УДК 539.3

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЕНИЯ ФЛАЕРА ПРИ УДЛИНЕНИИ ИМПУЛЬСА ТОКА НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

*Е.В. Грабовский¹, А.Н. Грибов¹, Г.М. Олейник¹, С.И. Ткаченко^{1, 2}, А.О. Шишлов¹*¹ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Троицк, Россия²Московский физико-технический институт (государственный университет), Московская область, Долгопрудный, Россия

На установке Ангара-5-1 с целью создания мегабарного давления с помощью магнитного поля тока, протекающего по образцу, был модернизирован выходной узел. Для увеличения импульса силы, действующей со стороны магнитного поля на флаер, были рассмотрены варианты увеличения длительности воздействия магнитного поля путём управляемого закорачивания тока. В соответствии с математическим моделированием при затягивании импульса тока можно получить увеличение скорости флаера в 2 раза.

Ключевые слова: магнитное поле, флаер, индуктивность, кроубар, ударная волна.

THE INCREASING OF THE EFFICIENCY OF THE FLYER ACCELERATION WHEN EXTENDING THE CURRENT PULSE ON THE ANGARA-5-1 INSTALLATION

*E.V. Grabowski¹, A.N. Gribov¹, G.M. Oleinik¹, S.I. Tkachenko^{1, 2}, A.O. Shishlov¹*¹SSC Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, Moscow, Troitsk, Russia²Moscow Institute of Physics and Technology (state University), Moscow region, Dolgoprudny, Russia

On installation Angara-5-1 with the aim of creating megabar pressure using the magnetic field of the current flowing through the sample, the output node was upgraded. Some options were considered by controlled current croubar to increase the impulse of the force exerted by the magnetic field on the flyer and the duration of the magnetic field. In accordance with mathematical modelling in delaying of the current pulse it is possible to increase the speed of the flyer twice.

Key words: magnetic field, flyer, inductance, kroubar, shock wave.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-74-79

ВВЕДЕНИЕ

Нагружение образца магнитным полем позволяет исследовать динамические характеристики вещества при субмикросекундных процессах. Измерение скорости тыльной поверхности образцов, изготовленных из различных материалов, при воздействии на них флаера, который можно разогнать до различных скоростей, позволит уточнить уравнение состояния вещества [1—4].

На установке Ангара-5-1 [5] для разгона флаеров и создания высоких давлений проведена модернизация электродной системы, что позволило уменьшить индуктивность и увеличить ток через нагрузку. Получено, что в выходной части установки при межэлектродных зазорах около 3 мм ток с временем нарастания 150 нс достигает 5 МА, линейная плотность тока на флаере — 5 МА/см [6].

При математическом моделировании протекания субмикросекундного мегаамперного импульса тока по алюминиевому флаеру получено, что при толщине флаера 900 мкм к моменту времени ~500 нс вещество флаера вблизи тыльной поверхности на глубине около 200 мкм по-прежнему находится в плотном твёрдом состоянии, скорость тыльной поверхности к этому моменту достигает ~10 км/с [7].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились на установке Ангара-5-1 [5] — генераторе импульсной электрической мощности, который состоит из восьми модульных генераторов, включённых параллельно. Единичный энергозапас установки ~1,2 МДж.

Для транспортировки и концентрации импульсной энергии на нагрузку в вакуумной камере применён многоканальный концентратор с магнитной самоизоляцией. Вакуумная камера установки имеет восемь вводов для коаксиальных вакуумных транспортирующих линий (ВТЛ) с магнитной самоизоляцией от

модульных генераторов. Каждая ВТЛ представляет собой два соосных металлических электрода с зазором между ними 1 см. Вблизи суммирования токов разных модулей эти электроды становятся коническими. Суммирование токов восьми модулей (параллельное соединение ВТЛ) происходит на радиусе 6 см.

