

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАКЕТОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ

*Описаний розрахунково-експериментальний метод для виявлення і вивчення в електропровідній макроструктурі металевого провідника з імпульсним аксіальним струмом великої щільності квантованих (з квантовим числом  $n=1,2,3,\dots$ ) макроскопічних «гарячих» шириною  $\Delta z_{nh}$  і «холодних» шириною  $\Delta z_{nci}$  подовжніх ділянок, створюючих крок шириною  $(\Delta z_{nh} + \Delta z_{nci})$  періодично розміщених уздовж провідника квантованих подовжніх хвильових електронних пакетів (ХЕП). Показано, що при протіканні в круглому суцільному сталевому оцинкованому дроті радіусом  $r_0=0,8$  мм і довжиною  $l_0=320$  мм аперіодичного імпульсу струму тимчасової форми  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс з амплітудою його щільності  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup> в досліджуваному дроті стохастичним шляхом від одного протікання по ньому вказаного струму до іншого виникають квантовані подовжні ХЕП, що мають один ( $n=1$ ), три ( $n=3$ ) і дев'ять ( $n=9$ ) «гарячих» подовжніх ділянок однакової ширини  $\Delta z_{nh}$ . Місця розташування середин даних «гарячих» подовжніх ділянок ХЕП шириною  $\Delta z_{nh}=7$  мм уздовж дроту відповідають амплітудам квантованих електронних півхвиль де Бройля, що розповсюджуються уздовж нього та характеризуються в проведених експериментах квантовим числом  $n=1,3,9$  і квантованою довжиною півхвилі  $\lambda_{en}/2 \approx l_0/n$ , рівною 320, 107 і 34 мм відповідно. Отримані експериментальні результати відповідають розрахунковим квантовомеханічним даним стосовно вільних електронів електропровідного матеріалу дроту, що дрейфують, базуються на фундаментальному співвідношенні невизначеності Гейзенберга і встановлених закономірностях хвильового подовжнього розподілу в структурі дроту цих електронів. Бібл. 21, рис. 8.*

*Ключові слова:* металевий провідник, імпульсний струм, хвильовий електронний пакет, електронна півхвиля де Бройля, розрахунково-експериментальне дослідження електронних процесів в металі.

*Описан расчетно-экспериментальный метод для обнаружения и изучения в электропроводящей макроструктуре металлического проводника с импульсным аксиальным током большой плотности квантованных (с квантовым числом  $n=1,2,3,\dots$ ) макроскопических «горячих» шириной  $\Delta z_{nh}$  и «холодных» шириной  $\Delta z_{nci}$  продольных участков, образующих шаг шириной  $(\Delta z_{nh} + \Delta z_{nci})$  периодически размещенных вдоль проводника квантованных продольных волновых электронных пакетов (ВЭП). Показано, что при протекании в круглом сплошном стальном оцинкованном проводе радиусом  $r_0=0,8$  мм и длиной  $l_0=320$  мм аперіодического импульса тока временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс с амплитудой его плотности  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup> в исследуемом проводе стохастическим путем от одного протекания по нему указанного тока к другому возникают квантованные продольные ВЭП, имеющие один ( $n=1$ ), три ( $n=3$ ) и девять ( $n=9$ ) «горячих» продольных участков одинаковой ширины  $\Delta z_{nh}$ . Места расположения середин данных «горячих» продольных участков ВЭП шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм вдоль провода соответствуют амплитудам распространяющихся вдоль него квантованных электронных полувольт де Бройля, характеризующихся в проведенных экспериментах квантовым числом  $n=1,3,9$  и квантовой длиной полувольты  $\lambda_{en}/2 \approx l_0/n$ , равной 320, 107 и 34 мм соответственно. Полученные экспериментальные результаты соответствуют расчетным квантовомеханическим данным применительно к дрейфующим свободным электронам электропроводящего материала провода, базирующимся на фундаментальном соотношении неопределенности Гейзенберга и установленных закономерностях волнового продольного распределения в структуре провода этих электронов. Библ. 21, рис. 8.*

*Ключевые слова:* металлический проводник, импульсный ток, волновой электронный пакет, электронная полуволна де Бройля, расчетно-экспериментальное исследование электронных процессов в металле.

**Введение.** В [1-9] были представлены результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований по установлению основных квантовомеханических закономерностей волнового продольного и радиального распределений дрейфующих свободных электронов в немагнитном круглом сплошном цилиндрическом металлическом проводнике радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0 \gg r_0$ , по которому в продольном направлении протекает импульсный аксиальный ток  $i_0(t)$  произвольных амплитудно-временных параметров (АВП). Эти результаты были получены при условии  $\Delta_l/r_0 \gg 1$ , где  $\Delta_l$  – толщина токового скин-слоя в проводнике, и использовании усредненной в нем плотности тока  $\delta_0(t) \approx i_0(t)/S_0$ , где  $S_0 = \pi r_0^2$  – поперечное сечение указанного проводника. Полученные в [1-9] данные свидетельствуют о том, что в однородной электропроводящей структуре металлического проводника, содержащей квантовое число  $n=1,2,3,\dots$  электронных полувольт де Бройля, стохастическим путем

возникают продольные и радиальные квантованные периодические волновые электронные пакеты (ВЭП), каждый из которых содержит по одному относительно «горячему» и «холодному» продольному или радиальному участкам макроскопических размеров. Эти участки вызывают возникновение в металлической макроструктуре проводника неоднородных температурных полей, периодически изменяющихся по его длине или радиусу. Причем, уровни температур на «горячих» и «холодных» продольных участках проводника при проявлении в нем ВЭП могут отличаться до 3,5 раз [4, 7]. Стохастический характер формирования данных квантованных ВЭП определяется квантованным энергетическим состоянием свободных электронов, оказавшихся в микроструктуре материала проводника в момент подачи на него электрического напряжения и начала протекания по нему электрического тока того или иного вида [6]. Укажем, что вол-

новые пакеты, возникающие при распространении монохроматических электромагнитных волн в диэлектрических средах, в свое время были описаны в теории электромагнетизма и на сегодня в электрофизике они изучены достаточно хорошо [10]. Что касается ВЭП металлических проводников с электрическим постоянным, переменным и импульсным током различных АВП, образуемых в их электропроводящих структурах с дрейфующими свободными электронами в результате интерференции (наложения) когерентных электронных полуолн де Бройля, то они в настоящее время в теории электричества практически не исследованы. Вот поэтому до сих пор квантовофизические особенности пространственного распределения основных носителей электричества в таких структурах – дрейфующих свободных электронов, проявляющиеся наиболее резко в случае протекания по ним в штатных (сильноточные разряды в цепях высоковольтных электроустановок [7, 11]), нештатных и аварийных режимах работы (токовые перегрузки, короткие замыкания (КЗ) и прямые удары линейной молнии [8, 12]) больших плотностей тока ( $10^8$  А/м<sup>2</sup> и более), и соответственно новые области их электротехнологического применения остаются малоизученными. В этой связи разработка и практическое использование новых расчетно-экспериментальных методов обнаружения и изучения квантованных периодических ВЭП и квантованных электронных полуолн де Бройля в металлических проводниках с указанными плотностями электрического тока проводимости являются актуальными научно-техническими задачами.

