

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ АМПЕРА – ЭФФЕКТ ГРАНО

Карпекин И.А., Полуэктов Н. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Тараканов А. Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Рассматриваются опыты, связанные с действием так называемой продольной силы Ампера. Предлагается объяснение этих сил наличием у электронов проводимости спина.

В этом году исполняется 200 лет с момента возникновения электродинамики, когда Ампер получил формулу описывающую закон взаимодействия двух элементов токов, который приводил к экспериментально установленному закону Био-Савара. Хотя дальнейшие эксперименты с прямыми проводниками как будто подтверждали закон Ампера, тем не менее появилось несколько альтернативных законов, которые давали аналогичные результаты (см., напр., [1]). После работ Ампера в XIX столетии активно исследовалось действие электрического тока в различных средах, что привело к открытию многих хорошо известных законов электродинамики.

Процессы, происходящие в контактах для подключения проводов к источнику тока, которые осуществлялись через жидкий проводник, в качестве которого использовалась ртуть, остались вне внимания Ампера, поскольку он, проведя несколько экспериментов, перешёл к математической формулировке электромагнетизма. В своих экспериментах Ампер интересовался главным образом взаимодействием между проводником с током и другим проводником с током или магнитом. Так же как в опыте Эрстеда, в экспериментах Ампера на проводник действовали силы, перпендикулярные проводнику. Однако из формулы Ампера следовало, что в проводнике, по которому течёт ток, должна существовать продольная сила, которая приводит к внутренним напряжениям в проводнике. Если речь идёт об элементах тока, принадлежащих разным проводникам, то их взаимодействие не приводит к возникновению напряжений в контурах, но приводит к деформации структуры, что удерживает проводники на месте.

В 1906 г. основатель и Президент Американского Электрохимического Общества (АЭО) Карл Геринг рассказал своему другу Эдвину Нортропу о явлении, которое он наблюдал. Эффект заключался в том, что при пропускании относительно большого переменного тока (800 А) через неэлектролитический жидкий проводник (ртуть), находящийся в жёлобе, жидкость сжималась в поперечном сечении. При увеличении силы тока в жидкости образовывалась глубокая впадина в форме буквы V. При ещё большем увеличении тока впадина достигала дна жёлоба и разрывала цепь. Геринг предположил, что сжатие, вероятно, связано с упругим действием магнитных силовых линий, которые окружают проводник. Поскольку действие сил на проводник заключается в том, чтобы сжать или ущемить его, он шуточно назвал это «*феноменом ущемления*», или *пинч-эффектом*. Результаты эксперимента были доложены на заседании АЭО и в дискуссии С. J. Reed сообщил, что он вместе с Winand'ом и Bilberg'ом наблюдал это явление около 1894 г. Они пытались пропустить через ртуть ток в 1000 А, но «ртуть почти мгновенно разорвалась в середине, затем образовала дугу, а затем снова собралась»; они также обнаружили, что имел место воронкообразный вихрь, когда в блюдо с ртутью при сильном токе были помещены два медных проводника, [2].

Нортроп повторил опыт Геринга, используя вместо ртути жидкий сплав калия и натрия, и разработал собственные эксперименты, которые попытался объяснить, применив теорию Ампера, [3]. В частности, он экспериментально показал, что при пропускании тока по проволоке, свободно подвешенной в цилиндре между двумя медными дисками в проводящей жидкости, проволока стремится занять положение вблизи оси цилиндра. Это привело его к мысли о том, что столб жидкого проводника, по которому течёт ток, можно представить в виде множества параллельных столбов нитей, которые изгибаются к оси столба тем сильнее, чем сильнее электрический ток. Тогда «если проводящий столб жидкости имеет упругие стенки, он будет сжиматься, уменьшая поперечное сечение и, следовательно, увеличиваясь в длине. Если столб не может увеличиваться в длине, он будет иметь тенденцию к сокращению. Другими словами, в центре будет давление, превышающее давление у поверхности» ([3], p. 482). Это подтвердилось соответствующими экспериментами.

Позже, основываясь на законе Ампера для проводника, помещённого в магнитное поле, Кливленд показал, что продольные силы по величине имеют тот же порядок, что и поперечные, [4]. Первым доказательством существования продольных сил Ампера явились эксперименты Грано, [5]-[6], подробно описанные в [7], [8]. В одном из них медная субмарина, представляющая отрезок прямого провода длиной 5 см, диаметром 3 мм, квадратной формы на одном конце и заострённым наконечником длиной 1 см на другом, размещалась на поверхности ртути, налитой в прямой жёлоб длиной 30 см, сечением 0,5×0,5 дюйма. При протекании вдоль жёлоба тока силой 400 А субмарина погружалась в ртуть и начинала двигаться тупым концом вперёд вдоль центра жёлоба со скоростью 15 м/с. Механизм движения субмарины Грано объясняет силами Ампера, поперечная составляющая которых погружает субмарину, а продольная составляющая продвигает её вдоль середины жёлоба.

