

ЭЛЕКТРОНЫ И ЗЕМНАЯ ЦИВИЛИЗАЦИЯ

З науково-технічних та історичних позицій показано фундаментальну роль елементарних носіїв електричного заряду – електронів в утворенні і розвитку земної цивілізації.

С научно-технических и исторических позиций показана фундаментальная роль элементарных носителей электрического заряда – электронов в образовании и развитии земной цивилизации.

ВВЕДЕНИЕ

Все мы прекрасно понимаем важную и определяющую роль представителей микромира для нашего макромира. Все свойства и физические проявления любого вещества определяются его внутренним микроустройством, где "верховенствуют" волновые свойства огромного числа микрочастиц и "царят" вероятностные события, описываемые законами квантовой физики. Одними из важнейших представителей таких микрочастиц для земного мира оказались электроны. Согласно [1] термин "электрон" происходит от древнегреческого слова "ēlektron", корень которого "ēlektēr" обозначает "янтарь", то есть физическое тело "смоляной" природы, которое обладает свойством электризации и способностью выработки при соответствующем внешнем силовом воздействии на него на своей поверхности электрического заряда. То, что такой заряд является отрицательным, человечество узнало сравнительно недавно – только в 19-ом столетии после открытия в 1897 году выдающимся английским физиком Джозефом Томсоном рассматриваемой нами элементарной частицы вещества – электрона [2, 3]. Интересно отметить, что открыт электрон был при экспериментальном исследовании прохождения катодных лучей (электричества) через разряженные газы в стеклянных откакумированных электроразрядных трубках. За данное исследование и открытие Дж. Томсон в 1906 году был удостоен Нобелевской премии по физике. Этому определению рода заряда электрона поспособствовала и разработка в данный период основоположниками электричества физически верной теории электризации тел [3, 4]. Первоначально в первой половине 18-го века такое, как мы теперь знаем, отрицательное электричество, порождаемое "янтарем", ученые называли "смоляным", а положительное электричество, снимаемое с наэлектризованных стеклянных тел, – "стеклянным" [4].

Введение во второй половине 18-го столетия выдающимся американским физиком-самородком Бенджаминном Франклином в физику таких научных понятий как положительное (+) и отрицательное электричество (–) позволило людям облегчить свое восприятие электрически заряженных тел. Однако эти научные абстракции никак не способствовали раскрытию глубинных физических знаний об электрическом заряде, создающем вокруг себя такой вид физического поля как "электрическое поле". Именно через наличие данного электрического поля и проявляется электрический заряд микрочастицы или макрообъекта. Согласно [1] в современной физике под термином "элек-

трический заряд" понимается физическая величина, характеризующая силу взаимодействия элементарных частиц вещества и их систем с электромагнитным и, в частности, с электрическим полем. Истинность природных фундаментальных процессов, лежащих в основе формирования и появления в веществе электрического заряда, человечеству еще только предстоит узнать. Видимо, определенную ясность в данный фундаментальный вопрос должны внести будущие научные успехи человечества в области квантовой электродинамики, физики высоких энергий, ядерной физики и физики элементарных частиц.

Важно заметить, что величина электрического заряда электрона с точностью измерений до 1% была экспериментально установлена лишь в 1917 году выдающимся американским физиком Робертом Милликемом. Для этого потребовались годы кропотливой работы и оригинальные разработки (например, метода "милликемского конденсатора") [3, 4]. Эта величина оказалась равной элементарному электрическому заряду – своего рода "кванту электричества", составляющему согласно современным уточненным измерениям $e_0=1,602\cdot 10^{-19}$ Кл [2, 5]. О значимости этого результата говорит тот факт, что за данное научное исследование Р.Э. Милликену в 1923 году была присуждена Нобелевская премия по физике. В настоящее время факт существования в природе такого "атома электричества" считается твердо установленным. Гипотеза наличия в природе "кварков" – элементарных частиц с дробным по отношению к величине e_0 зарядом, до сих пор экспериментально не подтверждена.

Укажем и то, что на сегодня, несмотря на колоссальные усилия физиков всего мира, размеры электрона пока точно не установлены [4]. Для случая приближения электрона в виде элементарной частицы – корпускулы сферической формы за его радиус r_e принимается величина, вытекающая из представлений классической электродинамики и примерно равная $r_e = \mu_0 e_0^2 / (4\pi m_e) = 2,818 \cdot 10^{-15}$ м, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, а $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона [5, 6].

Изложению и определенной систематизации известных электрофизических фактов, проливающих свет на фундаментальную роль электронов в формировании и развитии нашей земной цивилизации, и посвящена данная статья, относящаяся, по мнению самого автора, к научно-популярной публицистике.

1. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СТРОЕНИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ВЕЩЕСТВА

Атом (молекула) является наименьшей частицей вещества, обладающей химическими свойствами того или иного химического элемента [2, 5]. В соответствии с основными упрощенными моделями устройства атома вещества, приближенно описывающими его состояние (физическое поведение) и предложенными в свое время выдающимся английским физиком Эрнстом Резерфордом (ядерно-планетарная модель атома, 1913 год) и выдающимся датским физиком Нильсом Бором (планетарно-квантовая модель атома, 1913 год), а также согласно современной уточненной квантовомеханической модели устройства атома любого вещества все атомы и образуемые ими молекулы в своем составе содержат размещенное в центральной области атомов положительно заряженное ядро с величиной заряда $e_0 \cdot Z$ (Z – порядковый номер атома в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева), вокруг которого на некотором расстоянии в вакууме расположена отрицательно заряженная электронная оболочка сложной пространственной конфигурации с модулем заряда, также равным $e_0 \cdot Z$ [3, 5]. В этой связи невозбужденный уединенный атом вещества является устойчивым электронейтральным материальным образованием. Вся атомная масса такого образования заключена практически в его ядре, обладающем массовым числом A и содержащем такие известные нам элементарные частицы как протоны p_e и нейтроны n_e . Напомним, что масса протона составляет $m_p = 1836 m_e$, а близкая ему масса нейтрона – $m_n = 1839 m_e$ [2, 5]. Число протонов p_e в ядре атома точно равно его атомному порядковому номеру Z , а число нейтронов n_e в нем всегда составляет величину, равную $N = A - Z$. Поэтому в основе систематики известных землянам химических элементов лежит не их атомная масса или массовое число ядра их атомов A (как первоначально установил Д.И. Менделеев, 1869 год), а положительный электрический заряд ядра этих элементов, равный $e_0 \cdot Z$ (как в дальнейшем уточнил Н. Бор, 1922 год) [3, 4].

