

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
СО РАН

С. Ю. Таскаев

**ТУРБУЛЕНТНОЕ ДИНАМО В ОТКРЫТЫХ ЛОВУШКАХ
— ФАКТ ЛИ?**

ИЯФ 98-96

Новосибирск
1998

**Турбулентное динамо в открытых ловушках
— факт ли?**

С. Ю. Таскаев

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН
630090 Новосибирск, Россия
taskaev@inp.nsk.su

*В работе подвергаются сомнению **все** экспериментальные результаты, представленные в статье А. А. Кабанцева, В. Б. Ревы, В. Г. Соколова «Турбулентное динамо в открытых ловушках» как убеждающие в обнаружении турбулентного динамо в конкретных открытых ловушках.*

В данной работе подвергаются сомнению **все** экспериментальные результаты, представленные в препринте [1] как убеждающие в обнаружении турбулентного динамо в конкретных открытых ловушках.

История проблемы следующая. В пробкотроне открытой ловушки АМБАЛ-М с использованием только газоразрядного источника плазмы, расположенного в запробочной области, получена горячая мишенная плазма [2]. Был обнаружен и подробно экспериментально изучен продольный электронный ток [3]. Выяснено, что этот ток должен оказывать значительное влияние на удержание и нагрев электронов [2]. Изучение механизмов нагрева плазмы и динамики продольного тока крайне интересно, но в тоже время достаточно сложно. Основная сложность в количественном описании связана со множественностью процессов и значительным изменением параметров плазмы как в радиальном, так и продольном направлениях. Рядом соавторов по предыдущим публикациям была предложена оригинальная модель генерации тока [1], подкреплённая экспериментальными результатами. Именно эти экспериментальные результаты, а точнее, их интерпретации, подвергаются сомнению в данной работе.

Материал представлен следующим образом. Сначала кратко перечислены экспериментальные результаты из препринта [1] как те, которые *потребовали пересмотра принятой ранее модели образования продольных токов, наблюдаемых в струях мишенной плазмы¹*, так и **все** те, которые убеждают в обнаружении турбулентного динамо. Далее подробно обсуждается каждый из них. Понимание турбулентного динамо желательнее, но вполне достаточно и простого понимания эффекта — *при развитии турбулентности возникает электродвижущая сила, параллельная силовым линиям магнитного поля, и приводящая к генерации продольных токов* [1, аннотация]. Более важным для прочтения является знакомство с проводимыми экспериментами на установках АМБАЛ-М и ГДЛ, которое может быть получено из ряда работ [2-5] и из представленного Рис. 1.

¹ Здесь и далее курсивом выделяется текст из препринта [1].

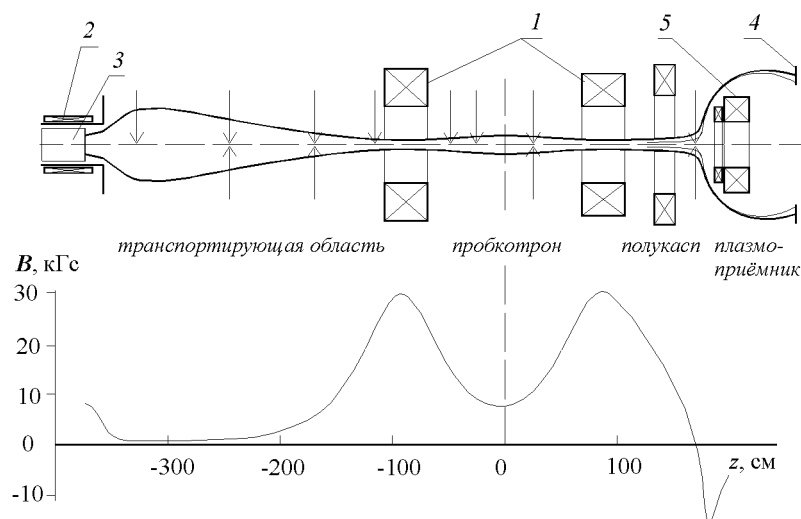


Рис. 1. Концевая система установки АМБАЛ-М и силовая линия, выходящая из плазменной пушки. Ниже — магнитное поле на оси. 1 — катушки пробкотрона, 2 — соленоид пушки, 3 — плазменная пушка, 4 — плазмoприёмник, 5 — катушка полукаси. Стрелками сверху на рисунке отмечены координаты сечений, в которых проводились измерения ленгмюровским зондом, стрелками снизу — магнитным зондом.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные факты проявления турбулентного динамо (согласно [1]):

