцените напряжение, регистрируемое медь-константановой термопарой, если зажать один из спаев пальцами руки, другой спай находится при комнатной температуре $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
54. От каких физических величин зависит напряжение вырабатываемое ТЭГ?
55. Оцените напряжение, вырабатываемое ТЭГ, представленным в работе, при прикосновении человека пальцем к его поверхности, если комнатная температура равна $19\text{ }^{\circ}\text{C}$.
56. Приведите принципиальную электрическую схему исследования ТЭГ, используемую в работе.
57. Оцените КПД ТЭГ, представленного в работе для условий из вопроса 2.
58. Почему в работе нельзя производить измерения напряжения ТЭГ U_1 без перерывов?
59. Чем отличаются измерения в режиме холостого хода и в режиме согласованной нагрузки?
60. Как определяется полезная мощность ТЭГ?
61. Что такое процесс диффузии? Приведите уравнения Фика, описывающие процесс диффузии и поясните его смысл.
62. Объясните причину возникновения диффузионной разности потенциалов в растворах электролитов, от каких характеристик электролита зависит величина диффузионной разности потенциалов?

63. В сосуде с водным раствором гидроксида натрия имеется градиент концентрации, в какую сторону будет направлен диффузионный поток электролита по отношению к градиенту концентрации? Какой заряд будет иметь область электролита с меньшим содержанием растворенного вещества по сравнению с областью, содержащей большее количество?
64. В чем заключается процесс термодиффузии в растворах электролитов?
65. В сосуде нагревают раствор гидроксида калия, какой заряд будет иметь нагретая часть электролита по сравнению с более холодной?
66. В какую сторону направлен термодиффузионный поток электролита по отношению к градиенту температуры?
67. Что называют термодиффузионной разностью потенциалов в широком смысле и в узком смысле?
68. Какой порядок имеют коэффициенты термоЭДС растворов электролитов?
69. Что называют коэффициентом Соре и коэффициентом термодиффузии? Поясните физический смысл этих величин.
70. В чем заключается термоэлектрокинетический эффект? Перечислите все термодинамические силы, которые его формируют.
71. Что такое феноменологические соотношения в термодинамике необратимых процессов? Приведите примеры.
72. В чем заключается сущность соотношений взаимности Онзагера?
73. Приведите примеры других перекрестных эффектов, возможных в растворах электролитов и в твердых телах.
74. В чем заключается сущность кинетической неоднородности формирующей термоэлектрокинетический эффект в рассматриваемой установке с U-образной трубкой?
75. Водный раствор электролита вытекает из трубки диаметром 0,5 см. Объемный расход электролита равен 6 мл/мин, считая, что плотность раствора равна плотности чистой воды, вычислите линейную скорость электролита в мм/мин.
76. Какие единицы концентрации используются в физической химии растворов? Приведите формулы, связывающие их между собой.
77. Необходимо приготовить водный раствор хлористого калия концентрацией 0,1 моль/литр. Сколько грамм хлористого калия и воды надо взять, чтобы приготовить раствор такой концентрации?

78. Используя справочные данные, оцените диффузионную разность потенциалов в растворе соляной кислоты средней концентрацией 0,2 моль/л при температуре 27° С, если разность концентраций электролита равна 0,01 моль.
79. Почему в работе необходимо использовать дистиллированную воду?
80. Опишите методику измерения коэффициента термоЭДС раствора электролита.
81. Как в работе производится измерение температуры?
82. Будут ли отличаться значения измеренного в работе коэффициента термоЭДС, если использовать электроды, изготовленные из разных материалов? Почему?
83. Опишите методику вычисления коэффициента термоЭДС раствора электролита по графику зависимости $E = f(\Delta T)$.
84. Как в работе создается поток электролита?
85. Будут ли отличаться значения измеренного в работе коэффициента термоэлектрокинетической ЭДС, если использовать электроды, изготовленные из разных материалов? Почему?
86. Как в работе производится контроль скорости течения электролита.
87. Опишите последовательность проведения эксперимента по измерению коэффициента термоэлектрокинетической ЭДС.
88. Как будет зависеть коэффициент термоэлектрокинетической ЭДС от скорости электролита? Ответ поясните.
89. Как будет зависеть коэффициент термоэлектрокинетической ЭДС от разности температур? Ответ поясните.
90. Зачем в работе нужно контролировать разность температур между коленами U-образной трубки? Чему должна в идеале равняться эта разность температур?
91. Дайте определение дисперсных систем.
92. Приведите примеры коллоидных систем в окружающей среде.
93. В чем отличие суспензии от коллоидного раствора?
94. Запишите уравнения химических реакций, происходящих при образовании коллоидного раствора гидроксида железа (III).
95. Что называют диффузным слоем коллоидной частицы?
96. Почему если суммарный заряд мицеллы в коллоидном растворе равен нулю, коллоидные частицы движутся в электрическом поле?
97. В чем состоит явление электрофореза и электроосмоса?