Электроны, входящие в состав электронной оболочки атомов (или молекул, состоящих из атомов), получили название связанных. Связанные электроны атома вещества образуют электронные слои, имеющие по мере удаления от ядра атома следующие обозначения: $K = 1$; $L = 2$; $M = 3$; $N = 4$; $O = 5$; $P = 6$ [7, 8]. Каждый электронный слой представляет собой совокупность электронов, энергетические состояния которых определяются соответствующим одинаковым значением главного квантового числа n атома вещества. При этом для слоя K главное квантовое число n , наибольшее значение которого соответствует номеру периода элемента в системе химических элементов Д.И. Менделеева, которому рассматриваемый элемент принадлежит, принимает значение $n = 1$; для слоя $L - n = 2$; для слоя $M - n = 3$; для слоя $N - n = 4$; для слоя $O - n = 5$; для слоя $P - n = 6$ [2, 7]. Внутри каждого электронного слоя атома связанные электроны распределяются по электронным подоболочкам, каждая

из которых соответствует некоторому значению орбитального квантового числа l атома, равного $l = n - 1$. Число связанных электронов на каждой подоболочке атома составляет $2(2l + 1)$ [2, 7]. Поэтому, например, для электронного слоя K с $n = 1$ и его электронов возможно только одно энергетическое состояние s ($l = 0$); для слоя L с $n = 2$ – состояния s ($l = 0$) и p ($l = 1$); для слоя M с $n = 3$ – состояния s ($l = 0$), p ($l = 1$) и d ($l = 2$); для слоя N с $n = 4$ – состояния s ($l = 0$), p ($l = 1$), d ($l = 2$) и f ($l = 3$), а для слоя O с $n = 5$ – состояния s ($l = 0$), p ($l = 1$), d ($l = 2$), f ($l = 3$) и g ($l = 4$). В этой связи в атоме любого вещества число связанных электронов в состоянии s составляет 2, в состоянии p – 6, в состоянии d – 10, в состоянии f – 14 и в состоянии g – 18.

В атомной физике установлено, что порядок заполнения связанными электронами в атомах энергетических состояний в электронных слоях и электронных подоболочках (в пределах одного слоя), в основном, должен соответствовать радиальной последовательности расположения энергетических уровней с данными значениями квантовых чисел n и l , а также принципу Паули (в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в двух одинаковых стационарных состояниях, определяемых набором следующих четырех квантовых чисел: главного n , орбитального l , магнитного m_l и спинового m_s) [2, 7]. Такой порядок приводит к тому, что для легких атомов сначала заполняется электронный слой с меньшим значением главного квантового числа n и только потом должен заполняться электронами следующий электронный слой с большим значением n . При этом внутри каждого электронного слоя сначала заполняются энергетические состояния (подоболочки) с $l = 0$ (s - подоболочка), а затем состояния с большими значениями орбитального числа l (вплоть до $l = n - 1$). Этот порядок застройки электронами слоев и подболочек для ряда химических элементов в периодической системе Д.И. Менделеева может нарушаться, начиная с калия K ($n = 4$). Так, для так называемых переходных химических элементов электронная застройка их предыдущих слоев с меньшим значением главного квантового числа n может происходить при уже частично заполненных связанными электронами их последующих слоев с большими значениями n [2, 7]. Это объясняется тем, что при достаточно больших значениях главного квантового числа n взаимодействия между связанными электронами оболочки атома приводит к тому, что состояния с большими n и меньшими значениями орбитального квантового числа l могут иметь меньшую энергию и оказаться для атома вещества энергетически более выгодными, чем состояния с меньшими n , но с большими l [5, 7].

Как видим, связанные электроны являются неотъемлемой составной частью любых атомов и молекул вещества, встречающихся в земной природе.

2. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ОПРЕДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ВЕЩЕСТВА

В атомах те связанные электроны, которые входят в состав внешнего электронного слоя с наиболь-

шим значением главного квантового числа n , а также принадлежат s - и p - подоболочкам, то есть имеют орбитальные квантовые числа $l=0$ или $l=1$, получили название валентных электронов [2, 7]. Из предыдущего раздела 1 следует, что общее число валентных электронов на s - и p - подоболочках атомов для ряда элементов и образуемых ими молекул может в пределе составлять восемь. Образование таких подоболочек в атомах и молекулах приводит к созданию устойчивых внешних электронных слоев и соответственно к появлению устойчивых химических элементов и их соединений. Именно валентные электроны и определяют химические и оптические свойства атомов (молекул) любого известного нам сейчас вещества [7].

Молекула, как известно, может состоять из одинаковых или различных атомов вещества. Эти атомы в молекуле соединены химическими связями, которые объясняются различными взаимодействиями их валентных электронов. В основе большинства химических реакций, протекающих благодаря указанным химическим связям, лежит отдача или присоединение валентных электронов атомов взаимодействующих веществ (элементов) [2, 7]. Из атомной физики и электрохимии известно, что если у взаимодействующего атома имеются менее чем наполовину занятые связанными электронами s - и p - подоболочки (энергетические состояния), то для него энергетически выгодна отдача другим атомам собственных валентных электронов. В случае, когда у взаимодействующего атома s - и p - подоболочки (энергетические состояния) более чем наполовину заняты связанными электронами, для него более выгодным энергетически оказывается присоединение к себе валентных (внешних) электронов от других атомов, участвующих в процессе взаимных химических реакций [2, 7].