**Целью статьи** является разработка расчетно-экспериментального метода для обнаружения и изучения квантованных ВЭП и дебройлевских электронных полуолн в металлическом проводнике с импульсным аксиальным током большой плотности.

**1. Постановка задачи исследования ВЭП и дебройлевских электронных полуолн в металлическом проводнике с импульсным током.** Рассмотрим неподвижно размещенный на открытом воздухе прямолинейный круглый сплошной немагнитный металлический проводник радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0 \gg r_0$ . Пусть параметры воздушной среды соответствуют нормальным атмосферным условиям (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура  $T_0$  равна  $0$  °С [10]), а к противоположным концам рассматриваемого проводника с удельной электропроводностью  $\gamma_0$  его материала приложена разность электрических потенциалов, униполярно изменяющаяся во времени  $t$  по произвольному закону. Считаем, что по исследуемому проводнику поперечным сечением  $S_0 = \pi r_0^2$  вдоль его продольной оси протекает импульсный однополярный ток проводимости  $i_0(t)$  амплитудой  $I_{0m}$ , характеризующийся усредненной плотностью  $\delta_0(t)$ . Ограничимся рассмотрением случая, для которого толщина токового скин-слоя  $\Delta_i$  в материале проводника существенно больше его радиуса  $r_0$ . Для приближенного описания поведения дрейфующих свободных электронов проводника, как и в [1-9], воспользуемся известным одноэлектронным приближением, пренебрегающим их взаимным влиянием друг на друга, а также влиянием ионов кристаллической

решетки металла проводника на его коллективизированные электроны [10]. Будем придерживаться той точки зрения, что продольные (радиальные) распределения дрейфующих свободных электронов в исследуемом проводнике подчиняются временным волновым уравнениям Шрёдингера и соответственно их собственным квантованным решениям [10]. Требуется на основе обобщения ранее полученных в [1-9] квантовомеханических результатов, касающихся электрофизических особенностей волнового распределения носителей тока проводимости в однородных проводящих структурах, сформулировать и апробировать в лабораторных условиях расчетно-экспериментальный метод исследования ВЭП и электронных полуолн де Бройля в тонких круглых металлических проводниках с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  аperiодической временной формы и большой плотности  $\delta_0(t)$ .

**2. Предлагаемый метод обнаружения в металлическом проводнике с импульсным током ВЭП и электронных полуолн де Бройля.** Для наглядности и лучшего понимания рассматриваемой электрофизической задачи приведем вначале приближенное квантовомеханическое соотношение для наименьшей ширины  $\Delta z_{nh}$  «горячего» продольного участка в проводящей структуре проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , вызывающим появление в ней усредненной плотности тока с амплитудой  $\delta_{0m} \approx I_{0m}/S_0$  [7, 9]:

$$\Delta z_{nh} \approx e_0 n_{e0} h (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}, \quad (1)$$

где  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль электрического заряда электрона [10];  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [10];  $n_{e0}$  – усредненная плотность свободных электронов в металле проводника до воздействия на него исследуемого импульса электрического тока [10];  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [10].

Из (1), полученного с использованием фундаментального соотношения неопределенности Гейзенберга [10], следует, что ширина  $\Delta z_{nh}$  «горячего» продольного участка проводника практически определяется численным значением амплитуды  $\delta_{0m}$  плотности импульсного тока в его материале. Так, с учетом (1) для медного проводника ( $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup> [10]) при  $\delta_{0m} = 4 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, характерной для штатных режимов работы промышленных электрических сетей перемещенного тока [13], находим, что в нем ширина  $\Delta z_{nh}$  оказывается примерно равной 0,53 м. При  $\delta_{0m} = 4 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>, соответствующей аварийному режиму работы промышленных электрических сетей с протеканием по их токопроводам токов КЗ [13] или штатному режиму работы сильноточных цепей высоковольтных электрофизических установок [11], расчетная ширина  $\Delta z_{nh}$  принимает численное значение около 5,3 мм. При  $\delta_{0m} = 4 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>, характерной для быстрого электрического взрыва (ЭВ) тонких металлических провололок [14], ширина  $\Delta z_{nh}$  «горячего» продольного участка в медном проводнике согласно (1) оказывается численно равной примерно 5,3 мкм. Подобная микроскопическая величина для  $\Delta z_{nh}$  хорошо согласуется с линейными размерами проводящих мелкодисперсных фракций, образующихся в результате ЭВ (сублимации токопроводящих частей) тонких металлических провололок [11, 14]. Кроме того, согласно [15] при экспе-

риментальном исследовании явления быстрого ЭВ в воздухе тонких круглых медных проволочек длиной 60 мм и диаметром 100 мкм путем пропускания по ним от высоковольтного генератора импульсных токов (ГИТ) синусоидального затухающего по экспоненте разрядного импульсного тока большой плотности ( $\delta_{0m} \approx 6,4 \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>) в диспергированных продуктах взрывообразного разрушения твердой меди (в «металлической» плазме) методом скоростного фоторегистрирования были зафиксированы продольные периодические страты, состоящие из слоистой продольной периодической дискообразной структуры различной светимости, содержащей чередующиеся между собой «светлые» шириной  $\Delta z_h$  (34 шт.) и «темные» шириной  $\Delta z_c$  (34 шт.) продольные участки. Данные участки попарно образовывали в разрядном воздушном промежутке указанной высоковольтной цепи ГИТ с «металлической» плазмой шаг периодической структуры ВЭП длиной около  $(\Delta z_h + \Delta z_c) \approx 1,76$  мм [11, 15]. Можно обоснованно предполагать, что в случае исследования в [15] ЭВ тонких медных проволочек «светлые» продольные участки «металлической» плазмы продуктов взрыва в разрядном воздушном промежутке соответствовали «горячим» участкам ВЭП, а их «темные» продольные участки – «холодным» участкам ВЭП. Опытные данные из [15] указывают на достоверность квантовомеханических положений, используемых в основе расчетных оценок в [1-9] волновых распределений дрейфующих свободных электронов и соответственно ВЭП в тонких металлических проводниках.