На установке Ангара-5-1 для разгона флаеров и создания высокого давления в условиях, близких к безударному сжатию, проведена модернизация концентратора — электродной системы, которая объединяет ток всех восьми модулей на общую нагрузку. Это позволило несколько уменьшить индуктивность концентратора и увеличить ток через нагрузку и погонную плотность тока на ней. Поскольку электроды концентратора находятся в условиях вакуумной изоляции, уменьшение зазоров между электродами, уменьшающее индуктивность, может приводить к повышению вакуумных утечек и уменьшению тока через нагрузку. Вопрос о поведении электродов при прохождении тока высокой погонной плотности (свыше 1 МА/см) по электродам в условиях его скинирования в вакууме исследовался в работах [8—11]. Для наших целей важно, что зазоры между электродами около 3 мм при длительности импульса около 100 нс позволяют проводить ток до 4 МА/см⁻¹ по линиям с вакуумной изоляцией.

Измерение токов и конструкция флаера. Измерение тока на выходе мощных генераторов в вакууме представляет особую сложность. Напряжение в ВТЛ достигает мегавольтового уровня, зазор между катодом и анодом в наших экспериментах составлял 3 мм. Распространение электромагнитного импульса в таких условиях происходит только после установления режима магнитной самоизоляции [12, 13]. До установления режима магнитной самоизоляции протекание тока по ВТЛ сопровождается электронными утечками с катода на анод.

Топология магнитного поля в районе суммирования такова, что там имеются области с нулевым магнитным полем. В этих областях существуют электронные утечки даже после установления режима магнитной самоизоляции. Поверхности электродов при мощных электронных утечках покрываются плазмой. Часть тока при этом начинает течь по этой плазме.

Достоверное измерение тока в этих условиях возможно только при измерении одной и той же величины различными методами. Сопоставление друг с другом результатов измерения одной и той же величины, полученных различными методами, даёт уверенность в корректности измерений и позволяет оценить погрешность измерений. В наших экспериментах полный ток регистрировался с помощью системы магнитных зондов (рис. 1):

- восемь зондов dJV (по одному на каждом модуле) измеряли ток ВТЛ на радиусе 404 мм;
- восемь зондов dJC (по одному на каждом модуле) измеряли ток ВТЛ на радиусе 102 мм;
- восемь зондов dJL на большом аноде измеряли ток на радиусе 56 мм;

— для контроля тока непосредственно напротив флаера расположен миниатюрный магнитный зонд dJA (см. рис. 1 и 2), аналогичный зонду, использованному в [14]. Зонд монтировался на основе кабеля РК50-3-22 из цельнометаллической трубки путём пайки жилы к трубке, образуя при этом петлю размером около 1 мм². Чувствительность зонда калибровалась на генераторе [15].

Рис. 1. Схема подключения одной из конических ВТЛ концентратора к нагрузке и расположение датчиков dJV (на радиусе 404 мм), dJC (на радиусе 102 мм), dJL (на радиусе 56 мм) и миниатюрного магнитного зонда dJA вблизи флаера

Рис. 2. Схема одного из вариантов центральной части концентратора: 1 — анод; 2 — катод; 3 — стержень, соединяющий анод и катод; dJA — миниатюрный магнитный зонд; участок анода толщиной 1 мм вблизи этого стержня, имеющий размер 6 мм по вертикали, является флаером

Схема расположения флаера показана на рис. 2. Внутренняя часть анода имеет анодную полость диаметром 44 мм. Анод и катод соединены стержнем диаметром 6 мм. Благодаря асимметричному расположению стержня внутри анодной цилиндрической полости диаметром 44 мм ток в анодной полости концентрируется вблизи одно-миллиметрового зазора между стержнем и анодом (см. рис. 2). Участок анода размером 6 мм, изображённый на рис. 2, является флаером.

Рис. 3. Профили тока, полученные с помощью разных зондов: dJV (на радиусе 404 мм), dJC (на радиусе 102 мм), dJL (на радиусе 56 мм) и миниатюрным магнитным зондом dJA вблизи флаера

Рис. 4. Условная картина магнитных силовых линий в одном из вариантов центральной части концентратора

Рис. 5. Схема введения в конструкцию выходного узла закорачивающего разрядника: 1 — анод; 2 — катод; 3 — стержень, соединяющий анод и катод; 4 — закорачивающая шпилька; d — зазор между закорачивающей шпилькой и катодом

Как отмечалось, полный ток регистрировался с помощью системы магнитных зондов: dJV (на радиусе 404 мм), dJC (на радиусе 102 мм), dJL (на радиусе 56 мм) и миниатюрным магнитным зондом dJA вблизи флаера. На рис. 3 представлены профили тока, полученные с помощью этих зондов.

