

ОЛИВЕР ХЕВИСАЙД И ЕГО ВКЛАД В МИРОВУЮ СОКРОВИЩНИЦУ НАУКИ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, E-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

Наведено короткий нарис про наукову діяльність визначного англійського фізика Хевісайда, який мав важливу роль у розвитку класичної електродинаміки, операційного обчислення та теорії провідного та без провідного електрозв'язку.

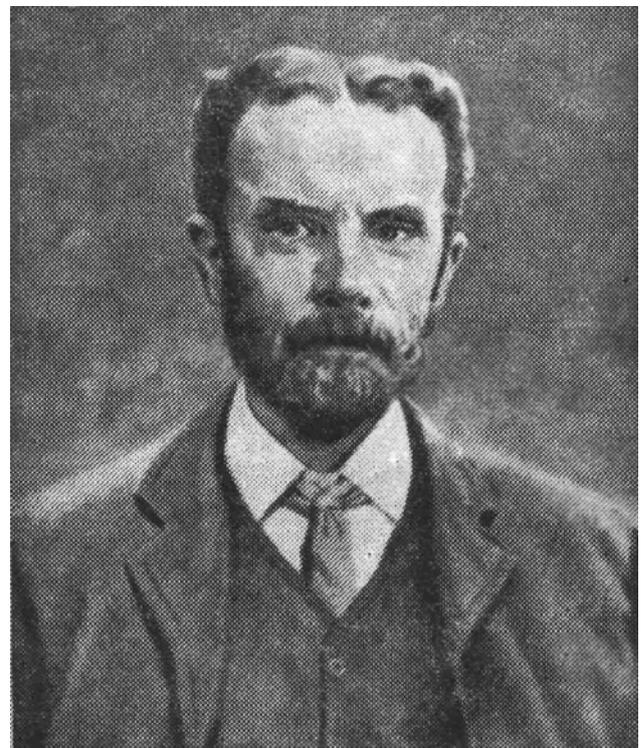
Приведен краткий очерк о научной деятельности выдающегося английского физика Хевисайда, сыгравшего важную роль в развитии классической электродинамики, операционного исчисления и теории проводной и беспроводной электросвязи.

К 155-летию со дня рождения выдающегося физика Оливера Хевисайда посвящается.

ности, своей футбольной командой, имеющей высокий спортивный рейтинг в Европе).

ВВЕДЕНИЕ

Оливер Хевисайд родился 18 мая 1850 года в г. Лондоне в семье английского художника. В связи с тем, что его семья была не богатой он смог закончить в 1866 году только неполную общедоступную среднюю школу (*Elementary School*) [1]. На продолжение дальнейшего образования в частной школе и получение затем Оливером высшего образования денег у его родителей не было. Поэтому Оливер с 1866 по 1868 годы занимался дома, самостоятельно изучая естественные науки и иностранные языки. Все то, что сделал и чего достиг в будущем О. Хевисайд в области электродинамики, математики и электротехники – это результат его усердного и постоянного самообразования на протяжении всей долгой жизни. Автору на память почему-то сразу "приходят" слова из сегодняшней жизни, касающиеся известного девиза Болонского процесса в новой европейской системе образования граждан нашего континента: "*Обучение человека в течение всей его жизни*" [2]. Уже одним этим О. Хевисайд резко выделяется из плеяды выдающихся ученых мира. В детстве Оливер, как и многие подростки, неплохо рисовал. Отец пытался обучить его своему ремеслу и возлагал на него определенные надежды. Однако интересы сына уже в юношеском возрасте быстро обратились от искусства к науке об электричестве. Этому, возможно, есть одно вероятное объяснение: Оливер приходился родственником известному английскому физика Чарльзу Уитстону, автору многих исследований по акустике, оптике, электричеству и магнетизму. С именем этого физика, в частности, связан известный прибор для измерения омического сопротивления электроэлементов–мостик Уитстона, использующий мостовую электросхему и метод сравнения с мерой измеряемой величины [3]. Кроме того, Ч. Уитстон был одним из основателей в Англии практической телеграфии, что, по-видимому, имело свое определенное влияние на будущие научные интересы О. Хевисайда. По крайней мере, в начале его творческого пути. С 1870 по 1874 годы Оливер проработал оператором-телеграфистом в г. Ньюкасле (этот английский город сейчас нам известен, в част-



Оливер Хевисайд (1850г.–1925г.)

(С портрета художника Френсиса Ходжа, написанного в 1945 году с небольшой фотографии Оливера)

Проводные линии связи того времени имели небольшую пропускную способность, составляющую порядка сотни слов в одну минуту. В этом опытным путем убеждался и сам Оливер, определяя в этот период своей трудовой деятельности электрические характеристики проложенных его телеграфной компанией кабельных линий связи. Забегая несколько вперед, отметим, что примерно через 20 лет (к 1894 году) О. Хевисайдом была разработана полная теория распространения электрического сигнала по кабельной линии связи, позволившая повысить ее пропускную способность во много раз. В 1874 году О. Хевисайд оставляет работу оператора-телеграфиста в г. Ньюкасле и возвращается в г. Лондон. В это время для него еще совсем молодого и целеустремленного ра-

ботника на первый план выступают отчетливо проявляющиеся научные интересы. В дальнейшем постараемся вкратце, исходя из литературных возможностей и научного "багажа" знаний автора, а также известных научно-исторических данных по рассматриваемым нами областям физики, дать объективное и непредвзятое представление о малоизвестном для нас О. Хевисайде как об ученом, так и о человеке.

1. ПЕРВЫЕ ШАГИ ОЛИВЕРА В НАУКЕ

О. Хевисайд еще в 1868 году, за два года до поступления на работу в телеграфную компанию г. Ньюкасла, в доме своего отца оборудовал физическую лабораторию и занялся экспериментами по электричеству. Его первая научная работа, опубликованная в 1872 году в солидном английском журнале *"Philosophical Magazine"*, была посвящена уточненному измерению электрического сопротивления проводников в схеме типа мостика Уитстона [1]. Заметим, что выдающийся английский физик Джеймс Клерк Максвелл в своей итоговой двухтомной книге *"Трактат об электричестве и магнетизме"* [4] (см. том I, главу "Измерение электрического сопротивления", §351) ссылается на данные экспериментальные результаты О. Хевисайда. Причем, последний оказался единственным специалистом по электромагнетизму, кого Д.К. Максвелл упоминает в указанном фундаментальном трактате. Эти научные достижения О. Хевисайда являются, пожалуй, самым малым из того, что он сделал в теории электричества и магнетизма. В домашней лаборатории О. Хевисайд проводил также и опыты по исследованию и улучшению микрофонов различных конструкций [5]. В период с 1873 по 1876 годы им был проведен комплекс теоретических и экспериментальных работ по дуплексной телеграфии. До этих работ Оливера передача электрических сообщений по телеграфной линии осуществлялась симплексным методом, то есть поочередно то в одном, то в другом направлениях. О. Хевисайд в 1873 году теоретически и практически показал, что по одной и той же телеграфной линии можно одновременно вести как передачу одного сообщения, так и прием другого, то есть использовать дуплексный метод [1]. Заметим, что идея дуплексной телеграфии впервые была выдвинута в 1853 году английским доктором Джинглом. Однако из-за возникших технических трудностей при физической реализации этой идеи к ней практически 20 лет никто не обращался. Следует указать то, что для того времени дуплексная линия связи, созданная на основе идей О. Хевисайда, была важным техническим решением, вдвое увеличивающим объем передаваемой по линии информации. В 1876 году О. Хевисайд получает известность в кругах специалистов электросвязи и в этом же году избирается членом авторитетного совета Общества телеграфных инженеров Англии. В 1881 году О. Хевисайд, не посетивший ни одного заседания этого совета и не плативший членских взносов, был исключен из его списков [1,6]. В это время он всецело был поглощен разносторонними научными электрофизическими интересами, а все другие занятия казались ему пустой тратой времени.