Приведенные выше оценочные данные свидетельствуют о том, что выявить в лабораторных условиях особенности продольного волнового распределения тока в металлических проводниках можно только в режиме пропускания через них таких постоянных, переменных или импульсных токов  $i_0(t)$ , которые обеспечивают протекание в поперечных сечениях  $S_0$  их электропроводящих материалов лишь относительно больших плотностей тока  $\delta_{0m}$ . Согласно опытными данным из [16] для постоянного тока уровень его плотности в тонком стальном оцинкованном проводе ( $r_0=0,15$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм – толщина наружного защитного цинкового покрытия) при экспериментальном изучении его ВЭП составляет около  $6,8 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>. Из собственного опыта при изучении квантованных ВЭП и электронных полувольт де Бройля в тонком круглом стальном оцинкованном проводе ( $r_0=0,8$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм) с аperiodическим импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  миллисекундной длительности в условиях научно-исследовательской лаборатории, оснащенной мощным высоковольтным ГИТ для формирования на электрической нагрузке длительной С- компоненты тока искусственной молнии [12], следует, что значения  $\delta_{0m}$  численно составляют около  $3,7 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup> [3, 7].

В связи с вышеизложенным предлагаемый расчетно-экспериментальный метод исследования в макроструктуре выбранного с учетом визуализации ожидаемых электрофизических проявлений (квантованных продольных ВЭП и формирующих их электронных полувольт де Бройля) металлического проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  базируется на

использовании указанных квантовофизических закономерностей и электрической схемы высоковольтной разрядной цепи упомянутого ГИТ-С, приведенной на рис. 1. В качестве испытательных образцов (ИО) проводника, включаемых согласно рис. 1 и 2 в высоковольтную разрядную цепь высоковольтного ГИТ-С, используем прямолинейные участки промышленно выпускаемого стального оцинкованного провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) [17]. Наличие в таких ИО сравнительно легкоплавкого тонкого покрытия и тугоплавкого достаточно массивного основания провода обеспечивает при его интенсивном локальном джоулевым нагреве (до температур порядка 1500 °С) опосредованное обнаружение за счет сферообразного вспучивания покрытия на «горячих» продольных участках провода квантованных продольных ВЭП и соответственно электронных дрейфовых полувольт, образующих подобные ВЭП [7, 9].

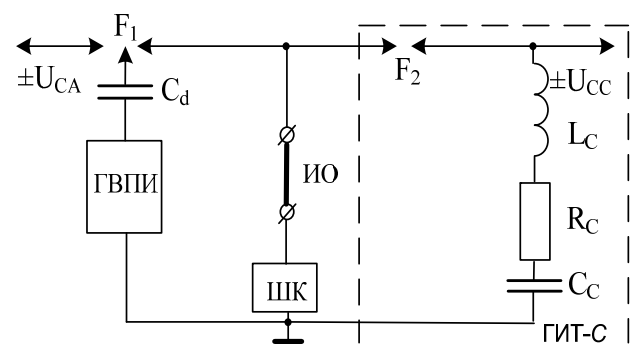


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема высоковольтной разрядной цепи мощного высоковольтного ГИТ-С, примененного для исследования квантованных периодических продольных ВЭП и электронных полувольт де Бройля в испытательном образце металлического проводника (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой до  $\pm 100$  кВ;  $F_1, F_2$  – соответственно трех- и двухэлектродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы;  $C_d$  – разделительная емкость на 180 пФ и импульсное напряжение до  $\pm 120$  кВ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием воздушных искровых коммутаторов  $F_1$  и  $F_2$ ; ИО – испытательный образец металлического проводника; ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения импульсного тока в проводнике;  $\pm U_{CC}$  – зарядное напряжение конденсаторов ГИТ-С;  $\pm U_{CA}$  – зарядное напряжение конденсаторов других ГИТ существующего генератора тока искусственной молнии;  $L_c \approx 11,43$  мГн,  $R_c \approx 4,74$  Ом,  $C_c \approx 45,36$  мФ – соответственно индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи ГИТ-С)

Используемый мощный одномодульный ГИТ-С на номинальную запасаемую электрическую энергию  $W_{C0}=567$  кДж, выполненный согласно схеме рис. 1 на основе 324 параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов ИМ-5-140 (номинальное напряжение  $U_0=\pm 5$  кВ; номинальная емкость  $C_0=140$  мкФ), имеет следующие собственные электрические параметры [12]:  $C_c \approx 45,36$  мФ;  $R_c \approx 4,74$  Ом;  $L_c \approx 11,43$  мГн. Отметим, что в ГИТ-С была применена резистивная защита его конденсаторов от аварийных сверхтоков, реализованная путем размещения на их высоковольтных выводах защитных постоянных объемных графито-керамических резисторов ТВО-60-100 Ом [12, 18]. После заряда до постоянного напряжения

$U_{CC} \leq \pm 4,2$  кВ конденсаторов ГИТ-С (при  $U_{CA}=0$ ) и подачи от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) управляющего микросекундного импульса напряжения амплитудой  $\pm 100$  кВ на управляемый электрод высоковольтного трехэлектродного воздушного искрового коммутатора  $F_1$  каскадного типа со стальными полусферическими электродами и рабочими промежутками длиной 4 и 9 мм, входящего в состав существующего в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» генератора тока искусственной молнии [12], за счет формируемого на ИО провода импульса перенапряжения происходит срабатывание высоковольтного двухэлектродного воздушного искрового коммутатора  $F_2$  с графитовыми прямоугольными электродами и рабочим изоляционным промежутком длиной 3 мм.