- видно включение э.д.с. — наводка на токе дуги вначале разряда пушки (АМБАЛ);
- видно выключение э.д.с. — изменение потенциала центрального электрода пушки в конце разряда (АМБАЛ);
- ток в плазме продолжает течь после быстрого выключения пушки (ГДЛ);
- согласие между величиной, оцененной по α -эффекту, и экспериментально измеренной величиной продольной разности потенциала на всей длине установки (АМБАЛ).

Экспериментальные факты, требующие пересмотра:

- падение продольного тока при инверсии радиального электрического поля (наиболее патологические факт).

Заметим, что экспериментальные результаты обнаружения турбулентного динамо приведены с двух установок, однако ни один из них не наблюдается на двух установках.

Включение

Вообще говоря, пороговое по уровню турбулентности “включение” э.д.с. наблюдается и на переднем фронте рабочего импульса... [1, стр. 37].

Но как и где наблюдается — не говорится. В предшествующем публикации выступлении про этот момент включения говорилось ясно и однозначно — видна наводка на измеряемом сигнале тока дуги, и как раз в тот момент, когда начинает течь ток. Сомнения относительности правдивости этой интерпретации были высказаны сразу после выступления. Авторы эту информацию учли в препринте, но довольно своеобразно.

Для прояснения этого «включения» приведём необходимые экспериментальные результаты. На Рис. 2 представлена осциллограмма тока дуги плазменной пушки. В момент времени ≈ 340 мкс начинает течь ток и видна сильная наводка. Теперь обратим внимание на показания ленгмюровских зондов в пробкотроне и в транспортирующей области (Рис. 3). В момент времени 200 мкс включается пушка, начинает нарастать ток дуги и через 40 мкс появляется плазма в транспортирующей области. А ещё через 100 мкс появляется плазма в пробкотроне, как раз в тот момент, когда возникает наводка. Т.е. наводка появляется не тогда, когда плазма переходит из одного состояния в другое, а просто тогда, когда вообще появляется плазма, когда пробивается вакуумный промежуток и, естественно, начинает течь ток. Из времени задержки появления сигнала на зондах, разнесённых на расстояние 3 м, легко получить скорость распространения 3×10^6 см/с, которая, как и следовало ожидать, близка к величине потоковой скорости вещества.

Выключение

На рис. 7 представлен такой резкий скачок “плавающего” потенциала центрального электрода на выходе из источника, наблюдаемый в установке АМБАЛ-М в момент порогового “выключения” э.д.с. при $Rm \approx \pi$, т.е. на спаде турбулентности по окончании разряда в источнике плазмы. В этом случае можно ... считать, что это изменение разности потенциалов ΔU на длине плазменного столба всецело связано с исчезновением действия турбулентной э.д.с., а именно $\Delta U = \int_0^L F_{em}(Rm = \pi) dz \approx -60$ В, что хорошо согласуется с экспериментом [1, стр. 35].

Действительно, в момент времени 2400 ± 50 мкс экспериментально регистрируется резкое уменьшение (на $50 \div 100$ В) потенциала центрального электрода пушки (Рис. 4). Заметим, что центральным электродом является внутренняя молибденовая шайба [6], находящаяся под плавающим потенциалом.

Перед дальнейшим обсуждением уточним терминологию и представим грубую наглядную модель. Напомним определении э.д.с. Электродвижущая сила — это

физическая величина, характеризующая действие сторонних (непотенциальных) сил в источниках тока. В данном случае сторонней непотенциальной силой является действие турбулентности. Эта сила приводит к разделению зарядов — она стремится переместить электроны вправо (если смотреть на Рис. 1), а ионы влево (в направлении к центральному электроду пушки). Эту ситуацию можно представить как батарейку с плюсом на центральном «плавающем» электроде пушки, а минус где-то правее (в плазме или на плазмоприёмнике). Вероятно, и авторы препринта так представляют себе ситуации, поскольку аккуратно указывают знак разности потенциалов на длине плазменного столба. Теперь, если в батарейке э.д.с. выключилась, а минус почему-то зафиксирован, то потенциал центрального электрода уменьшится (станет более отрицательным). В этом рассуждении пока всё логично, но возникает много вопросов, на которые нет ответа в препринте:

1. Э.д.с. выключилась, а почему нет наводки на токе дуги (по аналогии со включением; см. Рис. 2)?