2. РАЗВИТИЕ ХЕВИСАЙДОМ ОПЕРАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

В 1862 году наш соотечественник, российский математик украинского происхождения М.Е. Ващенко-Захарченко в своей книге *"Символическое исчисление и приложение его к интегрированию линейных дифференциальных уравнений"* показал, что линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами могут быть проинтегрированы с помощью операторного метода – интегрального преобразования П.С. Лапласа [7-9]. Как известно, этот математический метод состоит в том, что посредством определенных преобразований от исходного дифференциального уравнения, содержащего неизвестную и изменяющуюся во времени t функцию, переходят к вспомогательному алгебраическому уравнению, справедливому в так называемом пространстве изображений и допускающему получение относительно быстрого решения. Затем, с помощью последнего и обратного интегрального преобразования находят в так называемом пространстве оригиналов временное решение искомого дифференциального уравнения. Согласно имеющимся историческим данным О. Хевисайду был известен операторный метод известного французского математика и физика П.С. Лапласа (прямое и обратное интегральное преобразование по Дж.Р. Карсону появилось в конце активной научной и трудовой деятельности О. Хевисайда [1]). В свое время вышеупомянутый известный английский математик Дж.Р. Карсон обратил внимание специалистов на то, что интегральное преобразование П.С. Лапласа составляет основу операционного исчисления как О. Хевисайда, так и им самим предложенного преобразования [1]. Справочно заметим, что Дж.Р. Карсон в 1926 году ввел в операционное исчисление теорему свертки, которой не было у О. Хевисайда. Кроме того, во второй половине XIX века уже было известно и то, что переходные процессы в линейных электрических цепях с постоянными параметрами как раз и описываются указанными выше дифференциальными уравнениями [9,10]. Учитывая это обстоятельство, О. Хевисайд существенно развил, усовершенствовал и первым применил этот математический метод для практических расчетов переходных процессов в электрических цепях. Отметим, что при этом разработанный подход О. Хевисайда использовал без строгого математического обоснования и доказательства, что нередко ставилось ему в вину. К этому следует добавить то, что последнее было позже сделано другими учеными, работавшими после Оливера Хевисайда в области операционного исчисления (в частности, известным английским математиком Т. Бромвичем, который в 1916 году строго обосновал операционное исчисление О. Хевисайда с помощью того же интегрального преобразования П.С. Лапласа) [1,11]. Кстати, Т. Бромвич, разработавший свой метод контурных интегралов, в конце концов, пришел к тому выводу, что при вычислениях специалистами удобнее все же для более быстрого и легкого получения требуемого решения научно-технической задачи использовать именно подвергнутый в свое время в Англии строгой критике известных кембриджских математиков опе-

раторный метод О. Хевисайда в его первоначальном виде [1]. Несмотря на все трудности, операционное исчисление О. Хевисайда нашло свое практическое использование и применяется при анализе процессов в электрических цепях в некоторых случаях и поныне [9,10]. Хотя со временем операционное исчисление О. Хевисайда вытеснялось и все интенсивнее вытесняется более общим и строгим, с математической точки зрения, интегральным преобразованием П.С. Лапласа. Несмотря на это, нам, благодарным потомкам этого гениального английского "самородка" и ученым-последователям, работающим в той или иной области физики, следует воздать должное О. Хевисайду за его значительный вклад в развитие операторного метода и расширение практических приложений этого удобного математического метода, а также за его исключительную человеческую стойкость. При этом нам не следует забывать и тех разного рода возникавших у нашего героя затруднений (от личностной неприязни до многолетнего блокирования его научных публикаций) и того просто не понимания, даже со стороны физиков и математиков, которые существенно усложняли и без того тяжелую жизнь О. Хевисайда и на долгие годы помешали уверенно занять этому методу достойное место в расчетном арсенале научно-технических работников, специализирующихся в области электродинамики и электротехники. Перейдем теперь к краткому описанию основных достижений О. Хевисайда в области теории линейных электрических цепей, рассчитываемых операторным методом.

Для общности рассмотрения вначале представим себе линейную электрическую цепь, находящуюся в равновесии (токи и электрические заряды в ее элементах тождественно равны нулю). Для данной цепи одной из основных электротехнических задач является отыскание мгновенных значений тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ в ее электрических элементах при приложении к ней (цепи) некоторой электродвижущей силы (ЭДС) $E(t)$ в момент времени $t = 0$. Применительно к расчету такой электрической цепи О. Хевисайдом была введена изображенная на Рис.1 простейшая временная функция $1(t)$ – единичная ступенчатая функция ("единичная функция Хевисайда") [1,11]. Согласно определению единичная функция $1(t)$ имеет следующие численные значения [8,11]:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

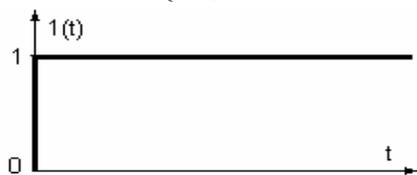


Рис.1. Единичная ступенчатая функция $1(t)$

Далее, используя понятие единичной ступенчатой функции $1(t)$, О. Хевисайд впервые применил очередное новое понятие – переходной реакции $A(t)$ электрической цепи на воздействие единичной функ-

ции $1(t)$. Зная переходную реакцию $A(t)$ электрической цепи, О. Хевисайд предложил при воздействии на рассматриваемую цепь произвольно изменяющейся во времени t функции ЭДС $E(t)$ мгновенное значение тока $i(t)$ в ней находить по одному из следующих выражений [11]:

$$i(t) = E(0) \cdot A(t) + \int_0^t A(t-\tau) \cdot E'(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$i(t) = E(0) \cdot A(t) + \int_0^t A(\tau) \cdot E'(t-\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $E(0) = E(t) \Big|_{t=0}$; $A(t-\tau) = A(t) \Big|_{t=t-\tau}$;

$$E'(\tau) = \frac{dE(t)}{dt} \Big|_{t=\tau}; \quad E'(t-\tau) = \frac{dE(t)}{dt} \Big|_{t=t-\tau}.$$