Рис. 2. Общий вид круглого сплошного стального оцинкованного провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>), включенного своими концами с помощью болтового соединения в силовую разрядную цепь мощного высоковольтного ГИТ-С и размещенного над теплозащитным асбестовым полотном, до воздействия на него аperiodического импульса аксиального тока  $i_0(t)$  большой плотности

В результате через ИО провода будет протекать импульс тока требуемых АВП. Измерение АВП протекающих через ИО провода импульсов тока  $i_0(t)$  выполняется при помощи цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS 1012 и поверенного метрологической службой измерительного коаксиального шунта (ШК) типа ШК-300 с собственным активным сопротивлением 0,185 мОм и возможностью фиксации нано-, микро- и миллисекундных импульсов тока амплитудой от 10 А до 200 кА [12], включенного согласно рис. 1 в непотенциальную (заземленную) часть силовоточной разрядной цепи ГИТ-С. Используемый нами ШК при штатном измерении в разрядной цепи ГИТ-С длительной аperiodической компоненты тока искусственной молнии имел коэффициент преобразования, равный около  $56,42 \cdot 10^2$  А/В [7, 12].

На рис. 3 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока отрицательной полярности в разрядной цепи ГИТ-С при наличии в ней вместо ИО стального провода штатного эквивалента электрической нагрузки в виде алюминиевого листа толщиной 2 мм и размером в плане  $0,5 \text{ м} \times 0,5 \text{ м}$ . Видно, что при модуле амплитуды  $I_{0m} \approx 835$  А генерируемый в этом случае ( $W_C \approx 400$  кДж;  $U_{CC} \approx -4,2$  кВ) аperiodический импульс тока временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс ( $t_m$  – время, соответствующее  $I_{0m}$ ;  $\tau_p$  – длительность импульса тока на уровне  $0,5I_{0m}$ ) характеризуется полной длительностью  $t_0 \approx 1000$  мс и переносит в силовоточной разрядной цепи ГИТ-С большой электрический заряд, модуль которого равен примерно  $q_C \approx 191$  Кл.

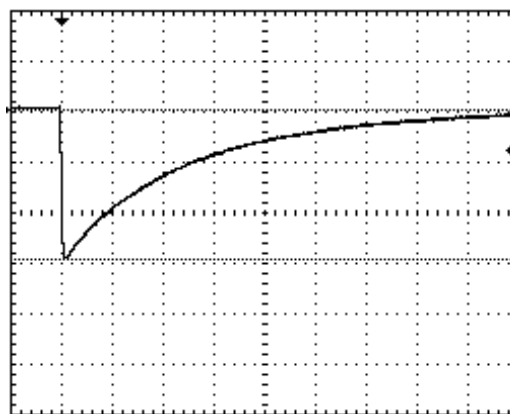


Рис. 3. Осциллограмма аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс, протекающего в разрядной цепи ГИТ-С с эквивалентом электрической нагрузки в виде плоского алюминиевого листа толщиной 2 мм и размером в плане 500 мм x 500 мм ( $W_C \approx 400$  кДж;  $U_{CC} \approx -4,2$  кВ;  $I_{0m} \approx -835$  А;  $t_m \approx 9$  мс;  $\tau_p \approx 160$  мс;  $t_0 \approx 1000$  мс;  $q_C \approx -191$  Кл; масштаб по вертикали – 282 А/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка)

На рис. 4 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности в разрядной цепи ГИТ-С при наличии в ней ИО исследуемого стального оцинкованного провода, теряющего при  $t \geq 380$  мс свою металлическую проводимость из-за интенсивного джоулева нагрева и локального электротермического разрушения его структуры.

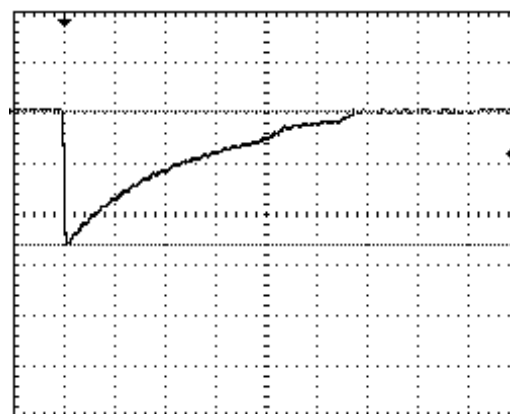


Рис. 4. Осциллограмма воздействующего на электротермически локальным образом разрушаемый исследуемый круглый прямолинейный стальной оцинкованный провод ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) аperiodического импульса аксиального тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой плотности ( $W_C \approx 310$  кДж;  $U_{CC} \approx -3,7$  кВ;  $I_{0m} \approx -745$  А;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $t_m \approx 9$  мс;  $\tau_p \approx 160$  мс;  $t_0 \approx 576$  мс) (масштаб по вертикали – 282 А/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка)

По этой причине полная длительность протекания в ИО провода аperiodического импульса тока временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс в проводимых нами экспериментах не превышала  $t_0 \approx 576$  мс. Заметим, что для проводящей структуры ИО провода при указанных АВП используемых импульсов тока выполняется требуемое по условиям проведения исследований соотношение между величинами  $\Delta_i$  и  $r_0$  [7]:  $\Delta_i/r_0 \approx 2r_0^{-1} [t_m/(\pi\mu_0\gamma_0)]^{1/2} \approx 42$ , где  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная [10], а  $\gamma_0 \approx 8 \cdot 10^6$  См/м – удельная



электропроводность металлического основания используемого в опытах провода [10]. Токовая осциллограмма на рис. 4 ( $W_C \approx 310$  кДж;  $U_{CC} \approx -3,7$  кВ;  $I_{0m} \approx -745$  А) является характерной для всех выполненных нами на ГИТ-С экспериментов по интенсивному джоулевому нагреву ИО стального оцинкованного провода, вызванному слабым рассеянием на атомах кристаллической решетки его металлов электронных полувольт де Бройля [10, 19]. Амплитуда усредненной критической плотности импульса тока  $i_0(t)$  согласно рис. 4 в ИО провода при этом не превышала  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>. Проведенные эксперименты на ГИТ-С показали, что при  $\delta_{0m} > 0,37$  кА/мм<sup>2</sup> происходит полная сублимация электропроводящего материала ИО стального провода, исключая какие-либо визуальные наблюдения в нем ВЭП и электронных полувольт де Бройля [7-9].

На рис. 5-7 показаны внешние виды ИО стального оцинкованного провода сразу после воздействия на них в сильнооточной разрядной цепи высоковольтного ГИТ-С одиночного аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности согласно данным рис. 4 ( $U_{CC} \approx -3,7$  кВ;  $I_{0m} \approx -745$  А;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>).