2. Э.д.с. выключилась, а почему ток продолжает течь? Обратим внимание на то, что текущий ток начал уменьшаться ранее, и к моменту выключения он уже составлял десятую долю от своего максимального значения (Рис. 2). Более того, в момент выключения э.д.с. с током ничего не происходит — он также плавно продолжает уменьшаться.

3. Потенциал скачком уменьшается не только на внутренней шайбе пушки, но и на катоде и на определённых радиусах на всех лэнгмюровских зондах (включительно до полукаспа) примерно на одинаковую величину (Рис. 5). Поэтому если и есть «батарейка», то она находится между полукаспом и плазмоприёмником. Тогда её там и надо искать, а не в транспортирующей области и пробкотроне.

У автора данной работы относительно этого скачка потенциалов есть только предположение: при уменьшении тока происходит изменение процесса поглощения тока торцевыми пластинами и заземлённой вакуумной камерой, отражающееся в изменении приграничного скачка потенциалов.

Величина э.д.с.

Величина э.д.с. линейно растёт с увеличением поля и на длине плазменного столба в ловушке АМБАЛ-М ($L \approx 6$ м) достигает 300 В, что согласуется с оценкой по α -эффекту [1, аннотация].

Безусловно, одним из таких доказательств было бы прямое измерение разности потенциалов ΔU в направлении вдоль магнитного поля, возникающей на всей длине плазменного столба в результате действия альфа-эффекта. Для параметров турбулентности и магнитного поля в ловушке АМБАЛ-М получаем следующую оценку на величину этой разности потенциалов

$$\Delta U = \int_0^L F_{em} dz \approx -(D_T \cdot B) \int_0^L \frac{dz}{\lambda_B(z)} \approx -270 \text{ В}.$$

... Тогда возникающую разность потенциалов между центральным “плавающим” электродом источника и катодом можно отнести преимущественно на счет действия турбулентной э.д.с. Как видно из рис.6 эта разность действительно близка к полученной выше оценке ΔU [1, стр. 33-34].

Сначала укажем на переопределение понятий и их противоречие, а затем покажем очевидную ошибку, скрытую неполным представлением материала.

- В приведённой выше цитате разность потенциалов между центральным “плавающим” электродом источника и катодом относят на счёт действия турбулентной э.д.с. и приводят его зависимость от времени (рисунк 6), показывая согласие с оцененной величиной э.д.с. Далее по тесту (см. рисунок 7) приводят временн ю зависимость потенциала центрального “плавающего” электрода, показывая пороговое выключение э.д.с. И в том и в другом случае речь идёт об одном, однако пороговое выключение э.д.с. на рисунке 7 видно, а на рисунке 6 нет. Его и быть не может на рисунке 6, поскольку в так называемый момент выключения этот скачок потенциала относительно земли присутствует не только на центральном электроде, но и на катоде (см. Рис. 5e).

- Вспомним рассуждения предыдущего пункта относительно батарейки в плазме. Слева (на центральном электроде) — плюс, справа (где-то в плазме или на торце) — минус. Внешней цепью является, в основном, проводящая вакуумная камера. Непотенциальная сила в источнике тока (турбулентная плазма) перемещает заряды, так что ток в источнике (в плазме) течёт справа налево. Именно такое направление тока зарегистрировано экспериментально [3]. Заметим, что в работе [3] за направление тока принималось направление электронного тока, но это специально оговаривалось и это не следует забывать. Так вот, в случае с батарейкой чем правее, тем потенциал должен быть более отрицательным, а в эксперименте, наоборот, более положителен. Потенциал центрального плавающего электрода пушки в течение разряда всегда отрицателен (см. Рис. 4), и он всегда более отрицателен, чем потенциал плазмы в пробкотроне, или в плазмоприёмнике на силовых линиях, выходящих с центрального электрода пушки. Разность потенциалов ΔU в направлении вдоль магнитного поля, возникающая на всей длине плазменного столба в результате действия альфа-эффекта (-270 В) согласуется с измеренной разностью потенциалов ΔU в направлении вдоль магнитного поля на всей длине плазменного столба (+100 ÷ 300 В) разве что по модулю, но никак не по величине!