Формулы (2) и (3) показывают, что при известной (заданной) функции воздействующего переменного напряжения $E(t)$ знание переходной реакции $A(t)$ электрической цепи вполне достаточно для вычисления в ней значений переменного тока $i(t)$ от действия на исследуемую электрическую цепь различных ЭДС $E(t)$ переменного или постоянного во времени t характера. Применяя в дальнейшем свое операционное исчисление, базирующееся все же на интегральном преобразовании П.С. Лапласа (объективности ради надо подчеркнуть, что как показывает проведенный автором беглый анализ некоторых литературных источников того времени герой нашего очерка весьма слабо работал с научно-технической литературой и порой просто не учитывал важных работ своих предшественников в соответствующих областях знаний), О. Хевисайд показал, что рассматриваемая нами переходная реакция $A(t)$ исследуемой цепи связана с обобщенным или операторным сопротивлением $Z(p)$ указанной выше электрической цепи следующим уравнением [11]:

$$Z^{-1}(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} A(t) dt, \quad (4)$$

где p – комплексная переменная (в современной терминологии это оператор Лапласа), имеющая в системе СИ размерность, равную c^{-1} ; t – вещественная переменная, c .

Из (4) видно, что переходная реакция $A(t)$ имеет размерность $1/\text{Ом}$ и в нашем случае физически представляет собой переходную проводимость $Y(t)$ электрической цепи [8,11]. В этой связи выражения (2) и (3) О. Хевисайда для тока $i(t)$ соответствуют современному и общепринятому сейчас в теоретической электротехнике названию интеграла Дюамеля или интеграла наложения [8]. Кроме того, из (4), согласно интегральному преобразованию П.С. Лапласа, следует:

$$A(t) \longrightarrow 1/p \cdot Z(p). \quad (5)$$

Заметим, что в соответствии с интегральным преобразованием Хевисайда– Карсона в отличие от (5) $A(t) \longrightarrow 1/Z(p)$. Таким образом, определив сравнительно легко операторное сопротивление $Z(p)$ для электрической цепи, согласно О. Хевисайду с помощью (5) или записанного в предыдущем предложении соответствия между $A(t)$ и $Z(p)$ и методов его операционного исчисления (фактически обратного интегрального преобразования П.С. Лапласа) можно определить и переходную реакцию $A(t)$ данной цепи на воздействие единичной функции $1(t)$, а затем с помощью (2) или (3) найти в ней ток $i(t)$ от действия на цепь различных ЭДС $E(t)$. Такой подход в определении значений тока $i(t)$ в электрической цепи, испытывающей воздействие произвольной ЭДС $E(t)$, был новым и эффективным методом решения электротехнических задач. Он и поныне с успехом используется в задачах электротехники, электродинамики и электрофизики [8-11].

Развивая понятие единичной функции $1(t)$, О. Хевисайд в 1899 году для расчета электрических цепей импульсной техники ввел понятие единичной импульсной функции $\delta(t)$, определяемой следующим образом [1,12]: $\delta(t) = \infty$ при $t=0$ и $\delta(t)=0$ при $t \neq 0$,

причем $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$. Из данного определения для

"единичной импульсной функции Хевисайда" $\delta(t)$ [1,12] вытекает, что $\delta(t) = d[1(t)]/dt$. Заметим, что заново введенная в 1926 году без ссылки на О. Хевисайда великим английским физиком-теоретиком П.А. Дираком дельта-функция, по существу аналогичная функции $\delta(t)$, так и осталась в истории физики под названием "дельта функция Дирака" [13]. Справедливости ради отметим, что согласно историческим материалам те работы О. Хевисайда, где им применялась единичная импульсная функция $\delta(t)$, остались Полю Дираку неизвестными (подобное стечение обстоятельств в научной деятельности таких двух английских "гигантов творческой мысли" вызывает у нас только большое удивление и сожаление) [1].

В интегральном преобразовании Пьера Лапласа наибольшую трудность, как известно, составляет отыскание оригинала функции $h(t)$ по ее известному операторному изображению $H(p)$. Для случая, когда операторное изображение $H(p)$ искомой функции $h(t)$ представляет собой рациональную дробь, где ее числитель $f(p)$ и знаменатель $p \cdot F(p)$ являются полиномами оператора Лапласа p , причем, если $F(p)$ – полином m -ой степени и имеющий лишь некрратные простые корни a_n и не равные нулю, а $f(p)$ – любой полином более низкой по сравнению с полиномом $F(p)$ степени, О. Хевисайдом для оригинала $h(t) \longrightarrow H(p) = f(p)/p \cdot F(p)$ было получено сле-

дующее выражение, вошедшее в историю математики и электротехники как "теорема разложения Хевисайда" [9,11]:

$$h(t) = f(0) F^{-1}(0) + \sum_{n=1}^m f(a_n) e^{a_n t} \left[a_n F'(a_n) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $F'(a_n) = \left. \frac{dF(p)}{dp} \right|_{p=a_n}$; $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_m$ –

корни уравнения $F(p) = 0$.

Для сравнения заметим, что в современной электротехнической редакции теорема разложения, например, для простейшей рациональной дроби вида $h(t) \longrightarrow H(p) = N(p)/M(p)$, когда уравнение $M(p) = 0$ имеет один нулевой корень и не имеет кратных корней и корней, равных корням уравнения $N(p) = 0$, принимает такой весьма схожий по форме записи с (6) вид [8]:

$$h(t) = N(0) \left[M'(0) \right]^{-1} + \sum_{k=2}^n N(p_k) e^{p_k t} \left[M'(p_k) \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $p_1 = 0, p_2, p_3, \dots, p_k, \dots, p_n$ – корни уравнения

$$M(p) = 0; \quad M'(p_k) = \left. \frac{dM(p)}{dp} \right|_{p=p_k}$$

С учетом даже тех изложенных выше весьма кратких научных данных из области операторного метода можно говорить о том, что О. Хевисайдом было существенно развито операционное исчисление, эффективно используемое и сейчас при решении линейных дифференциальных уравнений математической физики [8,10]. Этот математический метод в дальнейшем нашел также свое широкое применение и в технике при решении разнообразных физических задач, в частности, в теории стационарной и нестационарной теплопроводности и диффузии электромагнитного поля в проводящие среды [11], в задачах электротехники [10,14], в теории распространения радиоволн [15], при изучении переходных процессов в проводных линиях связи и линиях электропередачи [9], а также при исследовании волновых процессов в высоковольтных длинных формирующих и воздушных полосковых линиях, генерирующих мощные электромагнитные поля для испытания на электромагнитную стойкость различных технических средств [16,17].

3. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ, РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ХЕВИСАЙДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА

В 1873 году О. Хевисайд поверхностно ознакомился с вышедшей из печати в двух томах указанной нами ранее итоговой книгой Д.К. Максвелла [4]. Этот трактат по электромагнетизму поразил его и определил всю его дальнейшую жизнь. Так как О. Хевисайд в школе изучал лишь элементарную математику, то ему понадобилось несколько лет упорной работы для того, чтобы подробно разобраться в этой действительно сложно написанной фундаментальной книге Д.К. Максвелла. Вероятно, желание изучить теорию электромагнитного поля Д.К. Максвелла и заставило

О. Хевисайда уйти в 1874 году из вышеупомянутой телеграфной компании. К этому следует добавить то, что после этого случая он до конца своей жизни так больше ни на какую другую работу официально и не устраивался [1,5]. Отметим, что новая теория электромагнетизма, основанная на физических воззрениях гениального английского физика Майкла Фарадея, Д.К. Максвеллом создавалась в период с 1855 по 1865 годы [18,19]. Несмотря на то, что все основные уравнения его электродинамики содержались в ряде опубликованных им в этот период научных статей, главную роль в дальнейшей судьбе этой теории, относящейся к теории "близкодействия", играла обобщающая двухтомная книга "Трактат об электричестве и магнетизме" [4]. По ней, главным образом, и знакомились последующие поколения физиков с теорией поля Д.К. Максвелла. Практически до 1883 года мировые физические школы не поддерживали своими научными трудами данную теорию Д.К. Максвелла. Эту теорию тогда научный мир, по-видимому, просто не понимал [1,19].

С 1883 года положение с теорией Д.К. Максвелла начинает меняться в лучшую для науки сторону: в этом году профессор Дублинского университета (Ирландия) Д.Ф. Фицджеральд вычислил электромагнитную энергию излучения простейшего излучателя – кругового витка с током, изменяющимся по гармоническому закону [1,18]. Энергия оказалась прямо пропорциональной четвертой степени частоты тока. Поэтому для осуществления опытов по излучению и изучению электромагнитных волн от этого витка в последнем требовалось создавать переменный ток как можно большей частоты. Д.Ф. Фицджеральд предложил для этой цели использовать разряд предвременно заряженного высоковольтного конденсатора через электрическую цепь с малым сопротивлением. Следует заметить, что эта теоретическая работа Д.Ф. Фицджеральдом была выполнена практически за три года до начала в 1886 году знаменитых опытов выдающегося немецкого физика Генриха Герца, приведших его к открытию в 1888 году электромагнитных волн [18]. Кроме того, в 1883 году известный английский физик Д.Г. Пойнтинг решил электродинамическую задачу об энергии, переносимой электромагнитным полем и опубликовал ее лишь в 1885 году в научных трудах английского Королевского общества [13,18]. Важно отметить, что подобная задача, применительно к движению энергии в твердых упругих телах, была в 1874 году (как видим, задолго и независимо от Д.Г. Пойнтинга) теоретически рассмотрена, решена и опубликована русским физиком Н.А. Умовым [13]. Недаром в настоящее время вектор плотности мощности потока электромагнитной энергии \vec{S} носит название вектора Умова-Пойнтинга [20].

В 1885 году О. Хевисайд начал цикл своих исследований по систематизации электромагнитной теории Д.К. Максвелла и ее практическому применению к решению прикладных задач в области электрических и магнитных явлений. В первый же год своей работы им также независимо от Д.Г. Пойнтинга было введено понятие потока электромагнитной энергии

[1,21]. В разработке этого понятия он пошел дальше Д.Г. Пойнтинга и рассмотрел ряд практически важных случаев для электротехники (например, выделение тепла в проводнике при прохождении по нему электрического тока). Для указанного случая О. Хевисайд впервые показал, что тепло в проводнике выделяется за счет потока энергии электромагнитного поля, втекающего снаружи (из окружающего проводник пространства) внутрь проводника через его боковую поверхность [1,21]. Далее О. Хевисайд рассмотрел распределение переменного электрического тока в проводнике и аналитически показал, что это распределение по поперечному сечению проводника носит неравномерный характер. По его мнению: "...Величина тока растет по мере удаления от середины сечения проводника и по мере приближения к его поверхности" [1,21]. Причем, как указывал О. Хевисайд: "...Чем быстрее меняется во времени t электрический ток, тем сильнее он прижимается к поверхности проводника" [1,21]. Позднее это явление получило название "skin-effect": скин-эффекта или поверхностного эффекта [20]. В наше время в связи с интенсивным развитием техники больших импульсных токов, сильных электрических и магнитных полей этому как линейному, так и нелинейному эффекту в переходном режиме уделяется повышенное внимание [22-24]. При углубленном изучении этого электромагнитного явления нынешним исследователям не следует забывать того факта, что у истоков его открытия и начала изучения первым стояло имя Оливера Хевисайда.

Занимаясь электромагнитной теорией Д.К. Максвелла и ее приложением к движущимся телам, О. Хевисайд первым в 1889 году без подробного вывода получил выражение для электродинамической силы, действующей на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле [25]. Интересно отметить, что это же выражение позднее в 1892 году было получено знаменитым голландским физиком-теоретиком Г.А. Лоренцем, которое в истории физики так и осталось под названием "силы Лоренца" [1,13].

В середине XIX столетия телеграф и телефон прочно вошли в жизнь общества передовых стран мира. В 1858 году был успешно проложен первый трансатлантический кабель связи. Теория передачи электрического сигнала по кабелю при ряде упрощающих допущений была еще в 1855 году разработана выдающимся английским физиком У. Томсоном (Кельвином) [1,13]. Согласно этой теории телефонная связь без искажений была возможна лишь на малых расстояниях. О. Хевисайда заинтересовала эта проблема и он начал подробные и углубленные теоретические исследования распространения электрического сигнала вдоль проводной линии. Вскоре им была уточнена теория У. Томсона (Кельвина) по распространению электромагнитных волн в телеграфной и телефонной линиях связи. Для читателя важно отметить, что при этом О. Хевисайд кроме электрической емкости C_0 и активного сопротивления R_0 на единицу длины линии впервые дополнительно учел погонную индуктивность L_0 и погонную проводимость

утечки G_0 линии [1,21]. С учетом такого подхода и исходя из уравнений Д.К. Максвелла, О. Хевисайд первым вывел волновое (телеграфное) уравнение, описывающее распространение электромагнитных волн по кабелю связи. На основании данного телеграфного уравнения он получил ряд его точных аналитических решений для практически важных случаев технической реализации и реально встречающихся на практике режимов работы проводной линии связи. При этом им были рассмотрены и вопросы трансформации сигналов в неоднородных линиях, отражения сигналов от конца линии, излучение энергии от конца линии связи в открытое воздушное пространство и многое другое [12].