Обычное объяснение эффекта, [8], заключается в том, что погружение проводника обусловлено разделением тока на два потока – по ртути и через медь. Магнитное поле создаёт силы, направленные против закона Архимеда. В результате проводник стремится к оси, на которой расположен центр тяжести данного объёма ртути. При замыкании ключа, в цепи пойдёт ток от отрицательного полюса батареи, через ванночку с ртутью, и, соответственно медный проводник, свободно плавающий на её поверхности, к положительному полюсу батареи. Медный проводник, вследствие действия магнитной силы Ампера, погрузится в ртуть. Реактивная тяга порождается благодаря заострённому концу субмарины. Пусть ток из ртути входит в субмарину, а потом выходит из хвоста в ртуть. Токовые нити нормальны поверхности, разделяющей ртуть и металл. По правилу левой руки ртуть гонится силой, нормальной и току, и магнитному полю, который этим током создаётся. Другими словами, сила направлена по образующей хвостового конуса, возрастая по мере приближения к остирию. Вот почему ртуть обязана обтекать хвост и обжимать его, выталкивая медное тельце из своих жидкометаллических объятий. Таким образом, и количественно, и качественно опыт с корабличками в ртутном море полностью объясняется действием сил Лоренца, являясь одной из разновидностей МГД-явлений.

Из теоретических исследований Гаусса, Грассмана и Неймана следовало, что никакой продольной силы быть не может даже между элементами, принадлежащими одному проводнику. Тем не менее существование внутренних напряжений доказывается разрушением проводников при больших значениях силы тока. Внутреннее натяжение растёт при увеличении силы тока, а растягивающее напряжение при одной и той же плотности тока растёт с увеличением поперечного сечения проводника. В широко используемых в промышленности медных и алюминиевых проводниках растягивающее напряжение меньше 1 Н/см<sup>2</sup>. Вряд ли такое напряжение можно заметить, если гирию весом 100 г подвесить на толстом проводе сечением 1 см<sup>2</sup>. Поэтому натяжение Ампера осталось незамеченным в течение более ста лет распределения электрической энергии. Но если формула Ампера неверна, а более адекватной является формула Гаусса-Грассмана-Неймана, то возникает вопрос, что не учтено в последней формуле, чтобы объяснить реактивную тягу субмарины в опыте Грано.

То, что мы называем магнитным полем, проявляется в силовом действии проводника на другой проводник или магнитный полюс. Кроме этого силового поля существует также поле вращающихся объектов, какими являются движущиеся электроны в проводнике. Благодаря собственному вращению электроны обладают спином, проекция которого на направление движения, или поляризация (киральность), проявляется как электрический заряд. Спиновое силовое поле действует на элементы тока, состоящие также из электронов. Внутри проводника спины электронов выстраиваются антипараллельно их скорости (что соответствует отрицательному заряду, так как кральность отрицательна), так что в законе взаимодействия элементов тока наряду с компонентой Гаусса-Грассмана-Неймана появляется слагаемое, параллельное скорости электрона, которое и отвечает за реактивную тягу. Для вычисления этой тяги в жидком проводнике необходимо учесть суммарное действие всех элементов ртути на все элементы медной субмарины.

#### Список использованных источников:

1. Тараканов, А. Н. Законы взаимодействия токов и зарядов и определение магнитного поля // [viXra:2002.01110](https://arxiv.org/abs/2002.01110) [Classical physics]. – 17 с.
2. Hering, C. A Practical Limitation of Resistance Furnaces; the 'Pinch' Phenomenon // Trans. Amer. Electrochem. Soc., 1907, V. 11. P. 329-337.
3. Northrup, E. F. Some Newly Observed Manifestations of Forces in the Interior of an Electric Conductor // Phys. Rev. 1907. V. 24, no. 6. P. 474-497.
4. Cleveland, F. F. Magnetic forces in a rectangular circuit // Phil. Mag. 1936. V. 21, Suppl. 1. P. 416-425.
5. Graneau, P. Electromagnetic jet-propulsion in the direction of current flow. // Nature. 1982. V. 295, No. 5847. P. 311-312.
6. Graneau, P. First indication of Ampère tension in solid electric conductors // Physics Letters. 1983. V. 97A, no. 6. P. 253-255.
7. Graneau, P. / P. Graneau, N. Graneau. Newtonian Electrodynamics. – Singapore-New Jersey-London-Hong Kong: World Scientific, 1996. – XII, 288 pp.
8. Околотин, В. С. / В. С. Околотин, Д. Е. Румянцев. Опыты Грано: сила № 4 или фокус? // Техника и наука. 1983. № 11. С. 26 - 27.