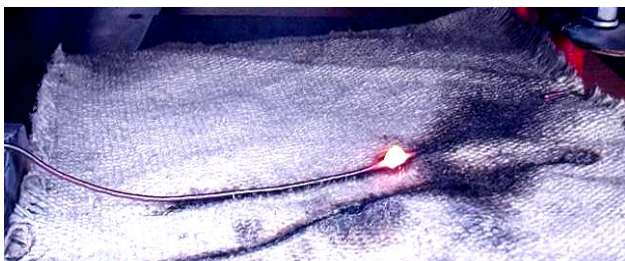


Рис. 5. Внешний вид опытного распределения вдоль стального оцинкованного провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta l_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) остывающих на воздухе и теплозащитном асбестовом полотне макроскопических одного «горячего» (высокотемпературной зоны ВЭП шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм посередине провода) и двух крайних «холодных» (шириной  $\Delta z_{nc} \approx 156,5$  мм при частичной сублимации одного из них) продольных участков после протекания по нему аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой плотности ( $I_{0m} \approx -745$  А;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n=1$ ;  $t_0 \approx 576$  мс) [20]



Рис. 6. Внешний вид опытного распределения вдоль стального оцинкованного провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta l_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) остывающих на воздухе и теплозащитном асбестовом полотне макроскопических трех «горячих» (высокотемпературных зон ВЭП провода шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм) и четырех «холодных» (двух крайних шириной  $\Delta z_{nc} \approx 50$  мм при полной сублимации одного из них и двух внутренних шириной  $\Delta z_{nc} \approx 100$  мм) продольных участков после протекания по нему аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой плотности ( $I_{0m} \approx -745$  А;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n=3$ ;  $t_0 \approx 576$  мс) [20]

Теплофизическое состояние остывающих на воздухе и теплозащитном асбестовом полотне толщиной 3 мм, изготовленном из хризотил-асбеста (температура его плавления составляет около 1500 °С [21]), ИО исследуемого провода указывает на частичную сублимацию их электропроводящей структуры (для цинкового покрытия температура плавления составляет около 419 °С, а кипения – 907 °С [10]; для стального основания эти температуры равны примерно 1535 и 2735 °С соответственно [10]) и наличие в них стохастическим образом возникающих вдоль стального оцинкованного провода от одного воздействия указанного импульсного тока к другому вспученных ярко светящихся сфероподобных квантовых «образований» одинаковой во всех случаях ширины  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм.

Число этих «образований» на рис. 5-7 соответствует квантовому числу  $n = 1, 3, 9$ . Между данными сфероподобными «образованиями», имеющими белый цвет каления стали и соответственно температуру не менее 1200 °С [7, 16], расположены цилиндрические «перешейки» диаметром  $2r_0=1,6$  мм и квантованной шириной  $\Delta z_{nc}$  с визуально неповрежденным из-за импульсного нагрева на них цинковым покрытием. Из-за нагрева указанные «перешейки» вместе с их уцелевшим цинковым покрытием приобретали темный цвет.



Рис. 7. Внешний вид опытного распределения вдоль стального оцинкованного провода ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм;  $\Delta l_0=5$  мкм;  $S_0=2,01$  мм<sup>2</sup>) остывающих на воздухе и теплозащитном асбестовом полотне макроскопических четырех «горячих» (высокотемпературных зон ВЭП провода шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм) и двух внутренних «холодных» (шириной  $\Delta z_{nc} \approx 27$  мм) продольных участков после протекания по нему аperiodического импульса тока  $i_0(t)$  отрицательной полярности временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой плотности ( $I_{0m} \approx -745$  А;  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $n=9$ ;  $t_0 \approx 576$  мс; остальные пять «горячих» и восемь «холодных» продольных участков провода подверглись полной сублимации) [20]

Металлографическое обследование на оптическом микроскопе типа МБС-9 остывших и аккуратно очищенных мягкой тканью цилиндрических «перешейков» ИО провода показало, что они содержат однородное, блестящее и плотно прилегающее к стальному основанию провода цинковое покрытие [7]. Эти опытные данные указывают на то, что максимальная температура нагрева на цилиндрических «перешейках» ИО провода не превышала температуры плавления их цинкового покрытия (не более 419 °С) [10]. Что касается результатов обследования на оптическом микроскопе МБС-9 остывших сфероподобных «образований» ИО провода, то внутри они содержали затвердевшие фракции вспученного цинкового покрытия

тия и расплавленного стального основания провода [7]. В этой связи максимальная температура нагрева на сфероподобных «образованиях» ИО провода составляла не менее температуры плавления его стального основания ( $\geq 1535$  °С [10]). В пользу такого вывода свидетельствует и то, что под всеми естественно остывшими на воздухе сфероподобными «образованиями» ИО провода имело место сквозное проплавление теплозащитного полотна, выполненного из хризотил-асбеста с температурой плавления не менее 1500 °С [21]. Приведенные выше теплофизические результаты выполненных с помощью мощного высоковольтного ГИТ-С и прямолинейных отрезков тонкого стального оцинкованного провода высокотемпературных экспериментов указывают на то, что квантованные сфероподобные «образования» в ИО провода соответствуют «горячим» продольным участкам его квантованных периодических продольных ВЭП, а цилиндрические «перешейки» в ИО провода – «холодным» продольным участкам указанных ВЭП.

Для случая, когда  $n=1$  (рис. 5), квантованная ширина  $\Delta z_{нк}$  каждого из двух крайних «холодных» продольных участков ВЭП, правый из которых подвергся частичной сублимации, в проведенных экспериментах оказалась равной около 156,5 мм. Ширины этих участков совместно с шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм одного «горячего» продольного участка ВЭП, расположенного посередине ИО провода, согласно приведенным в [1-9] закономерностям для ВЭП в металлическом проводнике с электрическим током проводимости образуют для случая  $n=1$  квантованную длину  $\lambda_{enz}/2$  одной электронной полуволны де Бройля, численно равную  $\lambda_{enz}/2 \approx 2\Delta z_{nce} + \Delta z_{nh} \approx 320$  мм. Амплитуда этой электронной полуволны де Бройля соответствует середине ширины  $\Delta z_{nh}$  «горячего» продольного участка ВЭП. Полученные при  $n=1$  опытные данные для квантованного продольного ВЭП и электронной дебройлевской полуволны в ИО исследуемого провода схематически проиллюстрированы нами на рис. 8а. Из (1) при  $n_{e0}=16,82 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  [10] и  $\delta_{0m}=3,7 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$  получаем, что расчетная ширина «горячего» продольного участка указанного ВЭП в исследуемом проводе составляет примерно  $\Delta z_{nh} \approx 5,7$  мм. Расчетная квантовомеханическая оценка ширины крайнего «холодного» продольного участка квантованного продольного ВЭП в исследуемом стальном проводе может быть выполнена по следующему аналитическому соотношению [6]:

$$\Delta z_{nce} \approx l_0 / (2n) - 0,5e_0 n_{e0} h / (m_e \delta_{0m}) [8 + (\pi - 2)^2]. \quad (2)$$