Как видно, ток по зондам dJV, dJC, dJL достигает 5 МА. До момента 850 нс показания миниатюрного зонда dJA совпадают с показаниями перечисленных зондов. После момента времени 850 нс миниатюрный зонд dJA показывает завышенные значения тока, что объясняется проникновением тока в окружающий зонд металл и, в результате, увеличением чувствительности зонда.

Как видно, ток по зондам dJV, dJC, dJL достигает 5 МА. До момента 850 нс показания миниатюрного зонда dJA совпадают с показаниями перечисленных зондов. После момента времени 850 нс миниатюрный зонд dJA показывает завышенные значения тока, что объясняется проникновением тока в окружающий зонд металл и, в результате, увеличением чувствительности зонда.

Был проведён расчёт магнитного поля в этой полости. На рис. 4 представлена условная картина магнитных силовых линий. Условной она является по двум причинам. Во-первых, она получена в предположении того, что высота анодной полости гораздо больше её диаметра, что совсем не так. Во-вторых, не учитывается проваливание тока и магнитного поля в глубь металла. Тем не менее она показывает качественную картину усиления магнитного поля вблизи стержня. Получено, что в зазоре 1 мм между стержнем и участком, расположенным вблизи анода, создаётся сильное магнитное поле масштаба 2 МГс. Под действием такого поля этот участок ускоряется наружу от анодной полости (в направлении справа налево на рис. 2).

Удлинение импульса тока. Для увеличения импульса силы, действующей со стороны магнитного поля на флаер, были рассмотрены варианты введения в конструкцию концентратора элементов, позволяющих увеличить длительность воздействия магнитного поля путём управляемого крутильного (закорачивания) тока. Таким элементом была шпилька (4 на рис. 5) диаметром 3 мм, проходящая через анод. Конец этой шпильки располагался на расстоянии d от катода. Подбирая величину зазора d , можно было добиться его пробоя в некоторый момент времени. В случае пробоя в контуре, образованном анодом, шпилькой,

катодом и стержнем, соединяющим анод и катод, захватывался магнитный поток и затягивался ток.

Временной профиль тока в анодной полости в одном из выстрелов представлен на рис. 6 (кривая 1). Как видно на этом рисунке, пробой промежутка d произошёл в момент времени 780 нс, через 50 нс после начала тока. После этого момента времени ток выходит на стационар. Однако длится этот стационар недолго, около 30 нс. Уже к моменту времени 815 нс работа генератора установки Ангара-5-1 приводит к дальнейшему нарастанию тока.

Таким образом, пробой промежутка d произошёл слишком рано, через 50 нс после начала тока. Величина зазора d в этом выстреле была 1 мм. Проблема предложенной конструкции состоит в том, что при малых зазорах (~1 мм) пробой происходит слишком рано, а при увеличении зазора до 2 мм он вообще не происходит.

На установке Ангара-5-1 естественным образом происходит такое закорачивание. Импульс генератора установки Ангара-5-1 двуполярный. После изменения знака напряжения в некоторый момент времени (а ток в этот момент знака не меняет!) направление дрейфа электронов в ВТЛ меняется на противоположное, т.е. в сторону поверхности разделительной диафрагмы вода—вакуум. Вследствие этого происходит пробой разделительной диафрагмы (кроубар) [16]. Он происходит регулярно после изменения знака напряжения в ВТЛ. Время наступления кроубара, отсекающего нагрузку от генератора установки Ангара-5-1, мало зависит от вида нагрузки и составляет 100—130 нс. На рис. 6 представлен суммарный ток установки на разделительной диафрагме: кривая 2 — со стороны водяных передающих линий, кривая 3 — со стороны ВТЛ. Как видно на рисунке, ток со стороны воды двуполярный. Достигает максимума в момент 845 нс. В момент максимума тока напряжение в ВТЛ меняет знак и электроны в ВТЛ начинают дрейфовать в сторону разделительной диафрагмы, что вызывает её пробой. При этом в ВТЛ захватывается магнитный поток и затягивается ток. Действительно, ток со стороны вакуума (кривая 3) почти не меняется.