Из классической физики известно, что молекулы, образовавшиеся в результате превращения взаимодействующих между собой атомов вещества в противоположно электрически заряженные и взаимно притягивающиеся ионы, получили название ионных (*гетерополярных*) [5, 7]. Такой тип химической связи атомов в молекуле называется *ионной связью*. В основе образования таких ионных молекул лежит указанное выше поведение взаимодействующих атомов с различно заполненными внешними s - и p - подоболочками, обусловленное отдачей или присоединением для них соответствующих валентных электронов. Типичным примером для ионных молекул могут служить молекулы щелочно-галогидных солей, образованные ионами атомов химических элементов I и VII групп периодической системы Д.И. Менделеева [7]. Например, более конкретно молекулы поваренной соли NaCl, состоящие из положительного иона натрия Na^+ и отрицательного иона хлора Cl^- . Заметим, что щелочные металлы I группы имеют сравнительно небольшие значения потенциала и соответственно энергии ионизации E_0 (например, для одновалентного натрия первый ионизационный потенциал $E_{01}=5,12 \text{ эВ} = 8,20 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ [5]). Следует напомнить, что значение E_0 соответствует энергии освобождения одного внешнего (валентного) электрона из нейтрального атома

вещества. Так как все щелочные металлы обладают минимальными ионизационными потенциалами, то поэтому их такой представитель как натрий Na активно и ведет себя в химических процессах. В тоже время атомы элементов-металлоидов VII группы характеризуются большой величиной "электронного сродства", то есть величиной количества энергии, выделяющейся в случае присоединения к атому металлоида данной группы валентного электрона от атома из другой группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева [5, 7]. В этой связи переход валентного электрона от атома натрия Na к атому металлоида-хлора Cl приводит к образованию ионов, каждый из которых обладает устойчивой внешней совместной восьмиелектронной ($s + p$)- подоболочкой, что во многом и определяет химические свойства образующегося нового вещества. Такой переход валентного электрона обуславливает образование в итоге устойчивой ионной молекулы поваренной соли NaCl. Можно уверенно говорить о том, что мы на конкретном примере убедились в определяющей роли валентных электронов в протекании химических реакций и в конечном формировании с их (электронов) помощью новых химических свойств у получаемых в ходе этих химических реакций новых соединений.

Другим примером молекул являются так называемые атомные (*гомеополярные*) молекулы. Химическая связь атомов в гомеополярных молекулах называется *ковалентной связью* [2, 7]. Типичным примером атомной молекулы является молекула простейшего газообразного вещества – водорода H_2 , состоящая из двух ядер – протонов p_e и двух связанных и вращающихся вокруг них электронов. Неразличимость тождественных связанных электронов-фермионов согласно квантовой статистике Ферми – Дирака [4] в молекуле водорода H_2 приводит здесь к существованию так называемого "квантовомеханического обменного взаимодействия", возникающего между этими двумя связанными электронами [5, 7]. Благодаря такому взаимодействию электрон каждого из атомов молекулы водорода H_2 проводит некоторое время у ядра другого атома. Таким путем в молекуле водорода H_2 осуществляется связь обоих атомов, образующих единую атомную молекулу. Современные квантовомеханические расчеты показали, что при сближении двух водородных атомов H на расстояние, соизмеримое с первым боровским радиусом электрона $r_{e1}=0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ в планетарно-квантовой модели Н. Бора для атома водорода [4, 5], в случае антипараллельности спинов (собственных вращений) рассматриваемых связанных электронов атомарного водорода возникает притяжение обоих атомов друг к другу и, в конце концов, образуется устойчивая атомная молекула водорода H_2 [7]. При параллельности же спинов связанных электронов водородные атомы H отталкиваются друг от друга и молекула водорода H_2 не образуется [5, 7]. Нам теперь совершенно ясно видно, что внешние связанные или валентные электроны в атоме вещества могут оказывать сильное влияние на протекание на квантовофизическом уровне обменных межатомных микропроцессов, ведущих к образова-

нию новых химических элементов и веществ (материалов) с новыми физико-химическими свойствами.

Остановимся далее на влиянии связанных электронов атомов и молекул вещества на их оптические свойства. Среди оптических свойств атома вещества важнейшим является его спектр излучения. Так, частоты спектральных линий ν в дискретном линейчатом спектре атома водорода Н описывается известной формулой Бальмера – Ридберга [5, 7]:

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где $R = m_e e_0^4 / (8 \epsilon_0^2 h^3)$ – постоянная Ридберга, равная $3,2931193 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – постоянная Планка.

В (1) целое положительное число $n = 1, 2, 3, \dots$ принято называть главным квантовым числом для электронной оболочки атома (именно оно и нумерует от центра атома к его периферии возможные орбитали связанного электрона в этой стратифицированной оболочке), причем $m = n + 1, n + 2, n + 3, \dots$. Группа линий с одинаковым значением квантового числа n называется "серией". Приведем известные нам "серии" водородного спектра [7]: $n = 1$ – "серия Лаймана" (переход вышерасположенного электрона на уровень с $n = 1$); $n = 2$ – "серия Бальмера" (переход вышерасположенного электрона на уровень с $n = 2$); $n = 3$ – "серия Пашена" (переход вышерасположенного электрона на уровень с $n = 3$); $n = 4$ – "серия Брэкета" (переход вышерасположенного электрона на уровень с $n = 4$); $n = 5$ – "серия Пфунда" (переход вышерасположенного электрона на уровень с $n = 5$); $n = 6$ – "серия Хемфри" (переход вышерасположенного электрона на уровень с $n = 6$). Из (1) следует, что переходы связанного электрона в атомарном водороде Н с разных вышерасположенных энергетических уровней (возбужденных состояний) на те или иные нижерасположенные энергетические уровни (условно стационарные состояния) сопровождается соответствующей частотой ν электромагнитного излучения, отвечающей знаменитой формуле Планка [5]. Поэтому можно обоснованно заключить, что частоты ν в спектре электромагнитного излучения (оптические свойства) для атома водорода Н целиком определяются квантованными переходами в электронной оболочке данного атома его единственного связанного электрона с одних энергетических уровней (орбиталей) на другие.