Из (2) при  $n=1$ ,  $n_{e0}=16,82 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  и  $\delta_{0m}=3,7 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$  следует, что  $\Delta z_{nce} \approx 157,1$  мм. Тогда для расчетной длины  $\lambda_{enz}/2 \approx 2\Delta z_{nce} + \Delta z_{nh}$  электронной полуволны де Бройля в изучаемом квантовом случае ( $n=1$ ) имеем:  $\lambda_{enz}/2 \approx 2 \times 157,1 \text{ мм} + 5,7 \text{ мм} \approx 319,9$  мм. Видно, что результаты выполненных высокотемпературных экспериментов для квантового случая  $n=1$  полностью соответствуют данным квантовомеханического расчета ВЭП в исследуемом стальном оцинкованном проводе.

Для случая  $n=3$  (рис. 6) квантованная ширина  $\Delta z_{nce}$  каждого из двух крайних «холодных» продольных участков квантованного продольного ВЭП, левый из которых подвергся полной сублимации, составляет

примерно 50 мм (при их расчетной ширине по (2) в 50,5 мм). Два внутренних «холодных» продольных участка, размещенных в этом случае между соседними «горячими» продольными участками шириной  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм, имели квантованную ширину  $\Delta z_{nci} \approx 100$  мм. Видно, что опытная ширина  $\Delta z_{nci}$  внутренних «холодных» продольных участков в два раза превышает опытную ширину  $\Delta z_{nce}$  крайних «холодных» продольных участков ИО стального провода. Поэтому для квантового случая  $n=3$  опытная квантованная длина  $\lambda_{enz}/2$  электронной полуволны де Бройля в ИО провода будет численно составлять  $\lambda_{enz}/2 \approx \Delta z_{nci} + \Delta z_{nh} \approx 107$  мм. Полученные экспериментальные данные для квантового случая  $n=3$  схематически изображены на рис. 8б.

Из оценочного расчета по (1) при  $n_{e0}=16,82 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  и  $\delta_{0m}=3,7 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$  ширины  $\Delta z_{nh}$  «горячего» продольного участка ВЭП следует, что она остается равной около 5,7 мм. Расчетную квантовомеханическую оценку при  $n=3$  ширины  $\Delta z_{nci}$  внутреннего «холодного» продольного участка ВЭП в исследуемом проводе выполним по аналитическому соотношению вида [6]:

$$\Delta z_{nci} \approx l_0 / n - e_0 n_{e0} h / (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}. \quad (3)$$

Из (3) при  $n=3$ ,  $n_{e0}=16,82 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  и  $\delta_{0m}=3,7 \cdot 10^8 \text{ А/м}^2$  получаем, что  $\Delta z_{nci} \approx 101$  мм. В результате для расчетной длины  $\lambda_{enz}/2 \approx \Delta z_{nci} + \Delta z_{nh}$  электронной полуволны де Бройля применительно к квантовому случаю  $n=3$  находим:  $\lambda_{enz}/2 \approx 101 \text{ мм} + 5,7 \text{ мм} \approx 106,7$  мм. Поэтому можно констатировать, что результаты выполненных экспериментов на ГИТ-С по косвенному обнаружению в тонком стальном оцинкованном проводе квантованных продольных ВЭП и электронных дебройлевских полуволн для квантового случая  $n=3$  также хорошо коррелируют с расчетными данными.

Для квантового случая  $n=9$  (рис. 7) уцелевшие «горячие» продольные участки квантованных ВЭП также имели ширину  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм (при их расчетной ширине по (1) в 5,7 мм). Квантованная ширина  $\Delta z_{nci}$  внутренних «холодных» продольных участков в ИО провода при этом составляла около 27 мм (при их расчетной ширине по (3) в 29,8 мм). В этой связи опытная квантованная длина  $\lambda_{enz}/2$  электронной полуволны де Бройля в ИО стального оцинкованного провода для квантового случая  $n=9$  будет примерно равной  $\lambda_{enz}/2 \approx \Delta z_{nci} + \Delta z_{nh} \approx 34$  мм. На рис. 8с в наглядном схематическом виде отображены соответствующие экспериментальные данные для этого рассматриваемого в ИО провода квантового случая ( $n=9$ ). В данном случае, как и случаях с квантовыми числами  $n=1$  (см. рис. 5) и  $n=3$  (см. рис. 6), середины «горячих» продольных участков квантованных периодических ВЭП соответствуют амплитудам распространяющихся в электропроводящей структуре ИО исследуемого цилиндрического провода квантованных когерентных электронных дебройлевских полуволн. С учетом приведенных данных для расчетного значения при  $n=9$  длины  $\lambda_{enz}/2$  электронной дебройлевской полуволны в ИО провода имеем:  $\lambda_{enz}/2 \approx 29,8 \text{ мм} + 5,7 \text{ мм} \approx 35,5$  мм. Поэтому можно говорить о том, что и в этом квантовом случае ( $n=9$ ) опытные результаты для геометрических параметров «горячих» и «холодных» продольных участков квантованных периодических продоль-

ных ВЭП и соответственно электронных полувольт де Бройля в тонком стальном оцинкованном проводе с аperiодическим импульсом тока временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой плотности ( $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) в пределах 4 % согласуются с соответствующими

данными представленными нами расчетными квантовомеханическими оценками для основных геометрических характеристик ВЭП и дебройлевских электронных полувольт в исследуемом стальном проводе.

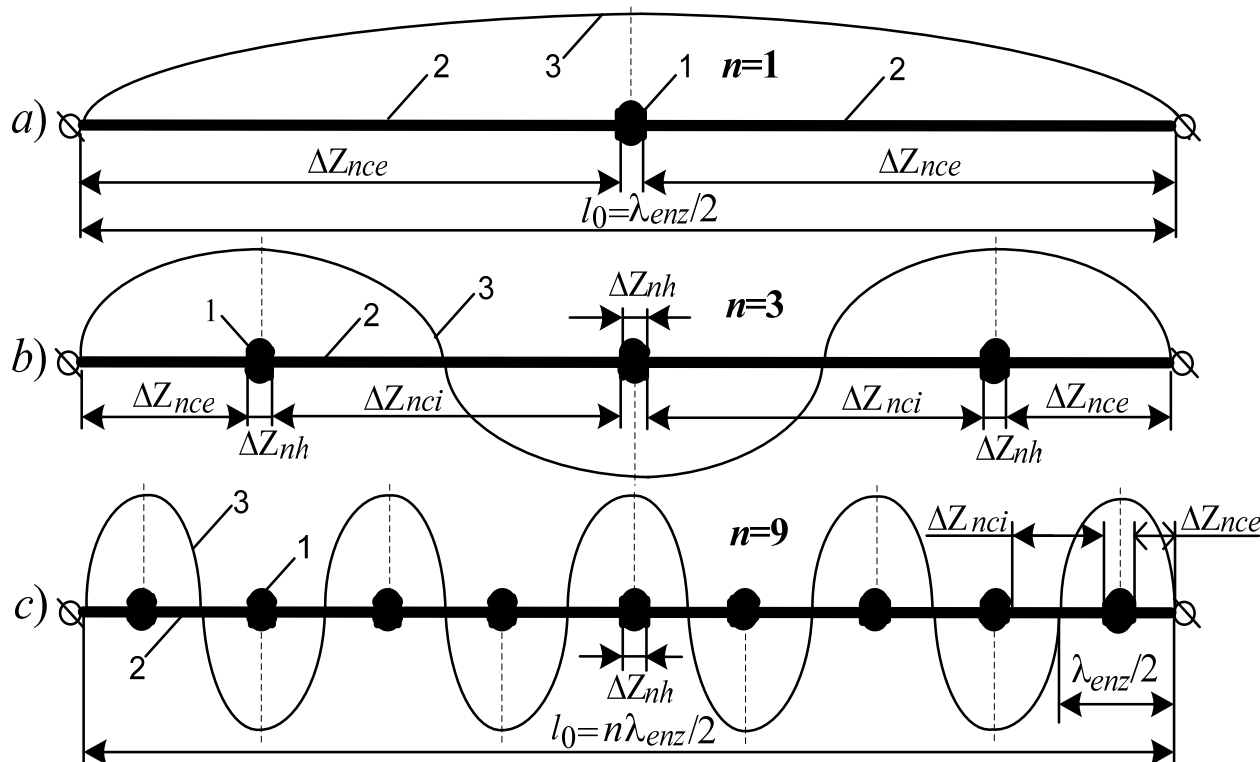


Рис. 8. Упрощенное схематическое изображение полученных экспериментальных данных для «горячих» ( $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм) и «холодных» продольных участков квантованных периодических продольных ВЭП и электронных полувольт де Бройля в ИО круглого стального оцинкованного провода радиусом  $r_0 = 0,8$  мм и длиной  $l_0 = 320$  мм, испытывающих в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТ-С однократное воздействие аperiодического импульса тока временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой плотности  $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup> (1 – «горячий» участок ВЭП; 2 – «холодный» участок ВЭП; 3 – электронная полуволна де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$ ; для а –  $n=1$  и  $\lambda_{enz}/2 \approx 320$  мм; для б –  $n=3$  и  $\lambda_{enz}/2 \approx 107$  мм; для в –  $n=9$  и  $\lambda_{enz}/2 \approx 34$  мм)

### Выводы.

1. Предложен и апробирован в условиях высоковольтной лаборатории расчетно-экспериментальный метод для обнаружения и прямого определения геометрических параметров (в частности, ширины  $\Delta z_{nh}$ ,  $\Delta z_{nce}$  и  $\Delta z_{nci}$ ) «горячих» и «холодных» продольных участков квантованных периодических продольных ВЭП и соответственно опосредованного определения значений квантованных длин  $\lambda_{enz}/2$  ( $n=1,2,3,\dots$ ) их образующих электронных полувольт де Бройля в круглом стальном оцинкованном проводе ( $r_0 = 0,8$  мм;  $l_0 = 320$  мм;  $\Delta_0 = 5$  мкм;  $S_0 = 2,01$  мм<sup>2</sup>), на который в однократном режиме от описанного вкратце мощного высоковольтного ГИТ-С разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» воздействует униполярный импульс аксиального тока временной формы  $t_m/\tau_p \approx 9$  мс/160 мс большой усредненной плотности ( $\delta_{0m} \approx 0,37$  кА/мм<sup>2</sup>).

2. Впервые расчетно-экспериментальным путем для исследуемого круглого стального оцинкованного провода подтвержден важный для фундаментальных основ теории электричества тот электрофизический факт, что в рассматриваемом металлическом проводнике с используемым аperiодическим импульсным аксиальным током проводимости временной формы 9

мс/160 мс и большой плотности (около 0,37 кА/мм<sup>2</sup>) в его продольном направлении распространяются квантованные когерентные электронные полувольты де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$  с установленными в ходе выполненных исследований квантовыми числами  $n=1,3,9$ .

3. Интерференция дебройлевских электронных полувольт вызывает возникновение в электропроводящей структуре исследуемого стального оцинкованного провода квантованных периодических продольных ВЭП макроскопических размеров, середины экспериментально зафиксированных идентичных ширины  $\Delta z_{nh} \approx 7$  мм «горячих» продольных участков которых соответствуют амплитудам указанных квантованных электронных полувольт де Бройля длиной в соответствии с установленным нами соотношением  $\lambda_{enz}/2 \approx l_0/n$  при  $n=1,3,9$  в 320, 107 и 34 мм, а также появление в макроструктуре данного провода неоднородного продольного периодического температурного поля с перепадом температур между его «горячими» и «холодными» продольными участками примерно в 1000 °С.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2005. – №7. – С. 25-33.

2. Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости // *Электротехника*. – 2006. – №7. – С. 29-34.

3. 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.

4. Баранов М.И. Квантовомеханический подход при расчете температуры нагрева проводника электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – №5. – С. 14-19.

5. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – №1. – С. 6.-11.

6. Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макроявления // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №4. – С. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.

7. Баранов М.И. Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током // *Электричество*. – 2014. – №4. – С. 34-42.

8. Баранов М.И. Локальный нагрев токопроводов силового электроэнергетического оборудования при аварийных режимах и токовых перегрузках // *Электротехніка*. – 2014. – №6. – С. 13-17. doi: 10.3103/s1068371214060030.

9. Баранов М.И. Основные характеристики волнового распределения свободных электронов в тонком металлическом проводнике с импульсным током большой плотности // *Электричество*. – 2015. – №10. – С. 20-32.