В 1887 году О. Хевисайд расчетным путем показал, что если для указанных выше погонных параметров линии связи выполняется соотношение вида $R_0 \cdot C_0 = L_0 \cdot G_0$, то электромагнитные волны всех частот будут распространяться вдоль кабеля связи с одинаковой фазовой скоростью и с одинаковым затуханием, то есть без изменения своей формы. Оценив электрические параметры основных реально действующих в мире линий связи, О. Хевисайд пришел к выводу о том, что для этих линий произведение $L_0 \cdot G_0$ оказывается намного меньшим, чем это необходимо для связи без искажений. После анализа полученных данных он делает заключение: "...Условие связи по проводной линии без искажений можно выполнить в случае существенного увеличения индуктивности линии" [21]. Для технической реализации этой идеи были разные пути. Одним из них явилось сформулированное в 1893 году предложение О. Хевисайда о включении в линию связи сосредоточенных индуктивных катушек на определенных и равных расстояниях друг от друга [1,21]. Проведенные в 1899 году экспериментальные исследования профессора Колумбийского университета (США) М. Пьюпина, создавшего первую опытную линию связи, нагруженную по указанной выше идее О. Хевисайда с увеличением индуктивности линии, полностью подтвердили теорию последнего по распространению электромагнитных волн вдоль проводных линий связи. Эти исследования О. Хевисайда и их результаты в целом заметно продвинули во всем мире важное дело телеграфии и телефонии на большие расстояния. Здесь надо заметить, что соответствующие патенты на изобретения М. Пьюпин получил единолично, хотя в своих работах он приоритет идеям по неискажающим линиям связи отдавал О. Хевисайду [1,26]. Соответственно и всеми материальными выгодами от получения этих патентов М. Пьюпин тоже воспользовался единолично, продав их американской компании "American Telephone and Telegraph Company" [1]. Который раз подтвердились слова О. Хевисайда о самом себе, связанные с тем, что: "...Он является филантропом и его задача – приносить пользу людям, даже тем, кто получает от этого выгоду" [1].

Относительно важности этих работ О. Хевисайда по отношению к нашему времени отметим, что современные телефонные кабельные линии связи на большие расстояния не нагружаются индуктивными

катушками. Связано это с тем, что в них сейчас применяются токи высокой несущей частоты, которые модулируются по амплитуде или фазе звуковыми колебаниями человеческой речи. Для высокой несущей частоты нет надобности в индуктивной нагрузке. Однако для телефонных кабельных линий сравнительно небольшой протяженности установка генераторов высокой несущей частоты становится мерой экономически невыгодной и в этих случаях по-прежнему используются эквидистантно расположенные катушки индуктивности [1,21]. После короткого ознакомления с всемирной историей развития телеграфной и телефонной электросвязи становится понятным, что "триумф телефона" в современном человеческом обществе был в решающей степени обеспечен новыми идеями и теоретическими разработками О. Хевисайда, смело реализованными в практику менеджерами и инженерно-техническими работниками соответствующих компаний и служащими правительственных учреждений разных стран мира.

Математические основы новой теории поля Д.К. Максвеллом по существу изложены в его указанном выше трактате в 9 главе под названием "Основные уравнения электромагнитного поля" [4]. Здесь Д.К. Максвелл в число основных уравнений поля включил ряд определений и некоторые частные законы. В итоге у него получилось 12 электродинамических уравнений, составляющих основу новой теории электромагнитного поля. Здесь уместно привести следующее образное высказывание ранее упомянутого нами авторитетного ирландского физика Д.Ф. Фицджеральда, выдвинувшегося благодаря своим теоретическим работам в первые ряды физиков конца XIX века: "...Трактат Максвелла загроможден следами его блестящих линий нападения, его укрепленных лагерей и его битв" [18]. Очистить новую теорию электромагнетизма от этих "загромождающих строительных лесов" предстояло преемникам Д.К. Максвелла – Оливеру Хевисайду и Генриху Герцу. Последние успешно справились с возложенной на них судьбой исторической миссией и практически независимо друг от друга после многолетних трудов 12 уравнений электродинамики Д.К. Максвелла свели к четырем – основным и самым главным уравнениям, которыми весь научный мир пользуется и поныне [19,20]. По известному меткому высказыванию также нами упомянутого выше физика-теоретика Г.А. Лоренца "...ясный и концентрированный вид уравнениям Максвелла придал Хевисайд и Герц" [1,27]. Для полноты научной "картины" тех лет и оценки широты научных интересов нашего героя отметим тот немаловажный факт, что О. Хевисайдом при рассмотрении процессов поглощения и излучения физическим телом электромагнитных волн было получено такое же классическое соотношение между массой тела m и его энергией E , как и выведенное позже в 1905 году великим немецким физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном [1,13]: $E = m \cdot c^2$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ ХЕВИСАЙДОМ ЭФФЕКТА ВАВИЛОВА– ЧЕРЕНКОВА

В 1900 году О. Хевисайд вновь возвратился к своим "старым" научным работам, начатым в 1888 году и связанным с теоретическими исследованиями электромагнитного поля излучения движущихся источников (зарядов). Эти исследования составили основу его очередного третьего тома книги "Электромагнитная теория" [28]. Здесь им было рассмотрено электромагнитное излучение, возникающее в том случае, когда скорость источника (заряда) u меньше или больше скорости света v в той или иной сплошной среде. На основе анализа полученных расчетных результатов он пришел к выводу о том, что: "...Любое заряженное тело, скорость u которого превосходит скорость света v в среде, становится источником излучения электромагнитных волн" [1,28]. О. Хевисайдом отдельно был изучен случай, когда источником поля является движущийся точечный заряд. Следует подчеркнуть, что при этом расчеты электромагнитного поля как при $u < v$ (досветовой случай), так и при $u > v$ (сверхсветовой случай) были выполнены аналитическим путем при помощи разработанного О. Хевисайдом операционного исчисления. Данные расчеты показали, что при $u > v$ (скорость заряда превышает скорость света в среде) поле электромагнитного излучения принимает форму конуса с вершиной у движущегося заряда. Причем, этот конус "тянется" за зарядом, движущимся со сверхсветовой скоростью u . В рассматриваемом случае половина угла при вершине конуса с осью OZ , ограничивающего область поля излучения при сверхсветовом движении заряда вдоль оси OZ , согласно вычислениям О. Хевисайда будет определяться следующим простым соотношением [1,28]:

$$\sin \alpha = v/u, \quad (8)$$

где α – угол между осью OZ и образующей вышеуказанного конуса электромагнитного излучения.