Рис. 6. Ток J в разных частях установки: 1 — ток в анодной полости в одном из выстрелов; 2 — суммарный ток установки на разделительной диафрагме со стороны водяных передающих линий; 3 — суммарный ток установки на разделительной диафрагме со стороны ВТЛ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ФЛАЕРА

Выполнено исследование ускорения алюминиевого флаера при различных формах импульса тока (рис. 7) в соответствии с одномерной МГД-моделью, описанной в [10]. При расчётах использовались широкодиапазонное полумпирическое уравнение состояния [17] и модель проводимости алюминия в конденсированных фазах (твёрдая и жидкая) [18], а также модель проводимости в плазменном состоянии [19]. При расчётах линейная плотность тока была взята такая же, как в экспериментах 5 МА/см, толщина флаера 900 мкм.

На рис. 8 представлена временная зависимость скорости рабочей поверхности флаера и его цен-

Рис. 7. Временная зависимость тока в случае обычного (1) и затянутого (2) импульса тока

Рис. 8. Временная зависимость скорости рабочей поверхности флаера (—) и его центрального слоя (---) в случае обычного (1) и затянутого (2) импульса тока

Рис. 9. Распределение температуры по толщине алюминиевого флаера вблизи его рабочей поверхности в различные моменты времени: 1—6 — с обычным импульсом тока (I — 80; 2 — 160; 3 — 200; 4 — 240; 5 — 340; 6 — 480 нс); 7 — с удлинённым импульсом тока 480 нс; 8, 9 — температура плавления и испарения алюминия при обычных условиях

480 нс не превышает температуру плавления алюминия при обычных условиях (линии 6 и 7).

трального слоя. Видно, что скорости этих слоёв отличаются незначительно, такое поведение характерно для конденсированных фаз. Кроме того, можно сказать, что в случае использования затянутого импульса тока можно добиться более высокой скорости рабочей поверхности флаера.

На рис. 9 представлены численные данные по распределению температуры по толщине флаера. Масштаб выбран таким образом, чтобы в первую очередь были представлены распределения вблизи рабочей поверхности флаера (поверхности, которая должна взаимодействовать с исследуемым образцом). Видно, что довольно быстро (уже к 160-й нс) тыльная поверхность флаера, по которой протекает ток, нагревается выше критической температуры, при этом в обоих режимах температура слоёв, лежащих вблизи рабочей поверхности, и к моменту

ВЫВОДЫ

Таким образом, с одной стороны, были реализованы варианты введения в конструкцию концентратора элементов, позволяющих увеличить длительность тока. Однако это увеличение длительности было незначительным. С другой стороны, показано, что на установке Ангара-5-1 естественным образом происходит закорачивание за счёт пробоя разделительной диафрагмы.

В соответствии с математическим моделированием при затягивании импульса тока на 200 нс можно получить скорость рабочей поверхности флаера в 2 раза большую (до 20 км/с), чем в случае обычного импульса тока.

Работа поддержана РФФИ, грант № 16-12-10487.