10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.

11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

12. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – №3. – С. 81-85. doi: 10.1134/s0020441208030123.

13. *Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1* / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.

14. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

15. Соболев Н.Н. Исследование электрического взрыва тонких проволочек // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1947. – Том 17. – №11. – С. 986-997.

16. Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Периодические изменения температуры по длине стальной проволоки, вызванные электрическим током // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. – 2003. – №1. – С. 37-47.

17. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

18. Баранов М.И., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №6. – С. 47-52. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.08.

19. Баранов М.И. Слабое и сильное рассеяние дрейфующих свободных электронов в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №3. – С. 3-8.

20. Баранов М.И. Теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию существования в микроструктуре металлического проводника с током электронных де-

ройлевских полувольт // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №3. – С. 45-49. doi: 10.20998/2074-272X.2014.3.09.

21. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

#### REFERENCES

1. Baranov M.I. Wave distribution of free electrons in conductor with electric current of the conductivities. *Russian Electrical engineering*, 2005, no.7, pp. 25-33. (Rus).

2. Baranov M.I. Energy and frequency specters of the free electrons conductor with electric current conduction. *Russian Electrical engineering*, 2006, no.7, pp. 29-34. (Rus).

3. Baranov M.I. New physical mechanisms and approaches in the study of the formation and distribution of the electric conduction current in the conductor. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2007, no.1, pp.13-19. (Rus).

4. Baranov M.I. Quantum-mechanical approach in the calculation of those temperature heating wire electric conduction current. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2007, no.5, pp. 14-19. (Rus).

5. Baranov M.I. Characteristic radial distribution of free electrons in a cylindrical conductor with varying electric current. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2009, no.1, pp. 6-11. (Rus).

6. Baranov M.I. Quantum-wave nature of electric current in a metallic conductor and some of its electrophysical macrophenomena. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.

7. Baranov M.I. Features heating thin bimetallic conductor large pulse current. *Elektrichestvo*, 2014, no.4, pp. 34-42. (Rus).

8. Baranov M.I. Local heating of electrical pathways of power electrical equipment under emergency conditions and overcurrents. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol.85, no.6, pp. 354-357. doi: 10.3103/s1068371214060030.

9. Baranov M.I. The main characteristics of the wave distribution of free electrons in a thin metallic conductor with a pulse current of high density. *Elektrichestvo*, 2015, no.10, pp. 20-32. (Rus).

10. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).

11. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.

13. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, Kn. 1* [Electrical engineering handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, Book 1. Ed. I.N. Orlov]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 880 p. (Rus).

14. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchynskiy A.V. *Elektricheskij vzryv provodnikov i ego primenenie v elektrofizicheskikh ustanovkakh* [Electric explosion of conductors and its application in electrophysical options]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (Rus).

15. Sobolev N.N. The study of electrical explosion of thin wires. *Journal of experimental and theoretical physics*, 1947, Vol.17, no.11, pp. 986-997. (Rus).

16. Marakhtanov M.K., Marakhtanov A.M. Periodical temperature changes along steel wire length caused by electrical current. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2003, no.1, pp. 37-47. (Rus).

17. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).

18. Baranov M.I., Rudakov S.V. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of



powerful capacity stores of energy from emergency currents. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 47-52. (Rus). doi: [10.20998/2074-272X.2015.6.08](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.08).

19. Baranov M.I. Strong and weak streaming free electron scattering in metallic conductor with electric conduction current. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2010, no.3, pp. 3-8. (Rus).

20. Baranov M.I. Theoretical and experimental results of research into explanation of de Broglie half-wave existence in the microstructure of an active metallic conductor. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.3, pp. 45-49. (Rus). doi: [10.20998/2074-272X.2014.3.09](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2014.3.09).

21. Kuhling H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).

Поступила (received) 01.06.2016

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., гл.н.с.,

Рудаков Сергей Валерьевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841, e-mail: [eft@kpi.kharkov.ua](mailto:eft@kpi.kharkov.ua)

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,

61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438, e-mail: [serg\\_73@i.ua](mailto:serg_73@i.ua)

M.I. Baranov<sup>1</sup>, S.V. Rudakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

<sup>2</sup> National University of Civil Protection of Ukraine, 94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

**Calculation-experimental method of research in a metallic conductor with the pulse current of electronic wavepackages and de Broglie electronic half-waves.**

**Purpose.** Development of calculation-experimental method for a discovery and study of electronic wavepackages (EWP) and of de Broglie electronic half-waves in a metallic conductor with

the pulse axial-flow current of high density. **Methodology.** Theoretical bases of the electrical engineering, bases of quantum physics, electrophysics bases of technique of high voltage and large pulse currents, and also bases of technique of measuring of permanent and variable electric value. **Results.** On the basis of generalization of results of research of features of the longitudinal wave periodic distributing of negatively charged transmitters of electric current of conductivity in the thin round continuous zincked steel wire offered and approved in the conditions of high-voltage laboratory method for a discovery and direct determination in him of geometrical parameters of «hot» and «cold» longitudinal areas quantized periodic longitudinal EWP and accordingly the mediated determination of values of the quantized lengths formative their de Broglie electronic half-waves. It is shown that results of close quantum mechanical calculations of EWP and quantized lengths  $\lambda_{enz}/2$  of longitudinal de Broglie half-waves for the probed wire long  $l_0$  well comport with the results of the executed high temperature experiments on the powerful high-voltage generator of homopolar large pulse current of millisecond duration. **Originality.** First calculation-experimental a way the important for the theory of electricity fact of existence is set in a round metallic explorer with the impulsive axial-flow current of the quantized coherent de Broglie electronic half-waves, amplitudes of which at the quantum number of  $n=1,3,9$  correspond the middles of «hot» longitudinal areas of EWP. Calculation quantum mechanical correlation of type of  $\lambda_{enz}/2=l_0/n$  got experimental confirmation, in obedience to which on length of  $l_0$  conductor the integer of quantized electronic half-waves is always laid de Broglie. **Practical value.** The use of the offered method allows to expose electro-technological possibilities of practical application of features sharply not homogeneous periodic wave longitudinal distributing of drifting lone electrons and accordingly by them the conditioned thermal field in round metallic conductors with the electric axial-flow current of high-slay. References 21, figures 8.

**Key words:** metallic conductor, pulse current, electronic wavepackage, de Broglie electronic half-wave, calculation-experimental investigation of electronic processes in the conductor.