Рассмотренное и подробно изученное к началу XX века О. Хевисайдом электромагнитное излучение сверхсветового заряда, движущегося в сплошной среде, нашло свою физическую реализацию в эффекте, экспериментально обнаруженном в 1934 году при движении быстрых электронов в чистых жидкостях советскими физиками С.И. Вавиловым и П.А. Черенковым и теоретически объясненным в 1937 году на основе максвелловской электродинамики отечественными физиками-теоретиками И.Е. Таммом и И.М. Франком [29-32]. При этом, как сравнительно недавно было установлено [30], полученные нашими учеными как опытные, так и расчетные результаты, в основном, соответствовали формуле (8) О. Хевисайда, введенной последним в 1889 году. Трудно удержаться от мысли, что "...О. Хевисайду *и в очередной раз не повезло*" [1]. За эти работы указанные советские ученые в 1946 году были удостоены Государственной премии СССР, а в 1958 году им была присуждена Нобелевская премия по физике. Теперь мы твердо знаем, что истоки этих признанных мировым научным сообществом работ восходят к соответствующим опубликованным работам английского физика О. Хевисайда [28,30], теоретически выполненным им на десятки лет ранее других ученых и на которые долгие годы не обращали внимания как в СССР, так и за рубежом. И что поразительно – как эти, так и другие важные научные исследования О. Хевисайда и их результаты были преданы забвению, прежде всего, в самой Англии. К приведенному нами выше добавим то, что эффект Вавилова-Черенкова [29-32] нашел свое важное практическое применение в ядерной физике, физике космических лучей и в других смежных областях экспериментальной физики.

5. ИНТУИТИВНОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ ХЕВИСАЙДОМ СУЩЕСТВОВАНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ИОНОСФЕРЫ

После открытия в 1888 году Г.Р. Герцем электромагнитных волн О. Хевисайд активно заинтересовался проблемой их распространения в воздушной атмосфере, вдоль грунта и морской поверхности Земли. К этому времени на "повестку дня" встал вопрос дальнейшей радиосвязи или как ее называл О. Хевисайд – "беспроволочной телеграфии" [1]. Кроме того, в 1899 году уже упомянутый нами физик Д.Ф. Фицджеральд дополнительно привлек внимание О. Хевисайда к проблеме дифракции радиоволн вокруг проводящей земной поверхности. Расчетные оценки, выполненные О. Хевисайдом по дифракции электромагнитных волн вокруг Земли на основе операционного исчисления, показали, что для устойчивого обеспечения дальних радиопередач одной дифракции радиоволн проводящей Землей не достаточно. В 1902 году О. Хевисайд, изложив основы проводной электросвязи и показав как проводники линии "ведут" электромагнитную волну вдоль нее, относительно распространения радиоволн вдоль Земли написал [1,28]: "...*Нечто подобное имеет место и в беспроволочной телеграфии. Морская вода имеет вполне достаточную проводимость для того, чтобы вести себя как проводник по отношению к волнам Герца. Земля также имеет проводимость, хотя и меньшую, чем морская вода. Поэтому волны Герца приспособляются к поверхности моря точно так же, как они следуют вдоль проводов. Главные волны следуют кривизне Земли и не уходят от нее. Есть и другое соображение. Возможно, что существует достаточно проводящий слой в верхней атмосфере Земли. Если это так, то волны будут захвачены этим слоем в той или иной степени. Тогда, с одной стороны, волну будет "вести" море, а с другой стороны, – этот верхний слой Земли*". В приведенном высказывании О. Хевисайда содержится возможное объяснение дальнейшей радиосвязи. К тому времени (1902 год), когда О. Хевисайд писал эти строки, уже были в 1901 году проведены первые успешные опыты по радиосвязи через Атлантический океан между Европой и Америкой. Заметим, что О. Хевисайд не занимался практической радиосвязью. Но он с большим интересом следил за работами инженеров Британского телеграфного ведомства и известного итальянского радиоинженера Гумельмо Маркони, заявившего в 1896 году и получившего в 1897 году патент Англии на изобретение "Усовершен-

ствование в передаче электрических импульсов и сигналов и в аппаратуре для этого" [13]. Здесь нам надо обратить внимание читателя на то, что данный патент Г. Маркони был выдан спустя более двух лет после публичной демонстрации нашим соотечественником, выдающимся русским ученым А.С. Поповым своего прибора для генерации и регистрации электрических колебаний [13,33]. К большому сожалению, наш физик-экспериментатор А.С. Попов своего изобретения ни в России, ни в других странах не патентовал. Он лишь ограничился о нем газетным сообщением 7 мая 1895 года в г. Петербурге и научной журнальной публикацией в 1896 году [33]. Поэтому научный приоритет А.С. Попова и соответственно России в изобретении радио бесспорен, но с юридической стороны английский патент Г. Маркони был первым правовым актом, закрепляющим иностранное авторство изобретателя радио.

Таким образом, согласно предположению О. Хевисайда в случае существования над Землей слоя, отражающего радиоволны, становилась возможной радиосвязь между двумя любыми точками земной поверхности. Отметим, что практически одновременно с О. Хевисайдом и независимо от последнего предположение о существовании высоко над Землей проводящего ионизированного слоя было сделано и американским ученым Кеннели [1]. В 1924 году это предположение О. Хевисайда и Кеннели благодаря опытам Эпплтона и Барнета получило прямое экспериментальное подтверждение: опытным путем на высоте примерно 90км над Землей была обнаружена атмосферная сферическая область, отражающая радиоволны. Эта отражающая область в дальнейшем получила название "слой Хевисайда– Кеннели" [1]. Позднее, в 1926 году тем же Эдуардом Эпплтоном на высоте примерно 200км над земной поверхностью была обнаружена вторая отражающая радиоволны сферическая область. Характерной особенностью новых экспериментов было то, что во втором случае Э. Эпплтон использовал радиоволны с меньшей длиной λ электромагнитной волны, чем в первых опытах. Благодаря этому приему примененные им волны "пронизали" первый ионизированный атмосферный слой и, отразившись с преломлением от второго проводящего атмосферного слоя, частично вернулись на Землю. О важности этих работ свидетельствует тот факт, что в 1947 году Э. Эпплтону за исследования свойств ионизированных слоев атмосферы Земли была присуждена Нобелевская премия по физике [1]. Согласно современным представлениям данные ионизированные атмосферные сферические области над Землей образуются из-за ряда энергетических воздействий (например, ультрафиолетовой части спектра солнечного излучения, потоков заряженных элементарных частиц от Солнца, космического излучения и других факторов) на верхние слои земной атмосферы, приводящих к образованию ионизированных слоев, способных проводить электрический ток [1,15]. А, как известно, проводящая среда может как поглощать, так и отражать электромагнитные волны. Этим и обусловлено, по-видимому, и отражение радиоволн от "слоя Хевисайда– Кеннели", постепенно выходящего из упот-

ребления и называемого сейчас, как правило, "ионосферой". В настоящее время изучению характеристик и свойств ионосферы Земли, определяющей не только радиосвязь, но и целый ряд геофизических и геомагнитных явлений, во всем мире уделяется большое внимание. Здесь нам следует подчеркнуть, что данной проблематикой в рамках комплекса радиофизических исследований, выполняемых в интересах НАН Украины и Министерства образования и науки Украины, успешно занимается и созданный на базе соответствующего конструкторского бюро в 1991 году при НТУ "ХПИ" научно-исследовательский институт "Ионосферы", ставший со своим уникальным радиофизическим оборудованием в 2002 году объектом Национального достояния Украины.