Также заметим, что *разность потенциалов между центральным “плавающим” электродом источника и катодом никак не является разностью потенциалов ΔU в направлении вдоль магнитного поля, возникающей на всей длине плазменного столба.*

Ток после выключения пушки

Неизменность I_{\parallel} в течении макроскопического в условиях эксперимента времени $\tau \approx 40$ мкс в случае быстрого выключения тока дуги в источнике и, соответственно, наличие периода, когда $I_{\parallel} \geq I_{arc}$ [1, стр. 8].

В этом разделе приведём экспериментальные результаты² с установки ГДЛ в режиме работы с кольцевой плазменной пушкой, такой же, что всегда используется на установке АМБАЛ-М. На Рис. 6 показаны осциллограммы выстрела № 000609: тока дуги пушки, тока соленоида пушки, плавающего потенциала зонда в пробкотроне и втекающего в пробкотрон электронного тока. Заметим, что соленоид пушки включается позднее включения разряда, и именно с этим связана задержка появления текущего регистрируемого тока. На Рис. 7 в более подробном масштабе показаны текущий ток и потенциал на фоне тока дуги. Времена выключения и времена спада (уменьшения сигнала до уровня $1/e$) приведены в таблице. Время выключения текущего тока легко определить, поскольку реально поясом Роговского измеряется наводимая э.д.с., а представленная «осциллограмма» получена путём численного интегрирования.

	Время выключения, мкс	Время спада (до $1/e$), мкс
Ток пушки	4513	18
Текущий ток	4523	71
Потенциал зонда	4513	27

Из графиков и таблицы видно, что как только выключается ток в пушке, так тут же исчезает потенциал и падает продольный ток, втекающий в пробкотрон. То, что время спада текущего тока больше времени, за которое выключается ток пушки, объясняется очень просто — так распадается плазма. Есть задержка между изломами в кривых тока дуги и текущего тока. Но она составляет 10 мкс, а не 40 мкс. Анализ других выстрелов позволяет сказать, что обычно эта задержка составляет величину $0 \div 10$ мкс, а максимальная величина задержки — 18 мкс. Причём, в зависимости от того, в какой канал АЦП подавался сигнал тока дуги, просто программным образом обязательно возникает задержка 0, 2, 4 или 6 мкс. Дело в том, что ток дуги измерялся одним из четырёх каналов АЦП, и временной шаг составлял 8 мкс, а сигнал с пояса Роговского — в режиме одноканального измерения с временным шагом 2 мкс.

На Рис. 8 приведены ток дуги и текущий ток выстрела № 000696 (от предыдущего обсуждаемого выстрела он отличается более ранним, на 1,5 мс, включением соленоида и более ранним выключением пушки). Эти сигналы являются

² Автор выражает искреннюю благодарность П. Б. Багрянскому и А. Н. Карпушовой за предоставленную возможность ознакомиться с базой данных этих экспериментов.

именно теми сигналами, которые представлены авторами препринта [1] на *рисунке 1*. В данном случае, чтобы нагляднее увидеть задержку, эти сигналы представлены в относительном масштабе и вместе с изначальным регистрируемым сигналом пояса Роговского, из которого интегрированием получается текущий ток. И сразу же видно, что ни о какой *неизменности I_{\parallel} в течении макроскопического в условиях эксперимента времени $\tau \approx 40$ мкс в случае быстрого выключения тока дуги в источнике* и говорить не приходится.

Падение продольного тока при инверсии радиального электрического поля

Наиболее патологический факт — это значительное падение (до 200 А) полного продольного тока I_{\parallel} в протяженном плазменном столбе при инверсии в нем радиального электрического поля [1, стр. 7-8].