При изучении взаимодействия света с веществом физиками было установлено, что на процессы распространения в нем переменного электромагнитного поля световой волны определяющую роль в области видимого и ультрафиолетового электромагнитного излучения играют вынужденные колебания внешних и наиболее слабо связанных (валентных) электронов атомов и молекул вещества. Поэтому данные электроны иногда называют еще и оптическими электронами [7]. Эти электроны, совершая под действием света вынужденные колебания, излучают вторичные световые волны той же частоты. Данные вторичные волны когерентны (согласованы по фазам) и интерферируют при своем наложении. В случае изотропной

среды эти вторичные волны образуют проходящую в веществе волну, направление которой совпадает с направлением распространения первичной световой волны длиной λ_c . Для оптически неоднородной среды, показатель преломления которой изменяется от точки к точке вследствие флуктуаций ее плотности, в результате наложения первичной и вторичной волн возникает рассеяние света [7]. Согласно классической электронной теории дисперсии света переменное электромагнитное поле белого света вызывает электронную поляризацию среды, приводящую к изменению относительной диэлектрической проницаемости ϵ этой среды и ее зависимости от частоты ν волн падающего на нее света [5, 7]. В процессе этой поляризации среды основная роль отводится оптическим электронам ее атомов. Изменение ϵ обуславливает изменение показателя преломления n_c для среды, в которой распространяется свет, и его частотную зависимость. Такое изменение n_c ведет к изменению фазовой скорости света и ее зависимости от частоты ν , что и приводит к дисперсии света. Поэтому связанные электроны атомов вещества могут оказывать сильное электрофизическое влияние на рассеяние, поглощение и дисперсию падающего света в этом веществе.

В качестве оптических свойств молекул вещества выберем их оптические спектры, представляющие собой совокупность полос, образованных тесно расположенными спектральными линиями [7]. Указанные полосы в молекулярных спектрах наблюдаются в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах шкалы электромагнитных волн. Близко расположенные полосы образуют группы полос. Известно, что у простейших двухатомных молекулах наблюдаются несколько групп полос, а у многоатомных сложных молекулах в видимой и ультрафиолетовой областях спектра наблюдаются широкие сплошные полосы испускания и поглощения электромагнитного излучения [5, 7]. Согласно физическим данным, приведенным в [7], наиболее заметное влияние на частоту ν и энергию фотона, испускаемого молекулой при изменении ее энергетического состояния, оказывает дискретное квантованное изменение энергии движения связанных электронов в оболочках ее атомов. Отметим, что на частоту фотонного излучения из молекулы вещества дополнительное влияние, но в меньшей по сравнению с изменением энергии электронов ее атомов степени, оказывает изменение энергии колебательного движения ядер ее атомов и изменение энергии вращательного движения молекулы [7]. И на оптические свойства молекул вещества, как нам теперь хорошо видно, существенное влияние оказывают связанные электроны ее атомов, соответствующим образом расположенные в их электронных слоях.

3. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ

В твердых металлических проводниках существуют так называемые свободные электроны, образующие электроны проводимости с усредненной про-

странственной плотностью n_{e0} , способные под действием внешнего электрического поля с усредненной напряженностью $E_z = U_{пр} / l_{пр}$, где $U_{пр}$ – приложенное к проводнику длиной $l_{пр}$ электрическое напряжение, упорядочено перемещаться (дрейфовать) по кристаллической решетке материала проводников. Величина n_{e0} определяет усредненную объемную плотность отрицательного электрического заряда в указанных проводниках $\rho_{e0} = e_0 \cdot n_{e0}$, составляющую, например, для широко используемого в электротехнике такого проводникового материала как медь Cu ($n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ [5]), колоссальную величину, примерно равную $2,7 \cdot 10^{10} \text{ Кл/м}^3$ [9]. Поэтому благодаря такой огромной величине ρ_{e0} в проводниках оказался и возможным процесс формирования в их металле электрического тока проводимости $i_{пр}$ различных амплитудно-временных параметров (АВП), который, как известно, соответствует всякому упорядоченному движению электрических зарядов. Будем придерживаться той научной концепции, что свободные электроны в материале любого проводника образуются из внешних связанных (валентных) электронов его атомов [2, 7]. В рассматриваемых проводниках происходит просто обобществление этих валентных электронов атомов их материала, которые из-за внешнего силового энергетического влияния отделились от "своих" атомов и образовали так называемый коллективизированный "электронный газ" металла проводника с огромной усредненной плотностью ρ_{e0} .

С учетом изложенного нами выше в разделе 1 очевидно, что валентные электроны расположены на s ($l = 0$)– и p ($l = 1$) – подболочках внешнего электронного слоя атомов металла проводника. Их общее максимальное число в каждом атоме для наиболее распространенных проводниковых материалов (например, для меди Cu, серебра Ag, железа Fe, цинка Zn и алюминия Al) составляет согласно периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева три (два на s – подболочке и один на p – подболочке) [5, 7]. Что касается непроводниковых материалов (например, инертных газов, образующих VIII группу в указанной периодической системе химических элементов), то для них максимальное число валентных электронов может достигать восьми (два на s – подболочке и шесть на p – подболочке). Такая электронная конфигурация для элементов VIII группы обеспечивает их инертность к химическим взаимодействиям с другими элементами, что и служит гарантом для их устойчивого существования в природе.

Отметим, что сейчас в теории электричества и прикладной электротехнике за положительное направление электрического тока принято направление упорядоченного движения положительных электрических зарядов [10], хотя в действительности в металлических проводниках ток вызван упорядоченным движением его свободных электронов с отрицательным электрическим зарядом в направлении, противоположном указанному чуть выше. Для постоянного во

времени t напряжения $U_{пр}$, приложенного к противоположным концам проводника, электрический ток $i_{пр}$ в нем будет соответствовать однонаправленному перемещению (дрейфу) в металле проводника его свободных электронов. Для переменного (двухполярного импульсного) напряжения $U_{пр}$, действующего на металлическую структуру проводника, электрический ток проводимости $i_{пр}$ будет представлять собой гармонические (осциллирующие) продольные колебания вдоль оси проводника его "электронного газа" или "электронного облака" во взаимно противоположных направлениях. Чем выше частота f_U изменения во времени t приложенного к проводнику электрического напряжения $U_{пр}$, тем будет больше частота соответствующих пространственных колебаний "электронного газа" металла проводника и соответственно частота колебаний $f_i = f_U$ электрического тока $i_{пр}$ в металлическом проводнике [9].