98. Опишите характер движения коллоидных частиц в растворе при наличии температурного градиента.
99. Охарактеризуйте основные методы получения коллоидных растворов.
100. Какую роль играет двойной электрический слой в электрических явлениях, происходящих в дисперсных системах?
101. Какова причина аномально высоких значений теплоты переноса коллоидных частиц?
102. Чем определяется знак термоэлектрической разности потенциалов в коллоидных растворах?

Задачи

1. Термопара висмут-железо с постоянной $C = 92 \cdot 10^{-6}$ В/°С и сопротивлением $r = 5$ Ом присоединена к гальванометру с внутренним сопротивлением $R = 110$ Ом. Какой ток покажет гальванометр, если один спай термопары погрузить в пар кипящей под нормальным давлением воды, а другой — в тающий лед?

2. Какова постоянная C термопары висмут-теллур, если при подключении ее к гальванометру с внутренним сопротивлением $R = 100$ Ом и чувствительностью на одно деление 10^{-5} А, минимальная разность температур, которую можно измерить, $\Delta T = 2 \cdot 10^{-3}$ °С? Сопротивлением термопары пренебречь.

3. Для определения температуры печи в нее вставлена термопара никель-нихром с постоянной $C = 0,5 \cdot 10^{-6}$ В/°С, присоединенная к гальванометру с внутренним сопротивлением $R = 2000$ Ом и с чувствительностью на одно деление 10^{-5} А. При температуре второго спая $T_2 = +15$ °С гальванометр дает отклонение $b = 25$ делений. Чему равна температура T_1 печи?

4. Два различных металла находятся в соприкосновении. Давление электронного газа в первом металле p_1 и работа выхода электрона из этого металла A_1 давление электронного газа во втором металле p_2 и работа выхода электрона из него A_2 . Найти контактную разность потенциалов, если температура обоих металлов T .

5. Из указанных металлов (см. задачу 4) составлена термопара с двумя спаями, находящимися при температурах T_1 и T_2 . Найти термоэлектродвижущую силу.

Указание. Давление p электронного газа в металле связано с концентрацией n электронов и температурой T металла соотношением $p = nkT$, где k — постоянная Больцмана.

6. Имеются два металла с концентрацией свободных электронов $n_1 = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ и $n_2 = 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Определить внутреннюю контактную разность потенциалов, возникающую при приведении этих металлов в соприкосновение.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2006. Т. III. Электричество. 656 с.
2. Анатычук Л.И. Физика термоэлектричества. Черновцы: Институт термоэлектричества, 2008. Т. I. 388 с.
3. Грабов В.М. Термоэлектрические явления в существенно неравновесных термодинамических условиях // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. № 6(9). 2003. С. 104-113.
4. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. М.: Мир, 1967. 544с.
5. Пат. 2431122 РФ, Способ измерения энергии излучения объекта/ Иванов К.Г., Гальхаупт М., Гальхаупт А., Иванов Д.К. // Бюл. 2011. № 28.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 408с.
7. Байрамов В.М. Основы электрохимии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2005. 240с.
8. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1974. 512 с.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ.....	5
Контактные явления.....	5
Эффект Зеебека.....	6
Эффект Пельтье.....	10
Эффект Томпсона.....	12
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРО- ЛИТОВ.....	15
Термодиффузионные и термоэлектрические явления в жидких электролитах.....	15
Термоэлектрокинетические явления в жидких электролитах.....	16
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМАХ.....	19
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	22
Лабораторная работа №1. Изготовление и градуировка термопары.....	22
Лабораторная работа № 2. Изучение эффекта Пельтье.....	23
Лабораторная работа №3. Использование термоэлектрического генера- тора для измерения тепловой мощности	25
Лабораторная работа № 4 Измерение коэффициента термоЭДС в водных растворах электролитов.....	28
Лабораторная работа №5. Термоэлектрокинетический эффект в вязких электропроводящих средах.....	29
Лабораторная работа № 6. Термоэлектрический эффект в коллоидных растворах.....	31
КОНТРОЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	32
Вопросы к лабораторному практикуму.....	32
Задачи.....	39
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	40

Учебно-методическое издание

**Андрей Анатольевич Зайцев,
Денис Владимирович Кузнецов,
Александр Валентинович Сидоров**

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

**Учебно-методическое
пособие**

*Техническое исполнение - В. М. Гришин
Печатается в авторской редакции*

Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.
Печ.л. 2,6. Уч.-изд.л. 2,4
Тираж 300 экз. (1-й завод 1-5 экз.). Заказ 9

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1