6. ОСОБЕННОСТИ ЛИЧНОСТИ И ОБРАЗА ЖИЗНИ ХЕВИСАЙДА

Историки науки и техники отмечают, что О. Хевисайд был гордым, исключительно добрым, щедрым и очень любезным в общении человеком [1]. Это был человек великой воли, превозмогавшей его плохое здоровье. Он любил птиц за их пение и сам играл на золотой арфе. Поэтому, наверное, можно говорить о том, что это был человек "музыкальной" натуры. О. Хевисайд был простым и застенчивым человеком, склонным к уединению. У О. Хевисайда был самобытный и независимый характер. Даже от своих родственников он очень неохотно принимал материальную или иную помощь. Его биограф Р. Эппльард приводит такие слова о том, как внешне выглядел О. Хевисайд в молодые годы [1,5]: "...Он был несколько ниже среднего роста, рыхловатым, сдержанным, остроумным человеком, обладающим властным характером". Очевидцы, лично знавшие О. Хевисайда, отмечают [1,6]: "...В 1876 году это был молодой человек приятной наружности, тщательно одетый, с блестящими глазами, красивым цветом лица и светло-каштановыми волосами". Еще с молодости у О. Хевисайда было резко негативное отношение к фотографированию. Поэтому для потомков его личный архив содержал лишь крайне ограниченное число фото с ним, запечатлевших этого уникального исследователя электрофизических явлений. Все научные, а точнее физические интересы О. Хевисайда до конца его жизни были связаны с классической электродинамикой, теоретической электротехникой и радиофизикой. Однажды уже пожилому О. Хевисайду один из его знакомых сказал: "...Вам надо было жениться, мистер Хевисайд" [1]. На что он ответил: "Если бы я женился, что бы тогда стало с моей работой?" [1]. Он был убежденным холостяком. Современники О. Хевисайда отмечали, что: "...Образ жизни О. Хевисайда составлял разительный и трогательный контраст с его силой мысли" [1,6]. Он был приверженцем жизни отшельника. Жил он очень скромно на небольшие гонорары за публикации своих научных статей и книг. Поэтому жил О. Хевисайд практически один и в значительной бедности. Несмотря на все это, он был оптимистом и мало обращал внимания на свой неустроенный быт. Гордость О. Хевисайда не позволяла его друзьям и знакомым улучшить бытовые ус-

ловия его жизни. В 1896 году, принимая во внимание его работы по теории электричества, ему была назначена пожизненная королевская пенсия Англии (*Civil List Pension*) в размере 120 фунтов стерлингов в год. После этого жить и работать О. Хевисайду стало значительно легче.

Всем нам хорошо известно следующее образное изречение про науку: *"Наука есть удовлетворение собственного любопытства за казенный счет"* [1]. Это своеобразное с юмористическим оттенком определение науки приписывают известному советскому физика Л.А. Арцимовичу [1,13]. Применительно к О. Хевисайду это определение науки "не работает". Для О. Хевисайда наука и его научная творческая работа была чем-то большим, чем стремление удовлетворить свое любопытство. За свой титанический труд он получал лишь гроши. О. Хевисайду, отличавшимся полным отсутствием тщеславия, до самой старости не изменяло чувство юмора. Он слыл хорошим рассказчиком анекдотов. Иногда О. Хевисайд был язвитель и резок в формулировках относительно поведения тех отнюдь не рядовых в научном мире лиц – "ученых мужей", которые упорно и без достаточного на то основания не признавали его новаторские научные результаты, "рождаемые" ученым в муках и так трудно "отдаваемые" людям матушкой природой.

В мае 1950 года на торжественном собрании в г. Лондоне, организованном Английским Институтом инженеров-электриков в честь 100-летия со дня рождения Оливера Хевисайда, профессор математики Эдинбургского университета (Англия) Эдмунд Уиттекер, являвшийся одним из крупнейших математиков того времени, в своем выступлении, касаясь бытовых условий жизни юбиляра, отметил следующее: *"...Если подумать о том, какие большие деньги тратятся на развитие образования и научно-исследовательские работы, то может показаться удивительным, что такой ученый как О. Хевисайд – ученый первого ранга должен был существовать в таких ужасных условиях. Это пример того, что как часто гениальные люди не вписываются в общественное устройство"* [1,34]. Думаю, что это высказывание известного английского математика Э. Уиттекера не потеряло своей актуальности и для нашего времени. О. Хевисайд, как один из своеобразнейших людей в истории мировой науки, никогда и нигде не участвовал в научных заседаниях, но вел активную переписку с рядом известных ученых своего времени (например, Д.Ф. Фицджеральдом, О. Лоджем, Ж. Бетено, Дж. Силом, Ф. Гиллом и другими). Вице-президент Французского общества электриков Жозеф Бетено, говоря в свое время о жизненном феномене О. Хевисайда, отмечал, что: *"...Это достойный восхищения пример жизни, целиком посвященный науке, пример столь редкий в истории человечества"* [35]. Умер О. Хевисайд 3 февраля 1925 года на 75-ом году жизни в г. Торки (Англия). До конца своей жизни он сохранил ясность мысли и способность шутить [36].

На мемориальной доске (Рис.2), установленной Английским Институтом инженеров-электриков в память об Оливере Хевисайде в холле помещения муниципалитета г. Торки, имеются такие замечатель-

ные слова: *"...В память Оливера Хевисайда, члена Королевского общества, почетного члена Института, гениального математика, чьи пионерские исследования в электромагнитной теории внесли великий вклад в науку и в развитие электрической связи"* [1].

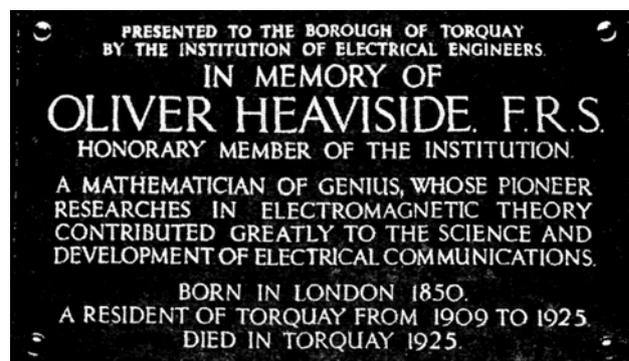


Рис. 2. Мемориальная доска в честь О. Хевисайда, установленная в здании муниципалитета г. Торки (Англия) [1]

* * *

Время научной деятельности О. Хевисайда пришлось на период быстрого развития науки и техники, в том числе электротехники и мировой физики и, в частности, ее таких разделов как электродинамика, электрофизика и радиофизика. Это время было временем многочисленных открытий и изобретений человечества, временем ломки старых физических воззрений, временем введения новых физических понятий и создания новых электрофизических теорий, в том числе и теории электромагнитного поля Д.К. Максвелла. О. Хевисайд был активным участником этой созидательной научной работы, связанной с разработкой фундаментальных проблем электричества и магнетизма. Вклад О. Хевисайда в решение проблемных задач электродинамики был значительным [12,21,25,28]. Не менее значимы для науки его работы по разработке теорий проводной и беспроводной электрической связи [12,21], развитию математического аппарата и новых областей применения операционного и векторного исчисления [1,11,13], а также операторной алгебры – правила действий над операторами. Методы операторной алгебры, разработанные О. Хевисайдом, имеют не меньшее значение, чем существенно развитое и практически созданное им операционное исчисление [1,34]. Знаками научного признания О. Хевисайда стали: его избрание в 1891 году членом Королевского общества (Академии наук) Англии; в 1899 году он стал почетным членом Американской Академии искусств и наук; в 1908 году его избрание почетным членом Английского Института инженеров-электриков (*IIEE*); в 1919 году он становится почетным членом Американского Института инженеров-электриков (*AIEE*); в 1921 году Английский Институт инженеров-электриков наградил его своей высшей и первой за номером наградой – медалью Фарадея, присуждаемой за выдающиеся заслуги в области электричества. В приветствии авторитетного и известного всему научному миру Английского Института инженеров-электриков при вручении Оливеру Хевисайду указанной медали было сказано: *"...Как*

теперь, так и в будущем имя Хевисайда будет стоять в одном ряду с именами великих основателей науки прикладного электричества" [1,6]. Прошедшие после ухода из жизни О. Хевисайда годы показали, что его научные достижения сохранили свою ценность и для современного этапа развития человечества, а предложенные им физические идеи и математические методы сейчас активно развиваются и применяются на практике в различных областях научно-технической деятельности мирового сообщества.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Болотовский Б.М. Оливер Хевисайд. 1850-1925/ Отв. ред. акад. В.Л. Гинзбург.-М.: Наука, 1985.-260с.
- [2] Степко М.Ф., Клименко Б.В., Тобажнянский Л.Л. Болонський процес і навчання впродовж життя.-Харків: НТУ "ХПИ", 2004.-112с.
- [3] Коренева Т.В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины.-М.: Русский язык, 1990.-464с.
- [4] Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. I-II, Clarendon Press, Oxford, 1873.-1011p.
- [5] Appleyard R. Oliver Heaviside. Pioneers of electrical communications.-London: Macmillan and Company, 1930.-p.211-260.
- [6] Lee G. Oliver Heaviside-the man.-In.: The Heaviside centenary volume.-London: IEE, 1950.-p.10.
- [7] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-М.: Наука, 1986.-544с.
- [8] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Т.1.-Л.: Энергоиздат, 1981.-536с.
- [9] Конторович М.И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях.-Л.:М.: Госиздат, 1949.-215с.
- [10] Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях.-М.: Советское радио, 1954.-252с.
- [11] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров/ Пер. с франц. под общей ред. К.С. Шифрина.-М.: Наука, 1965.-780с.
- [12] Heaviside O. Electromagnetic theory.-London: The Electrician Company. Vol. II, 1899.-547p.
- [13] Кудрявцев П.С. Курс истории физики.-М.: Просвещение, 1974.-312с.
- [14] Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники.-Л.: Энергия, 1972.-360с.
- [15] Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн.-М.: Наука, 1989.-544с.
- [16] Баранов М.И., Кузнецов С.А. Анализ разряда коаксиальной формирующей линии на основе разложения решения в ряд Фурье// Электричество.-1992.-№8.-С.15-23.
- [17] Баранов М.И., Кузнецов С.А. Приближенный расчет нестационарных процессов при разряде коаксиальной формирующей линии на многопроводную воздушную линию// Электричество.-1992.-№12.-С.14-22.
- [18] Григорьян А.Т., Вяльцев А.Н. Генрих Герц. 1857-1894.-М.: Наука, 1968.-309с.
- [19] Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля// Електротехніка і електромеханіка.-2005.-№1.-С.5-7.
- [20] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Т.2.-Л.: Энергоиздат, 1981.-416с.
- [21] Heaviside O. Electromagnetic theory.-London: The Electrician Company. Vol. I, 1893.-466p.
- [22] Баранов М.И., Белый И.В., Хищенко Л.Т. Поверхностный эффект и распределение электродинамических усилий в цилиндрических токопроводах коаксиальной системы с импульсным током// Электричество.-1976.-№10.-С.1-8.
- [23] Баранов М.И. Поверхностный эффект в полем проводящем изотропном цилиндре с аксиальным импульсным магнитным полем// Технічна електродинаміка.-1999.-№2.-С.3-6.
- [24] Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля.-Харьков: Вища школа, 1979.-140с.
- [25] Heaviside O. Electrical papers.-London: Macmillan. Vol. II, 1892.-587p.
- [26] Pupin M.I. Transactions of the American IEE.-1900.-Vol. 17.-p.450.
- [27] Лоренц Г.А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения.-М.: Гостехиздат, 1956.-472с.
- [28] Heaviside O. Electromagnetic theory.-London: The Electrician Company. Vol. III, 1912.-519p.
- [29] Гинзбург В.Л. Об эффекте Вавилова-Черенкова и аномальном эффекте Доплера в среде, в которой фазовая скорость волн больше скорости света в вакууме// Журнал экспериментальной и теоретической физики.-1972.-Т.62.-вып.1.-С.173-175.
- [30] Тяпкин А.А. О первом теоретическом предсказании излучения, открытого Вавиловым и Черенковым// Успехи физических наук.-1974.-Т.112.-вып.4.-С.735.
- [31] Франк И.М. О когерентном излучении быстрого электрона в среде.-В кн.: Проблемы теоретической физики. Памяти Игоря Евгеньевича Тамма. М.: Наука, 1972.-С.350.
- [32] Франк И.М. Развитие представлений о природе излучения Вавилова-Черенкова// Успехи физических наук.-1984.-Т.143.-вып.1.-С.111-127.
- [33] Попов А.С. Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний// Журнал русского физико-химического общества. Серия физическая.-1896.-Т.28.-С.1-14.
- [34] Whittaker E.T. Address at the Heaviside centenary meeting.-In.: The Heaviside centenary volume.-London: IEE, 1950.-p.7.
- [35] Bethenod J. Bull. Society. Franc. Electricians.-1925.-Vol. 5.-p.232.
- [36] Карцев В.П. Приключения великих уравнений.-М.: Знание, 1978.-224с.

Поступила 23.06.2005