Читателю необходимо помнить, что свободные электроны металлических проводников как квантовые объекты имеют дуалистическую природу [5, 9]: они одновременно являются элементарными частицами – корпускулами и электронными волнами соответствующей длины λ_e . Дуализм свободных электронов металлических проводников приводит к проявлению ряда электрофизических особенностей при формировании с их помощью электрического тока проводимости $i_{пр}$ различных АВП и его волновом квантованном продольном (радиальном) распределении в металлических проводниках [11, 12]. Причем, учет данных квантованных проявлений поведения свободных электронов в металле оказался крайне важным для области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) и техники больших импульсных токов (БИТ). Именно в областях ВИТ и БИТ используются высокие плотности электрического тока, когда наиболее ярко и наглядно для нас в металле проводника проявляются волновые свойства его свободных электронов. Здесь эти особенности могут проявляться в виде квантово-физических продольно-радиальных периодических макроскопических электронно-тепловых структур с наличием "горячих" и "холодных" участков проводника [13–15]. Основные результаты многолетних исследований наиболее полно изложены автором в его недавно вышедшей из печати монографии [16]. Поэтому можно констатировать, что при получении электрического тока проводимости различных АВП в твердых металлических проводниках главную электрофизическую роль выполняют их свободные электроны.

4. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ, ПЕРЕДАЧЕ И ПОТРЕБЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

На заключительном этапе производства электрической энергии в промышленных условиях в турбогенераторе силового энергоблока электростанции (ЭС), как известно, используется фундаментальный закон

электромагнитной индукции Майкла Фарадея [5,17], открытый этим великим английским электрофизиком-самородком еще в 1831 году [3, 4]. Суть этого закона сводится к тому, что изменяющееся во времени t или в пространстве магнитное поле создает (индуцирует) в размещенном в таком поле металлическом проводнике электродвижущую силу (ЭДС), которая при соответствующих условиях для проводника вызывает в его металле протекание индукционного электрического тока ротора турбогенератора энергоблока, создающего своими магнитными полюсами с обмотками возбуждения (или без них) в рабочем кольцевом воздушном зазоре между ротором и статором турбогенератора бегущее (вращающееся) магнитное поле (было изобретено великим сербско-хорватским электротехником и электрофизиком Николой Теслой в 1882 году [4, 18]), в распределенных по окружности и изолированных от заземленного металлического корпуса турбогенератора обмотках его статора будет индуцироваться переменная ЭДС. Данная ЭДС (переменное электрическое напряжение) будет во времени t в соответствии с характером поведения круговых функций изменяться по гармоническому закону. При генерации трехфазной ЭДС (переменного трехфазного электрического напряжения U_c) электрические обмотки статора турбогенератора, содержащие изолированные между собой и от корпуса статора витки сложной формы из обычно медного провода, разнятся между собой на угол 120° . Полученные с электрических обмоток статора переменные ЭДС соответствующих фаз (фазные электрические потенциалы или напряжения) выводятся с помощью изолированных металлических проводов (шин) на соответствующие клеммы распределительного электрического щита турбогенератора силового энергоблока ЭС [19].

Далее возникает задача передачи выработанных с помощью турбогенератора энергоблока ЭС фазных электрических потенциалов (переменных электрических напряжений U_c разных фаз) к потребителю электрической энергии. Вот тут-то активно и "вступают" в действие описанные выше в разделе 3 свободные электроны твердых металлических проводников. Сначала эти проводники со своими внутримолекулярными "электронными облаками" обеспечивают в соответствующих преобразующих, технологических и защитных электроустройствах (например, силовых трансформаторах, токовыводах, реакторах) подготовку фазных напряжений U_c (прежде всего, их резкого повышения по амплитуде) для применяемой сейчас проводной передачи электрической энергии с помощью воздушных или кабельных линий электропередачи (ЛЭП) к ее различным потребителям [19].

Потом проводящие структуры металлических токопроводов ЛЭП напрямую участвуют в процессе передачи электрической энергии от распределительных устройств генерирующей станции к подстанциям и ее отдельным потребителям. Данное участие металлических токопроводов ЛЭП в передаче электроэнергии, по мнению автора, сводится к ее направлению в требуемое месторасположение потребителя этой энер-

гии. В этом случае металлические токопроводы ЛЭП со своими свободными электронами выполняют важную роль направляющих электромагнитных структур, определяющих требуемое направление потока электромагнитной энергии от ЭС к ее потребителю [20]. Без таких металлических структур со своими свободными электронами просто невозможно обеспечить в указанном безизлучательном режиме канализации электроэнергии ее доставку в заданную точку территории того или иного региона. В тоже время сама электроэнергия в рассматриваемом проводном способе ее транспортировки от ЭС к потребителю будет передаваться лишь вдоль изоляционной среды, прилегающей к металлическим поверхностям токопроводов ЛЭП [17, 20]. Наличие в токопроводах ЛЭП металлических структур будет приводить и к паразитным джоулевым потерям электромагнитной энергии, вызванным рассеиванием квантованных электронных волн де Бройля, порождаемых дрейфом свободных электронов металлических токопроводов, на тепловых колебаниях регулярно расположенных положительных ионов кристаллической решетки основных электропроводящих структур ЛЭП [20].

Что касается роли свободных электронов металлических токопроводов в процессе потребления электрической энергии, то она по физике мало чем будет отличаться от их роли непосредственно при подготовке этой энергии к передаче и при ее самой проводной передаче к потребителю. При чисто омической электрической нагрузке у потребителя (например, лампах накаливания) роль свободных электронов ее металлических элементов будет сводиться к диссипации (рассеиванию) подводимой к нагрузке электроэнергии на их кристаллической решетке. Ясно, что для постиндустриального человеческого общества электроны металлических проводников имеют важное значение при производстве, проводной передаче и потреблении (скажем, путем активного рассеивания на омическом сопротивлении) электрической энергии.

5. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЗДАНИИ ПРОВОЛОЧНОЙ И БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Первоначально, как всем нам хорошо известно, был изобретен телефонный аппарат, базирующийся на передаче через коммутационную станцию посредством телефонного кабеля электрического сигнала от одного его пользователя (абонента) к другому. Произошло это во второй половине 19 – столетия в США. Автором этого великого изобретения от 1876 года в истории человечества считается известный американский электротехник Александр Белл [21]. Передача по телефонному кабелю, содержащему прямой и обратный тонкие изолированные металлические (как правило, медные) провода (или иначе называемые "проводные пары"), электрического сигнала с амплитудой электрического напряжения до 30 В даже в режиме постоянного электрического тока, как мы знаем (см. разделы 3 и 4), невозможна без участия свободных электронов металла его проводных пар. Кроме того, данный тип электронов используется и в самой телефонной трубке, где с помощью токнесущих метал-

лических элементов наушников и микрофона происходит преобразование электрического сигнала в звуковой и наоборот. Из мировой истории телефонизации известно, что наиболее проблемной задачей для человечества оказалась задача создания трансатлантического подводного телефона, имеющего общую протяженность около 4000 км [22]. Здесь специалисты, начиная с 40-х годов 20-го столетия, столкнулись с проблемой большого пространственного затухания передаваемого электрического сигнала вдоль металлических жил подводного коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией. Так как при этом использовались частоты передаваемого сигнала порядка 100 кГц, то тепловые (джоулевые) потери энергии в медных жилах кабеля (яркое проявление в них уже паразитного влияния свободных электронов) на участке глубоководной трассы всего лишь длиной порядка 100 км сводили практически «на нет» вводимую в нее полезную электрическую мощность. Проблема трансокеанской телефонии была успешно решена лишь к осени 1956 года с помощью подводных автономных промежуточных электронных усилителей электрической мощности, размещенных по телефонной трассе на расстоянии в 70 км друг от друга и работающих в спектре частот 20 – 160 кГц с усилением сигнала в 60 дБ (в 1000 раз) на наивысшей частоте [22].

Что касается современного мобильного телефона, то и здесь без участия свободных электронов металлических структур пока никак не обойтись: они не заменимы при зарядке и рабочей разрядке его миниатюрного электрического аккумулятора (автономного источника электрического питания на напряжение до 12 В, обеспечивающего протекание микротоков в электроблоках телефона), функционировании его основных электрических схем и приемно-передающих устройств, работающих в диапазоне электромагнитных волн порядка 1 ГГц, а также при указанном выше преобразовании электрических и звуковых сигналов.

Намного раньше зарождения и развития телефонии в мире в первой половине 19-го века происходило становление проволочной электросвязи в виде телеграфии [3, 4]. Данный вид связи позволял осуществлять быструю передачу и прием сообщений на большие расстояния при помощи электрических сигналов, передаваемых по проводной линии. В начале такая передача производилась при помощи специальных знаковых символов и кодов (например, азбуки Морзе от 1837 года [4]), а в настоящее время широко применяются буквопечатающие телеграфные аппараты (например, телетайпы). Отметим, что сейчас в мире получило весьма широкое распространение международное абонентское телеграфирование (телекс) – проводная электрическая связь между абонентами (отдельными лицами, организациями), ведущими документальные переговоры, прямо фиксируемые на бумаге [1]. При практической реализации телеграфии в режиме передачи и приема электрических сигналов напрямую используются свободные электроны металлических проводов линий связи (см. разделы 3 и 4).

В конце 19-го столетия, благодаря пионерским работам, прежде всего, известных физиков того времени – Генриха Герца (Германия) и Александра По-

пова (Россия), человечество получило в свое распоряжение крупнейшее научно-техническое изобретение – беспроводную электросвязь, осуществляемую на дальние расстояния при помощи высокочастотных электромагнитных колебаний (радиоволн) [3, 4]. Большой вклад в развитие этого вида электросвязи (радиотелеграфии), но не в ее открытие, внес и итальянский инженер – радиотехник Гульельмо Маркони, получивший в 1909 году Нобелевскую премию по физике за изобретения в области беспроводной электросвязи (радиосвязи). И здесь люди не обошлись без непосредственного участия свободных электронов в получении электромагнитных волн радиочастотного диапазона (в электроцепях радиопередатчика), их передаче через воздушное пространство и в приеме пользователем (в электроцепях радиоприемника) [23].

Необходимо указать, что в настоящее время в силовой радиоэлектронике при создании мощных радиопередатчиков основным типом сверхвысокочастотных электрических генераторов в сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазонов радиоволн является магнетрон [4,23]. В таком электровакуумном приборе как магнетрон, содержащем двухэлектродную коаксиальную систему "катод – анод" и являющемся источником мощного потока сверхвысокочастотной электромагнитной энергии, основным генерирующим элементом служит мощный вращающийся в постоянном магнитном поле вихревой поток электронов. Вывод усиленной магнетроном сверхвысокочастотной электромагнитной энергии осуществляется из его настроенных в резонанс миниатюрных объемных резонаторов, круговым образом размещенных вдоль электрода-анода. Кроме того, электроны не заменимы и в таких мощных современных радиоэлектронных устройствах как лампа бегущей (ЛБВ) и лампа обратной (ЛОВ) волны, используемых в мощных радиопередатчиках при генерировании электромагнитных колебаний соответственно в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн [4, 23]. Накопленная в ЛБВ или ЛОВ кинетическая энергия движущимися электронами в их ускоряющей вакуумной системе "катод – анод" после ее частичной передачи в конце ускорения тормозящему их сверхвысокочастотному электромагнитному полю выводится наружу при помощи волноводов и направляется в излучающую систему радиопередатчика.

6. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЗДАНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ИНДУСТРИИ, ТРАНСПОРТА, БЫТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРОВ

Современная промышленность не мыслима без электротранспорта при доменном производстве металла, металлургических прокатных станов (блюмингов и слябингов), металлообрабатывающих станков, подъемных электрокранов, наземных и воздушных транспортных средств, ткацких станков, деревообрабатывающих и бумагоделательных машин. Указанные основные производственные механизмы и средства, в свою очередь, не мыслимы без использования электродвигателей, в которых электромагнитная энергия обмоток статора и сети преобразуется в механиче-

скую энергию движущихся частей их ротора. Круговое вращение ротора электродвигателя через систему промежуточных механизмов может преобразовываться в иные виды движения отдельных частей указанных основных производственных средств. Работа же электродвигателя, как и электрогенератора, в свою очередь, также не мыслима без участия свободных электронов, дрейфующих в металле проводов их электрических обмоток. Именно данное направленное движение (дрейф) свободных электронов вызывает появление в металлических проводах электрических обмоток статора электродвигателя (ротора электрогенератора) переменного электрического тока проводимости, вызывающего создание вокруг витков указанных обмоток вращающегося переменного магнитного поля. Взаимодействие данного магнитного поля в электродвигателе с металлическими частями ротора (например, его электрическими обмотками) приводит в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея к возникновению в них переменных ЭДС и протеканию, благодаря свободным электронам, в их металле соответствующих электрических токов. Силовое взаимодействие переменных магнитных полей и токов статора и ротора электродвигателя вызывает в рассматриваемой электромагнитно-механической системе появление электродинамических сил, обуславливающих круговое вращение ротора электродвигателя.