Вряд ли к этому факту следовало приписывать такое определение. Возможное объяснение этого факта может быть найдено в работе [7].

Некоторые комментарии

В данной статье намеренно не обсуждается турбулентное динамо, чтобы не отвлекаться от главного — анализа представленных экспериментальных результатов. Возможность дискуссии можно проиллюстрировать комментариями к цитатам препринта [1].

Для проверки в эксперименте предсказаний теории относительно радиальной зависимости турбулентной э.д.с. был выбран участок плазменного столба протяженностью $\Delta z = 40$ см с центром во входной по течению струи пробке концевой системы АМБАЛ-М ($z = 86$ см), где продольные градиенты плотности и температуры плазмы минимальны [1, стр. 37]. — Это в пробке-то продольные градиенты плотности и температуры плазмы минимальны!

В струях мишенной плазмы... Вряд ли всю плазму на установке АМБАЛ-М следует рассматривать как струйную, подразумевая под этим столбчатую. Это совсем не очевидно. Более того, для этого утверждения следует отказаться от заявленных, в том числе и самими авторами, утверждений [2] о получении термобарьера и амбиполярного потенциала в пробкотроне. Это обобщение крайне необоснованно. Очень странным выглядит в *формуле (35)* вынесение из-под интеграла коэффициента турбулентной диффузии. Дело в том, что параметры плазмы (плотность, температуры, потенциал, размер) на протяжении плазменного столба изменяются очень сильно, на $1 + 2$ порядка, и рассматривать всю плазму как струйную, по мнению автора данной статьи, нельзя.

Заключение

Все экспериментальные результаты, представленные в препринте [1], не убеждают в обнаружении турбулентного динамо в конкретных открытых ловушках. Более того, экспериментальный материал представлен так, что возникает убеждение в попытке желаемое выдать за действительное.

Литература

1. А. А. Кабанцев, В. Б. Рева, В. Г. Соколов. *Турбулентное динамо в открытых ловушках*. Препринт 97-37, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, 1997.
2. Т. Д. Ахметов, В. С. Белкин, Е. Д. Бендер и др. *Создание горячей стартовой плазмы в концевой системе АМБАЛ-М*. Физика плазмы **23** (1997) 988. // Препринт 96-81, Новосибирск, ГНЦ РФ ИЯФ СО РАН, 1996.
3. Т. Д. Ахметов, В. И. Давыденко, А. А. Кабанцев, В. Б. Рева, В. Г. Соколов, С. Ю. Таскаев. *Продольный ток и магнитные флуктуации в стартовой плазме установки АМБАЛ-М*. Физика плазмы **24** (1998) вып. 11. // Препринт 97-4, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, 1997.
4. В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термояд. синтез **1** (1980) 57.
5. А. А. Ivanov et al. Proc. of 22st EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Bournemouth, 1995, v. 19c, p. IV, pt. 193.
6. Г. И. Димов, А. А. Иванов, Г. В. Росляков. Физика плазмы **8** (1982) 970.
7. С. Ю. Таскаев. *Поперечный ток на периферии стартовой плазмы открытой ловушки АМБАЛ-М*. Физика плазмы **25** (1999) вып.1. // Препринт 97-92, Новосибирск, ИЯФ СО РАН, 1997.

Все препринты ИЯФ СО РАН можно получить на Web-узле ИЯФ СО РАН по адресу <http://www.inp.nsk.su/preprint>.

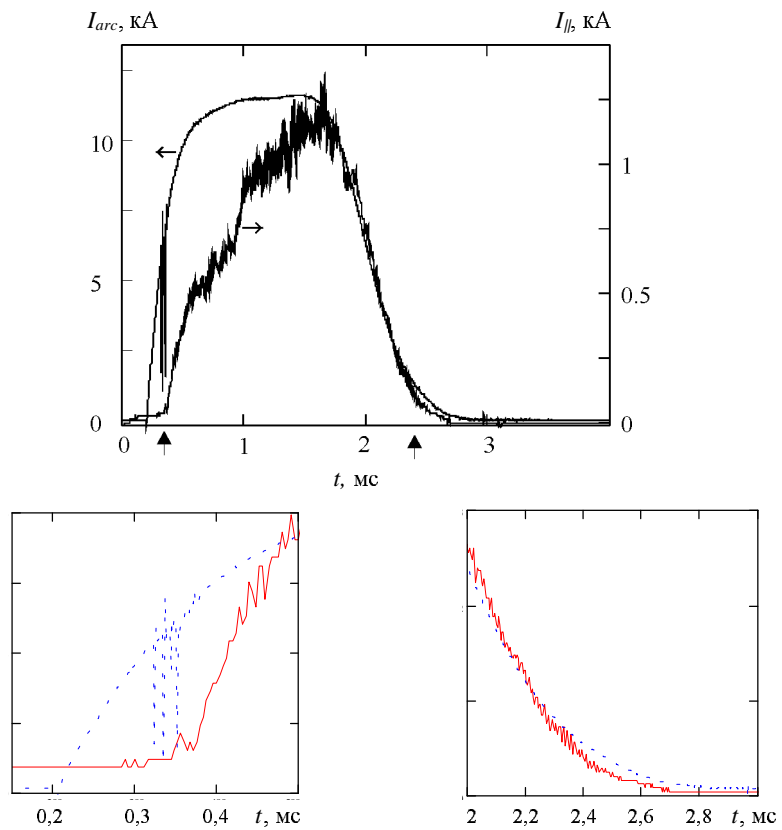


Рис. 2. Осциллограммы тока дуги I_{arc} (пунктир) и продольного тока в пробкотроне I_{\parallel} . Стрелками на временной шкале помечены моменты «включения» и «выключения». На нижних рисунках осциллограммы показаны в более подробном масштабе.

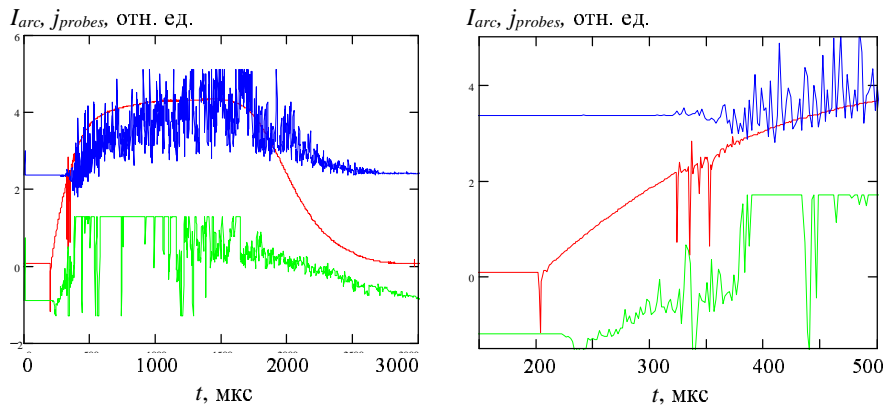


Рис. 3. Ток дуги и ток двойного симметричного ленгмюровского зонда в пробкотроне $z = -25$ см (сверху на графиках) и в транспортирующей области $z = -325$ см (снизу).

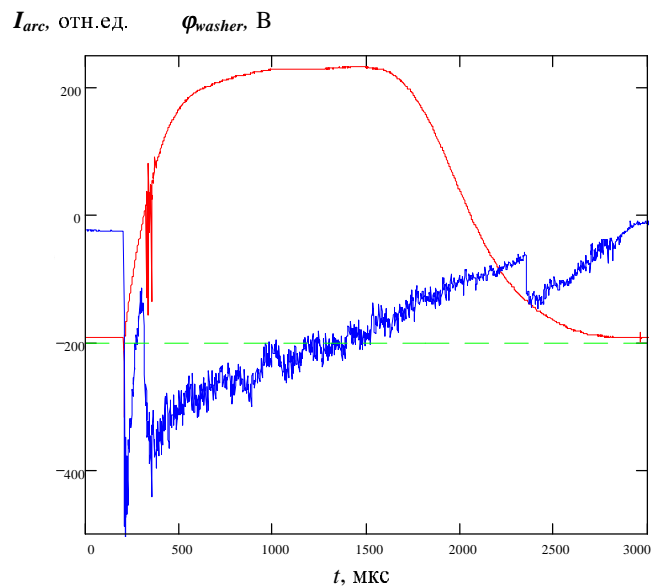


Рис. 4. Ток дуги (сверху) и потенциал центрального электрода пушки.

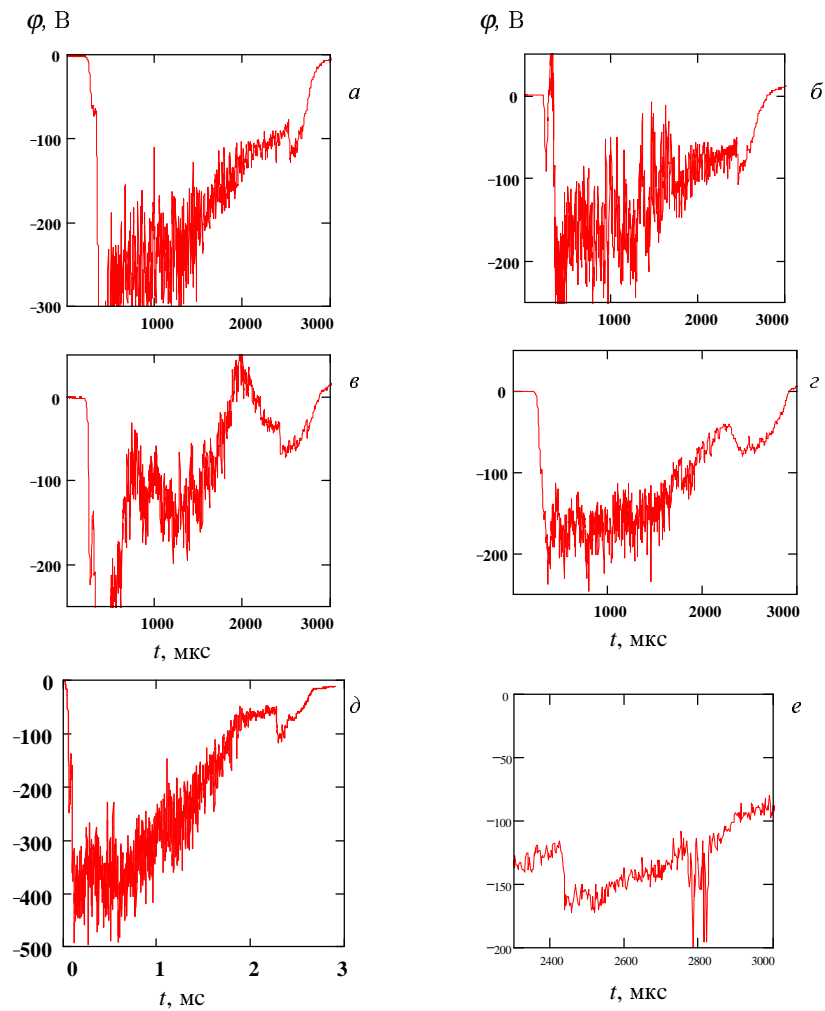


Рис. 5. Осциллограммы плавающего потенциала ленгмюровского зонда. а — пробкотрон ($z = -25$ см, $r = 2$ см), б — транспортирующая область ($z = -168$ см, $r = 2,9$ см), в — транспортирующая область ($z = -325$ см, $r = 4,2$ см), г — полукасп ($z = 168$ см, $r = 10$ см), д — пробка ($z = -115$ см, $r = 0,5$ см); е — осциллограмма потенциала катода.

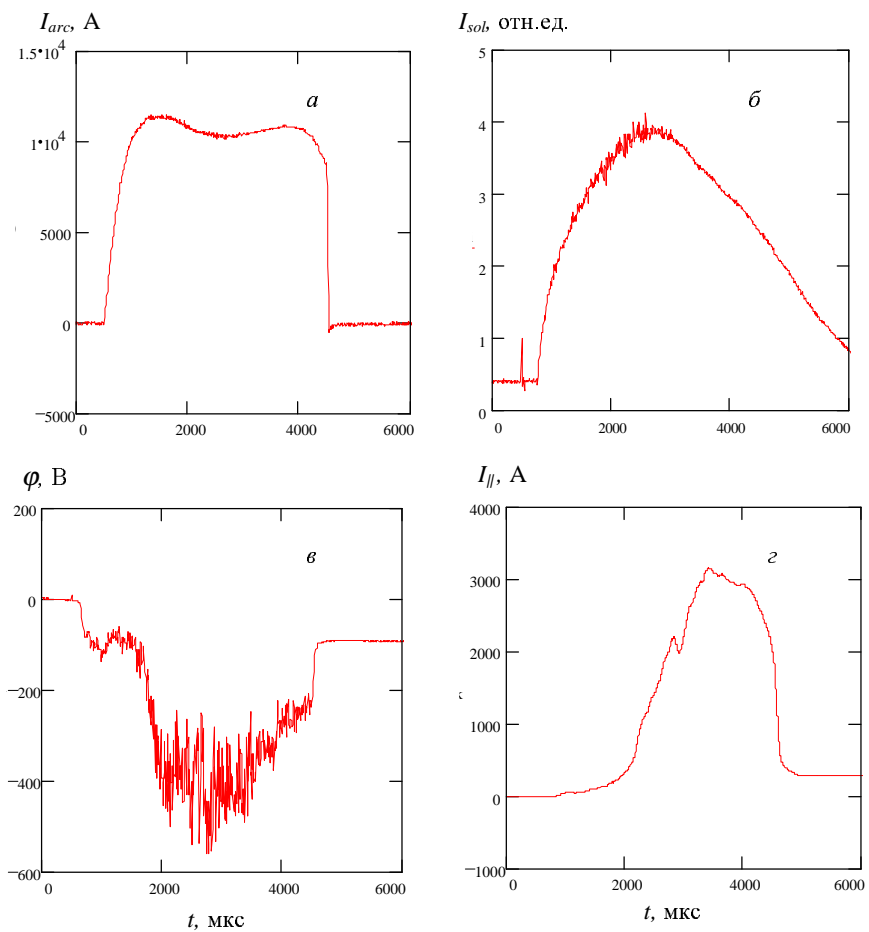


Рис. 6. Осциллограммы тока дуги пушки (а), тока соленоида пушки (б), плавающего потенциала зонда, расположенного в пробкотроне за центром в пробочном отношении 3 на радиусе 1,5 см (в), тока, измеряемого поясом Роговского перед входом в пробку (г).

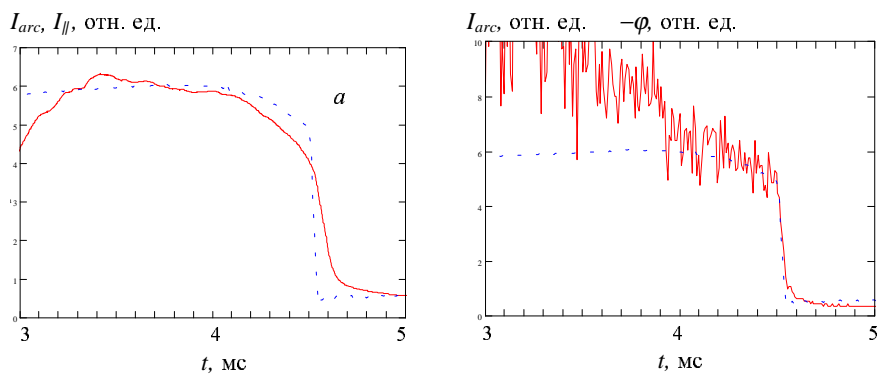


Рис. 7. Ток, измеряемый поясом Роговского (а) и плавающий потенциал зонда (б) на фоне тока дуги (штриховая линия).

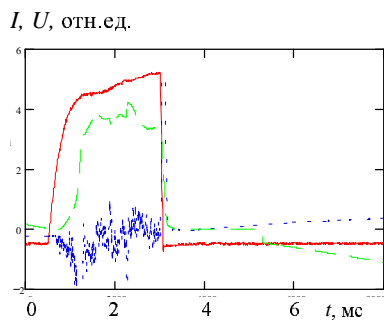


Рис. 8. Осциллограммы тока дуги (сплошная линия) и сигнала пояса Роговского (пунктирная линия). Полученный интегрированием текущий продольный ток показан штриховой линией.