REFERENCES

1. Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. Shock-wave phenomena in condensed mediums. — M.: Yanus-K, 1996. 407 p. (in Russian).
2. Kanel G.I., Razorenov S.V., Fortov V.E. Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter. — New York: Springer, 2004.
3. Kanel G.I., Razorenov S.V., Fortov V.E. — Uspekhi fizicheskikh nauk (Advances in physical sciences), 2007, vol. 177, № 8, pp. 809—830 (in Russian).
4. Garkushin G.V., Ignatova O.N., Kanel G.I., Meyer L., Razorenov S.V. — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solid, 2010, № 8, pp. 155—163 (in Russian).
5. Al'birov Z.A., Velikhov E.P., Veretennikov A.I., Glukhikh V.A. et al. — Atomnaya energiya (Atomic energy), 1990, vol. 68, № 1, pp. 3—16 (in Russian).
6. Tkachenko S.I., Grabovskiy E.V., Gribov A.I., Oleynik G.M., Shishlov A.O., Mitrofanov K.N. The study of the aluminium flyer parameters at linear current density of 4,5 MA/sm on installation Angara-5-1. — In coll.: 2-d All-Russia conference «Pulse highcurrent vacuum and semiconductor electronics PHVSE-2016 (ISVPE-2016)». PhIAS, 20—30 September 2016, p. 54 (accepted for publication in journal Proceedings of the RAS. Ser.Physical) (in Russian).
7. Grabovskii E.V., Alexandrov V.V., Branitskii A.V., Frolov I.N., Gribov A.N., Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Laukhin Ya.N., Oleinik G.M., Sasorov P.V., Shishlov A.O., Tkachenko S.I. Flyer acceleration by magnetic pressure on Angara-5-1 installation. — In: Abstract of XXXII International Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Elbrus, March 1—6, 2017 (publication).

8. Anan'ev S.S., Bakshaev Yu.L., Bartov A.V., Blinov P.I., Dan'ko S.A., Zhuzhunashvili A.I., Kazakov E.D., Kalinin Yu.G., Kingsep A.S., Korolev V.D., Mizhiritskiy V.I., Smirnov V.P., Chernenko A.S., Tkachenko S.I. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2008, vol. 34, № 7, pp. 627—640 (in Russian).
9. Anan'ev S.S., Bakshaev Yu.L., Bartov A.V., Blinov P.I., Dan'ko S.A., Zhuzhunashvili A.I., Kazakov E.D., Kalinin Yu.G., Kingsep A.S., Korolev V.D., Mizhiritskiy V.I., Smirnov V.P., Ustroeve G.I., Chernenko A.S., Shashkov A.Yu., Tkachenko S.I. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue. 4, pp. 3—24 (in Russian).
10. Grabovskiy E.V., Levashov P.R., Oleynik G.M., Olson S.L., Sasorov P.V., Smirnov V.P., Tkachenko S.I., Khishchenko K.V. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2006, vol. 32, № 9, pp. 782—793 (in Russian).
11. Zhigalin A.S., Russkikh A.G., Oreshkin V.I., Chaykovskiy S.A., Ratakhin N.A., Baksht R.B. — Izvestiya vuzov. Fizika (Proceedings of higher schools. Physics), vol. 58, № 9—2, pp. 113—117 (in Russian).
12. Smirnov V.P. Production of the highcurrent electron beams. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1977, № 2, pp. 7—31 (in Russian).
13. Mesyats G.A. Generation of the high-power nanosecond impulses. — M.: Sovetskoe radio (Soviet radio), 1974 (in Russian).
14. Zukakishvili G.G., Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Oleynik G.M., Porofeev I.Yu., Sasorov P.V., Frolov I.N. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2005, vol. 31, № 11, pp. 978—988 (in Russian).
15. Grabovskiy E.V., Gribov A.N., Oleynik G.M. Generator for calibration of the current and voltage sensors of Angara-5-1 installation. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 2008, № 5, pp. 81—85 (in Russian).
16. Grabovskiy E.V., Zaytsev V.I., Savochkin V.N., Yampol'skiy I.R. Study of the interaction of generator with the load on pulse thermonuclear installation Angara-5-1. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1992, № 5, pp. 116—121 (in Russian).
17. Fortov V.E., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Lomonosov I.V. — Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 1998, vol. 415, pp. 604—608.
18. Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields. — Amsterdam: Springer, 1970.
19. Oreshkin V.I., Baksht R.B., Labetskiy A.Yu. et al. — Zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Journal of technical physics), 2004, vol. 74, issue 7, p. 38 (in Russian)..

AUTHORS

Grabovskiy E.V. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Gribov A.N. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Oleynik G.M. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; oleynik@triniti.ru

Tkachenko S.I. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Shishlov A.O. State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Received 30 August 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol.40, issue 4, pp. 74—79.