Вся наша бытовая электротехника (например, холодильники, пылесосы, кухонные комбайны, электробритвы и телевизоры) использует для своего функционирования косвенно или прямо электроны. Так, все вышеперечисленные бытовые электроприборы, кроме последних, не могут обойтись при своей работе без электродвигателей и протекающих в их электрообмотках электрических токов проводимости, представляющих собой направленное движение свободных электронов. В телевизорах же, электроны, кроме создания электрических токов в металлических проводах и тонких токопроводящих "дорожках" плат разнообразных схем их взаимосвязанных электроблоков, применяются при создании черно-белого или цветного изображения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) [4]. Заметим, что в последние годы благодаря научно-техническому прогрессу в телевизорах, наряду с применением обычных ЭЛТ, используются плазменные и жидкокристаллические экраны.

Принципиально не обойтись без помощи электронов и современной компьютерной технике. Работа основного блока компьютера, его дисплея (особенно с ЭЛТ), клавиатуры, принтера и выход в Интернет напрямую связаны с использованием проводной как внутриблочной, так и междублочной электрической связи. Главным действующим "лицом" в этой проводной электросвязи компьютера является все тот же его Величество Свободный Электрон.

7. РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ИЗУЧЕНИИ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА И ПОЛУЧЕНИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время одним из современных методов физико-химического анализа многих веществ является метод просвечивающей электронной микро-

скопии [24]. Данный метод базируется на применении электронных микроскопов [25], в которых при ускоряющих электрических напряжениях до 100 кВ в системе "остроконечный катод с цилиндром Венельта – дисковый анод с центральным отверстием" сфокусированные в вакууме в пучок при помощи электронных линз нерелятивистские электроны направляются на тонкие препарированные элементы исследуемого объекта. После "просветки" таких прозрачных для электронов тонких срезов наблюдаемого объекта эти электронные лучи при помощи системы электронных диафрагм и линз попадают на плоскость экрана конечного изображения с люминофором, где с помощью камеры наблюдения, имеющей бинокулярный микроскоп, и фотокамеры производится фиксация получаемых микроснимков изучаемого образца вещества. Заметим, что разрешающая способность в обычных светооптических микроскопах, равная минимальному радиусу кружка дифракционного рассеяния света ρ_0 на предметном столе наблюдения микроскопа, определяется следующим выражением [25]:

$$\rho_0 = \frac{0,61\lambda_c}{n_c \sin \alpha_0}, \quad (2)$$

где λ_c – длина световой волны; n_c – показатель преломления среды, расположенной между исследуемым объектом и объективом светового микроскопа; α_0 – апертурный угол наблюдения исследуемого объекта в световом микроскопе или возможно и в ином типе микроскопа, использующем вместо белого света другой вид воздействующих на объект лучей.

Так как минимальная длина волны λ_c в видимой части спектра электромагнитного излучения (для белого света) составляет порядка 400 нм [7], то согласно (2) для высококачественных объективов с апертурным углом не более $\alpha_0=70^\circ$ (при этом $\sin \alpha_0=0,94$) даже при использовании в светооптическом микроскопе перед его объективом специальных иммерсионных жидкостей с наибольшим показателем преломления $n_c=1,5$ максимальная разрешающая способность таких микроскопов ρ_0 составляет величину, примерно равную $\lambda_c/2$, то есть численно составляющую в нашем случае около 200 нм [25].

Электронный же микроскоп, использующий для формирования изображения структуры исследуемого образца остро направленное электронное излучение (электронный пучок лучей), позволяет кардинально улучшить разрешающую способность ρ_0 при наблюдении очень малых (микроскопических) объектов. Обусловлено это тем, что в соответствии с известной в волновой механике формулой де Бройля длина волны электрона λ_e , движущегося со скоростью v_e , выражается следующей формулой [5]:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}. \quad (3)$$

Поэтому согласно (3) при практическом использовании в современном электронном микроскопе электронов с досветовыми скоростями ($v_e < c$, где $c=3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме [5]) величиной

равной реально около $1,8 \cdot 10^8$ м/с длина их волны λ_e может составлять примерно 0,004 нм. Тогда с учетом (2) оценочная разрешающая способность ρ_0 электронного микроскопа будет примерно равной $\lambda_e/2$, что может для рассматриваемого случая численно составить величину около 0,002 нм. Сравнивая приведенные выше численные данные для ρ_0 , можно заключить, что в нашем случае теоретически разрешающая способность электронного микроскопа в 10^5 раз выше, чем для светооптического микроскопа. Однако на практике, как оказалось, реально достижимое разрешение электронных микроскопов превышает разрешение световых микроскопов лишь в 10^3 раз [25]. Данное расхождение связано с тем, что в электронно-оптических линзах по сравнению со световыми линзами значительно больше ошибки изображения объекта наблюдения или так называемые аберрации [25]. В этой связи для снижения влияния аберраций в электронных микроскопах приходится уменьшать величины апертурных углов α_0 практически в 10^2 раз по сравнению с апертурными углами α_0 в светооптических микроскопах и соответственно во столько же раз увеличивать величину разрешения ρ_0 .

Электронные микроскопы позволяют проводить прямое электронно-микроскопическое исследование самых разнообразных объектов, начиная с легких органических структур и заканчивая тяжелыми металлами. Получаемая с их помощью информация не ограничивается только сведениями о геометрических характеристиках объектов, но и включает в себя данные об их внутренней кристаллографии и о возникающих несовершенствах (дислокациях) в микроскопических структурах исследуемых материалов. Последнее является весьма важным при получении новых видов материалов (например, различных композиций, упрочненных металлов и градиентных структур) с улучшенными физико-механическими свойствами, упорядоченными внутренними структурами и содержащими минимум дефектов в своем строении.

Важным физическим инструментарием при изучении внутреннего строения вещества (материи) оказались линейные (ЛУЭ) и циклические (ЦУЭ) ускорители электронов [4, 5]. Ускоренные в вакууме до огромных скоростей v_e в данных сложных, крупногабаритных и дорогостоящих электрофизических установках, принцип работы которых практически аналогичен работе миниатюрной вакуумной радиоэлектронной лампы, суб- и ультрарелятивистские электроны при встрече на своем пути движения с ядерной мишенью способны вызвать в ней эффекты взаимодействия, связанные с конечными микроскопическими размерами ядер ее атомов, а также с размерами их (ядер) образующих элементарных частиц [4, 5]. Для этого необходимо, чтобы длина волны электронов λ_e , ускоренных в ЛУЭ или ЦУЭ (например, в микротронах, бетатронах), была порядка 10^{-15} м и менее (порядка радиуса ядра атома изучаемого вещества и меньше). Для получения таких длин электронных волн λ_e энергия электронов W_e в ускорителе данных элементарных частиц должна в соответствии с ниже-

приведенной квантовомеханической формулой, вытекающей из закономерностей волновой механики [5,7],

$$W_e = \frac{hc}{\lambda_e}, \quad (4)$$

составлять значение, равное около 1,24 ГэВ. Заметим, что, например, на Стэнфордском ЛУЭ (США) были получены в свое время рекордные значения энергии ультрарелятивистских электронов W_e , составляющие примерно 20 ГэВ [4, 5]. При этом их длина λ_e на выходе электронного пучка из указанного ЛУЭ на основании (4) составляла величину, примерно равную $6,2 \cdot 10^{-17}$ м. Видно, что найденная нами согласно (4) длина волны электрона λ_e практически на два порядка меньше его приближенного радиуса r_e , оцененного нами на основании представлений классической физики и указанного автором выше во Введении данной статьи. К этому следует добавить то, что даже при современной предельной разрешающей способности физических измерений микрообъектов в 10^{-18} м размеры электрона достоверно определить пока все же не удалось [4, 5]. Именно такой физический парадокс и заставляет физиков-ядерщиков проводить дальнейшие углубленные работы по экспериментальному уточнению физико-квантовомеханических параметров такой совсем не тривиальной элементарной частицы как электрон, возможно способному дать новую оценку существующим физическим теориям, научным концепциям и нашим представлениям по устройству микромира и макромира в земных условиях [5, 26]. Можно с полным на то основанием утверждать, что ускоренные до больших скоростей v_e не- и релятивистские электроны в настоящее время занимают важную нишу в физическом экспериментальном инструментарии, предназначенном для опытного изучения микроустройства любого вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена определенная систематизация известных электрофизических фактов, непосредственно указывающих на фундаментальную и основообразующую роль электронов в **зарождении** (например, в образовании атомов и молекул вещества), **формировании** (например, в определении свойств атомов и молекул вещества и макрообъектов в целом) и **развитии** (например, в получении электрического тока в проводниках; в производстве, передаче и потреблении электрической энергии; в создании проволочной и беспроводной электросвязи; в создании промышленной индустрии, транспорта, бытовой электротехники и компьютеров; в изучении микроскопического строения вещества) нашей **земной цивилизации**.

2. Учитывая важную роль электронов в электрохимических обменных процессах, происходящих на молекулярном и клеточном уровнях в живой и неживой материи и приводящих к выработке биоэлектрических потенциалов в клетках и тканях человека, животных и растений, которые активно участвуют в регулировании их жизнедеятельности, можно с учетом современных достижений в области биофизики и био-

энергетики вполне обоснованно утверждать, что такие рассмотренные нами выше и входящие в состав атомов всех веществ элементарные частицы как **ЭЛЕКТРОНЫ** составляют физическую основу нашего земного мира.

3. Данный научно-технический панегирик (это иностранное слово происходит от сочетания греческих слов "*logos panēgyrikos*" – "*торжественная речь в честь кого-либо или чего-либо*" [1]) основным и наиболее часто проявляющим себя в области электричества представителям нашего земного микромира – **ЭЛЕКТРОНАМ** представляется его автору – электрофизику достаточно обоснованным с современного уровня научно-технических знаний человечества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
2. Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества. – М.: Просвещение, 1977. – 160 с.
3. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. В 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
5. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
6. Баранов М.И. Приближенный расчет сверхсильных электрических и сильных магнитных полей в атоме вещества // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2006. – №6. – С. 60–65.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Баранов М.И. Эвристическое определение максимального числа электронных полуволн де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2007. – №6. – С. 59–62.
9. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // *Технічна електродинаміка.* – 2007. – №1. – С. 13–19.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
11. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // *Электротехніка.* – 2005. – №7. – С. 25–33.
12. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // *Технічна електродинаміка.* – 2009. – №1. – С. 6–11.
13. Баранов М.И. Квантовомеханический подход при расчете температуры нагрева проводника электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка.* – 2007. – №5. – С. 14–19.
14. Баранов М.И. Экспериментальное исследование квантового эффекта локальной продольной концентрации дрейфующих свободных электронов в металлическом проводе с импульсным током большой плотности // *Технічна електродинаміка.* – 2008. – №2. – С. 9–15.
15. Баранов М.И. Экспериментальное обнаружение и исследование "горячих" и "холодных" продольных участков в тонком металлическом проводе с импульсным током большой плотности // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2008. – №3. – С. 63–68.
16. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. В 2-х томах. Том 2, Книга 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
17. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
18. Баранов М.И. Гениальный изобретатель Никола Тесла // *Электропанорама.* – 2008. – №9. – С. 106–108.
19. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 430 с.
20. Баранов М.И. Полевая и цепная формулировки фундаментальной задачи о передаче электромагнитной энергии в системе "металлический провод – проводящая земля" с переменным электрическим током // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2008. – №2. – С. 59–63.
21. По материалам сайта <http://www.thephone.ru>.
22. Черных Ю.В. Создание трансатлантического подводного телефона // *Электропанорама.* – 2007. – №12. – С. 81–84.
23. Мельник Ю.А., Стогов Г.В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. – М.: Советское радио, 1973. – 368 с.
24. Хейденрайх Р. Основы просвечивающей электронной микроскопии. – М.: Мир, 1966. – 472 с.
25. Пилянкевич А.Н., Климовицкий А.М. Электронные микроскопы. – Киев.: Техніка, 1976. – 168 с.
26. Барвинский А. Роль физических теорий в научно-технической практике // *Электропанорама.* – 2008. – №9. – С. 98–99.

Поступила 15.06.2009

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт";
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния"
НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33,
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua