

УДК 621.317:533.9.08

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ У МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ С НАПЫЛЁННЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ НА УСТАНОВКЕ «АНГАРА-5-1»

*Е.В. Грабовский, В.В. Джангобегов, Г.М. Олейник*

*ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия*

Информация о процессах, происходящих на начальной стадии (первые 10—15 нс разряда) токовой имплозии сборок из микронных проволок (проволочных лайнеров), представляет интерес для создания и проверки расчётно-теоретических моделей перспективных источников мощного рентгеновского излучения на основе многопроволочных Z-пинчей. Для проведения соответствующих исследований необходимо применение диагностик с высоким временным разрешением. В данной работе была исследована начальная стадия имплозии проволочных и волоконных лайнеров с напылённым на поверхность металлом на установке «Ангара-5-1» с помощью электротехнических диагностик с временным разрешением не хуже 1 нс. По измеренным току и напряжению определён энерговклад в вещество нагрузки. Показано, что применение висмутового покрытия толщиной 1 мкм на вольфрамовых проволоках диаметром 6 мкм позволяет добиться увеличения энергии, вкладываемой в проволоки до пробоя ( $25 \pm 3$  эВ/ат.), по сравнению с такими же проволоками без покрытия ( $11,2 \pm 1,4$  эВ/ат.). Покрытие из алюминия толщиной 0,4 мкм, напротив, понижало энерговклад в проволоки ( $7,8 \pm 0,9$  эВ/ат.). Полученные результаты демонстрируют возможность управления энерговкладом в проволочные и волоконные лайнеры с помощью предварительного напыления на их поверхность металла с низкой температурой плавления. Правильно подобранные параметры напыления с учётом электро- и теплофизических свойств напыляемого металла могут позволить существенно повысить энерговклад в вещество лайнера до пробоя.

**Ключевые слова:** электротехнические измерения, диагностика плазмы, Z-пинч, многопроволочный лайнер, мощный импульсный генератор тока.

## INVESTIGATION OF THE INITIAL STAGE OF THE IMPLOSION OF WIRE ARRAYS WITH SPUTTERED METALLIC COATING ON THE ANGARA-5-1 FACILITY

*E.V. Grabovskii, V.V. Dzhangobegov, G.M. Oleinik*

*SRC RF Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Moscow, Russia*

Information about the processes that occur at the initial stage (first 10—15 ns of the discharge) of the current implosion of wire array is of interest to create and validate computational and theoretical models of promising sources of intense X-rays on the basis of Z-pinches. It is necessary to apply the high time resolution diagnostics for the relevant studies. The initial stage of the implosion of wires and fiber arrays with sputtered metallic coating was investigated using electrical diagnostics with a time resolution down up to 1 ns. Experiments were carried out on the «Angara-5-1» facility. The energy deposition into the load material was calculated from the measured current and voltage. It is shown that the use of a bismuth 1  $\mu\text{m}$  thick coating on the 6  $\mu\text{m}$  tungsten wire, allows to increase the energy deposition into the wire core before breakdown ( $25 \pm 3$  eV/atom), as compared with the same wire without coating ( $11.2 \pm 1.4$  eV/atom). On the contrary, 0.4  $\mu\text{m}$  aluminum coating reduces the energy deposition into the tungsten wire ( $7.8 \pm 0.9$  eV/atom). These results demonstrate an ability to control energy deposition into the wire and fiber arrays through the prior sputtering a nonrefractory metal on their surface. Properly chosen parameters of coating taking into account electrical and thermal properties of the sputtered metal can significantly enhance the energy deposition into the array conducting substance before voltage breakdown.

**Key words:** electrical measurements, plasma diagnostics, Z-pinch, wire array, high current generator.

### ВВЕДЕНИЕ

Одно из направлений исследований, проводимых в последнее время на установке «Ангара-5-1» [1] — динамика токовой имплозии смешанных по составу лайнерных сборок. В качестве нагрузок выступают, например, лайнеры из проволок и капроновых волокон с дополнительно напылённым на поверхность веществом [2, 3]. Такие исследования направлены на получение новых данных для создания и проверки расчётно-теоретических моделей имплозии лайнеров, которые планируется применять в качестве энергетического драйвера в различных схемах ИТС [4, 5].

Как известно, определяющим фактором динамики сжатия вещества цилиндрических проволочных лайнеров является затянутый во времени (около 80% от общего времени сжатия) процесс генерации плазмы из плотных остовов проволок (так называемых проволочных кернов), нагрев которых осуществляется за счёт теплопередачи от окружающей их токонесущей плазмы с малой плотностью [6]. Следовательно, от начального состояния кернов может зависеть дальнейший процесс имплозии. На состояние кернов, в свою очередь оказывают влияние процессы, происходящие при пробое проволок.

Взрыв проволок быстро нарастающим током высокой плотности широко исследован в экспериментах с одиночными проволоками. В начале протекания через неё тока проволока сильно нагревается, с её

поверхности начинает испаряться вещество, образуя вокруг проволоки газовый слой. В то же время с поверхности проволоки начинается сильная электронная эмиссия. Эмитированные электроны локализируются около поверхности проволоки под действием её магнитного поля, величина которого составляет десятки Тл, и ионизируют газообразный слой, окружающий проволоку [7]. В результате происходит пробой вдоль поверхности проволоки с образованием плазменной короны. Проводимость плазменной короны довольно высока из-за быстрого расширения, и практически весь ток переключается на плазменную корону. На процесс формирования плазменной короны существенным образом влияет состояние поверхности проволоки. Экспериментально установлено, что предварительное очищение поверхности проволоки путём прогрева [8] или применение диэлектрического покрытия [9] приводит к заметной задержке момента появления плазменной короны, что, в свою очередь, позволяет добиться повышения энерговклада в вещество проволоки до пробоя. На энерговклад в вещество проволоки также влияет скорость нарастания тока: чем она выше, тем больше энерговклад [10]. В свою очередь, от величины энергии, вложенной в проволоку до пробоя, зависит начальное состояние проволочного керна [11].

Между нагревом и пробоем одиночной проволоки и проволок в лайнерной сборке нет существенных отличий, так как начальные диаметры проволок (4—25 мкм) много меньше расстояний между ними в сборке (0,1—6 мм), и, следовательно, влияние соседних проволок на упомянутые процессы незначительно. Тем не менее изучение пробоя проволок в экспериментах по сжатию многопроволочных лайнеров на установках мегаамперного класса по-прежнему является актуальным, хотя и связано с определёнными трудностями. В частности, для определения энерговклада в лайнер до пробоя проволок на установке «Ангара-5-1» необходимо проведение измерений электротехнических параметров разряда (ток ~10—100 кА и напряжение ~100 кВ) с временным разрешением ~1 нс. Ранее проводившиеся измерения напряжения на нагрузке осуществлялись с помощью введённого на ось сборки резистивного делителя, который препятствовал формированию финального пинча [12]. Также стоит заметить, что в этих экспериментах был задействован лишь один из восьми модулей генератора «Ангара-5-1».

В данной работе были проведены измерения электротехнических параметров на начальной стадии токовой импльзии различных цилиндрических лайнеров импульсом тока от всех восьми модулей установки «Ангара-5-1». Цель работы состояла в определении энерговклада в проволочные и волоконные сборки с напылённым металлическим покрытием.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве нагрузок использовались цилиндрические сборки из вольфрамовых проволок ( $W \text{ } \varnothing 6 \text{ мкм}$ ) и капроновых волокон (к.в.  $\varnothing 25 \text{ мкм}$ ), на которые равномерно по всей высоте был нанесён слой висмута или алюминия с помощью технологии, описанной в работе [2]. Диаметр всех нагрузок составлял  $D = 12 \text{ мм}$ , число проволок или волокон  $N = 40$ . Параметры сборок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры лайнеров, использованных в экспериментах

№ выстрела	Материал проволоки (волокон)	Количество проволок (волокон)	Диаметр проволоки $\varnothing$ , мкм	Диаметр сборки $D$ , мм	Высота сборки $h$ , мм	Линейная масса сборки без напыления, мкг/см	Параметры напылённого покрытия: вещество, толщина $\Delta$ , линейная масса $m$ на всю сборку
5380, 5381	W	40	6	12	12	220	Bi, $\Delta \approx 1,0 \text{ мкм}$ , $m \approx 90 \text{ мкг/см}$
5382, 5458	Капрон	40	25	12	12	220	Bi, $\Delta \approx 0,3 \text{ мкм}$ , $m \approx 90 \text{ мкг/см}$
5383, 5384	W	40	6	12	15	220	Al, $\Delta \approx 0,4 \text{ мкм}$ , $m \approx 8,5 \text{ мкг/см}$
5385, 5386	Капрон	40	25	12	15	220	Al, $\Delta \approx 0,1 \text{ мкм}$ , $m \approx 8,5 \text{ мкг/см}$

На рис. 1 схематично представлен фрагмент выходного узла установки «Ангара-5-1» с установленным лайнером и используемыми в экспериментах электротехническими диагностиками.

Для подавления микросекундного предимпульса генератора непосредственно перед лайнером размещался предимпульсный разрядник [13].

Производная тока через лайнер  $dI/dt$  измерялась с помощью восьми петель, каждая из которых размещалась на радиусе 42 мм от оси цилиндрической нагрузки по направлению к соответствующе-

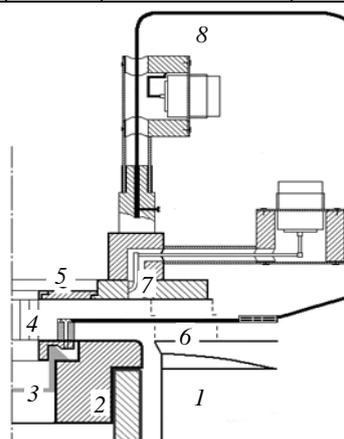


Рис. 1. Схематичный разрез выходного узла установки «Ангара-5-1»: 1 — передающая линия; 2 — катод; 3 — предимпульсный разрядник; 4 — лайнер; 5 — анод; 6 — место расположения обратного токопровода; 7 — датчик производной тока (токовая петля); 8 — датчик напряжения (индуктивный делитель)

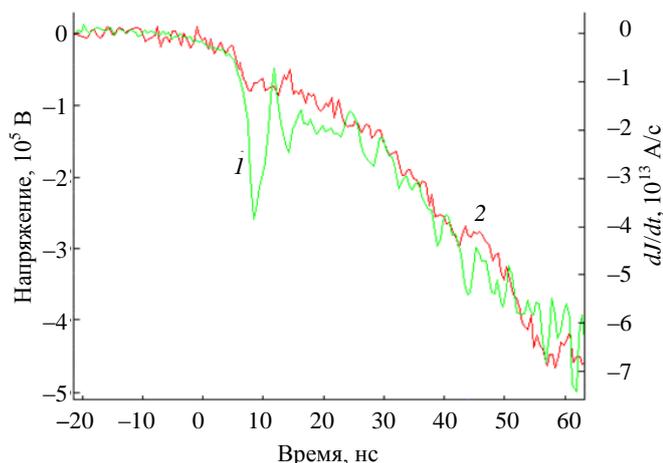


Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжения  $U_L$  (1) и производной тока  $dJ/dt$  (2)

это видно из того, что на большей части временного интервала  $U_L$  пропорционален  $dJ/dt$ . Падение омического напряжения на проволоках  $U_R$  будет определяться из соотношения

$$U_R(t) = U_L(t) - L_0 dJ/dt, \tag{1}$$

в котором  $L_0$  — индуктивность между фактическим местом измерения напряжения и начальным радиусом лайнера. Для индуктивного делителя, показанного на рис. 1, практически весь магнитный поток  $L_0 dJ/dt$  заключён между начальным радиусом лайнера и радиусом, на котором располагаются обратные токопроводы. Из соотношения сигналов  $U_L$  и  $dJ/dt$  на временном интервале с 30 нс по 60 нс, когда резистивная составляющая напряжения пренебрежимо мала  $L_0 \approx 6,7$  нГн. Данная величина хорошо согласуется с оценкой, произведённой по геометрическим размерам конструкций лайнерного узла  $L_{\text{геом}} \approx 6,5$  нГн.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведём электротехнические параметры в экспериментах с нагрузками из капроновых волокон (к.в.  $\varnothing 25$  мкм) с напылением. На выстрел № 5382 (рис. 3, а) была установлена сборка с напылённым висмутом (толщина напыления на каждое волокно  $\Delta \approx 0,3$  мкм по всей высоте сборки  $h = 12$  мм), на выстрел № 5386 (рис. 3, б) — с напылённым алюминием (толщина напыления на каждое волокно  $\Delta \approx 0,1$  мкм по всей высоте сборки  $h = 15$  мм). Помимо экспериментально полученных временных профилей омического напряжения на нагрузке и отнесённого к одному волокну тока, показано расчётное омическое напряжение на нагрузке. Расчёт производился по методу, описанному в работе [15]. Для произведения вычислений был взят временной профиль тока  $J(t)$ , полученный интегрированием экспери-

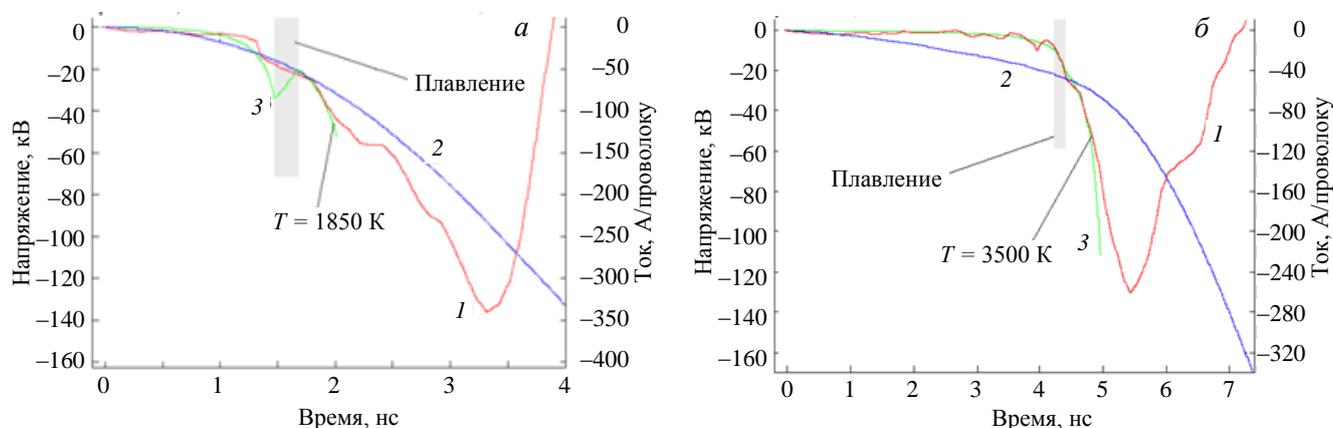


Рис. 3. Электротехнические параметры на стадии инициации сборок из капроновых волокон с покрытием 0,3 мкм висмута (а), алюминия (б): 1 — омическое напряжение  $U_R(t)$ ; 2 — ток в расчёте на одно волокно  $J(t)$ ; 3 — расчётное напряжение  $J(t)R(t)$

ментально зарегистрированного сигнала производной тока  $dJ/dt$  и отнесённый к одной проволоке. Предполагалось, что вся электрическая энергия, вкладываемая в металлический проводник (в конкретном

случае — проводящий слой), идёт на его нагрев, а потерями на теплопередачу и излучение можно пренебречь. Необходимые для расчёта зависимости удельной теплоёмкости и удельного сопротивления металла от температуры брались из справочных данных [16—18]. Таким образом находилась временная зависимость температуры проводника  $T(t)$  и омического напряжения  $J(t)R(t)$ .

В обоих случаях профиль омического напряжения, полученный из расчёта, хорошо согласуется с полученным экспериментально профилем  $U_R(t)$  до момента, когда согласно расчёту вещество покрытия достигает температуры, равной или чуть больше температуры кипения металла. На лайнерах, металлизированных алюминием, эта температура достигала примерно 3500 К, а на лайнерах, металлизированных висмутом, — 1850 К. Согласно данным эксперимента напряжение на нагрузке продолжало возрастать около наносекунды, пока не достигало максимального значения 130—140 кВ. При этом стоит заметить, что длина нагрузок с висмутовым напылением была несколько меньше.

Можно видеть, что длительность «резистивной фазы» на лайнерах с висмутовым покрытием была примерно в 2 раза меньше, а нагрев покрытия происходил ещё быстрее, хотя масса напылённого висмута более чем в 10 раз превосходила массу напылённого алюминия. Однако теплоёмкость алюминия примерно во столько же раз больше теплоёмкости висмута. Это означает, что если проводникам с указанными параметрами (см. табл. 1) будет сообщено одинаковое количество энергии, то их температура вырастет примерно на одну и ту же величину. В наших экспериментах темп введения энергии в лайнер с напылённым висмутом был в разы выше, что обнаруживается из сопоставления осциллограмм тока.

Измерения тока и напряжения были также проведены для лайнеров, составленных из 40 вольфрамовых проволок ( $\varnothing 6$  мкм) с напылением висмута (толщина слоя  $\Delta \approx 1,0$  мкм при высоте проволок  $h = 12$  мм) и алюминия (толщина слоя  $\Delta \approx 0,4$  мкм при высоте проволок  $h = 15$  мм). При расчёте омического напряжения по известному временному профилю тока  $J(t)$  проволока и напылённый на неё слой рассматривались как параллельные друг другу проводники, теплообменом между которыми можно пренебречь:

$$\begin{aligned} J_1^2(t)\rho_1(T)\frac{l}{S_1} &= m_1 C_{1p}(T)dT; \\ J_2^2(t)\rho_2(\Theta)\frac{l}{S_2} &= m_2 C_{2p}(\Theta)d\Theta; \\ J_1(t) + J_2(t) &= J(t); \\ J_1(t)\rho_1(T)\frac{l}{S_1} &= J_2(t)\rho_2(\Theta)\frac{l}{S_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $J_1(t)$  и  $J_2(t)$  — ток через проволоку и напылённый слой соответственно (все токи в расчёте на одну проволоку);  $l$  — длина проволоки;  $S_1$ ,  $m_1$ ,  $\rho_1(T)$  и  $C_{1p}(T)$  — сечение, масса, удельное сопротивление и теплоёмкость проволоки соответственно;  $S_2$ ,  $m_2$ ,  $\rho_2(\Theta)$  и  $C_{2p}(\Theta)$  — аналогично для напылённого слоя;  $T$  и  $\Theta$  — температура проволоки и напылённого слоя соответственно. Из приведённой системы уравнений следует соотношение

$$\frac{m_1}{S_1}\rho_1(T)C_{1p}(T)dT = \frac{m_2}{S_2}\rho_2(\Theta)C_{2p}(\Theta)d\Theta, \quad (3)$$

откуда определяется связь температур  $T$  и  $\Theta$ , после чего могут быть вычислены временные зависимости температуры и сопротивления проволоки и напылённого слоя, а также временной профиль напряжения на нагрузке.

Оценим масштабы локализации энергетических потерь на теплопроводность, для чего воспользуемся выражением

$$\Delta r = \sqrt{\frac{\lambda(T)\tau}{C_p(T)n}}, \quad (4)$$

в котором  $\lambda(T)$  и  $C_p(T)$  — коэффициент теплопроводности и теплоёмкость металла в зависимости от температуры;  $n$  — плотность;  $\tau$  — время нагрева. При нагреве до  $T \sim 1000$  К за характерное время  $\tau \approx 5$  нс для вольфрама и висмута соответственно имеем  $\Delta r_w \approx 0,4$  мкм,  $\Delta r_{\text{Вн}} \approx 0,2$  мкм, что много меньше величин диаметра проволоки и толщины напылённого слоя висмута. Для алюминия  $\Delta r_{\text{Al}} \approx 0,6$  мкм. Это даже несколько больше толщины напылённого слоя, что говорит о существенном влиянии процессов теплопередачи между проволокой и напылённым слоем алюминия при их нагреве. Однако при разнице температур между проволокой и покрытием  $\Delta T = |T - \Theta| \sim 100$  К мощность потерь на теплопроводность

$P_Q \sim \lambda dT/drS \sim \lambda \Delta T \pi \rho l / \Delta \sim 10^4$  Вт, в то время как сообщаемая проводникам электрическая мощность  $\sim 10^6$ — $10^7$  Вт. Таким образом, для конкретных условий эксперимента и параметров нагрузок выбранная методика расчёта в указанном временном интервале не давала существенных ошибок.

На рис. 4 показаны профили тока и напряжения  $U_R$ , полученные в эксперименте со сборкой с напылённым висмутом, а также расчётные временные зависимости напряжения (рис. 4, а), температура вольфрамовых проволок, температура нанесённого на них слоя висмута, распределение тока между проволокой и слоем висмута (рис. 4, б). Расчётное напряжение хорошо согласуется с экспериментальным вплоть до момента, когда покрытие оказалось нагретым до температуры 1850 К, что выше его точки кипения. При этом температура вольфрамовой проволоки составляла около 3000 К. Более интенсивный нагрев вольфрама вызван тем, что значительная часть тока протекала по проволоке, так как она обладала много меньшим сопротивлением по сравнению с напылённым на неё висмутовым слоем.

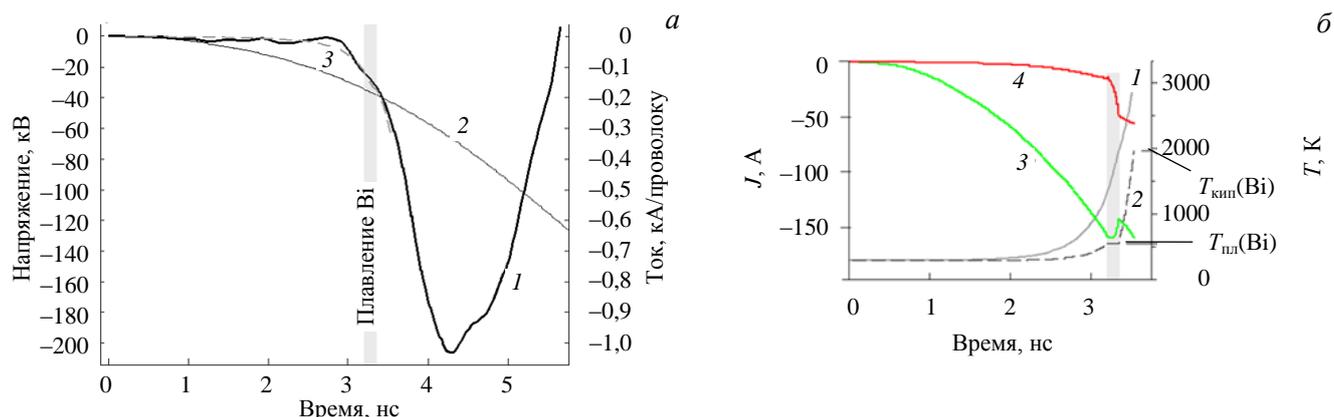


Рис. 4. Стадия инициации лайнера из вольфрамовых проволок ( $\varnothing 6$  мкм) с напылением висмута ( $\Delta \approx 1,0$  мкм): а — электротехнические параметры нагрузки: 1 — омическое напряжение  $U_R(t)$ , 2 — ток в расчёте на одну проволоку  $J(t)$ , 3 — расчётное напряжение  $J(t)R(t)$ ; б — расчётные зависимости от времени: 1 — температуры вольфрамовой проволоки, 2 — напылённого слоя, 3 — тока через проволоку, 4 — тока через напылённый слой

У нагрузок из вольфрамовых проволок с напылённым алюминием расхождение расчётного напряжения с экспериментально определённым начиналось с момента, когда алюминий достиг температуры кипения  $T_{кип} \approx 2792$  К (рис. 5). Согласно расчёту в первые 3,5 нс после начала тока темп нагрева проволоки и покрытия примерно одинаков, несмотря на то, что через алюминиевое покрытие протекало около трети тока генератора, а масса покрытия составляла всего лишь 3,9% от общей массы нагрузки. Далее вплоть до момента пробоя проволок, по-видимому, начинают играть роль процессы, не учтённые в расчёте: теплообмен между материалом покрытия и проволокой, образование плазменной короны вокруг проволоки. Стоит также отметить, что длительность «резистивной фазы» и момент максимума напряжения у вольфрамовых нагрузок с напылением разных металлов практически не отличаются.

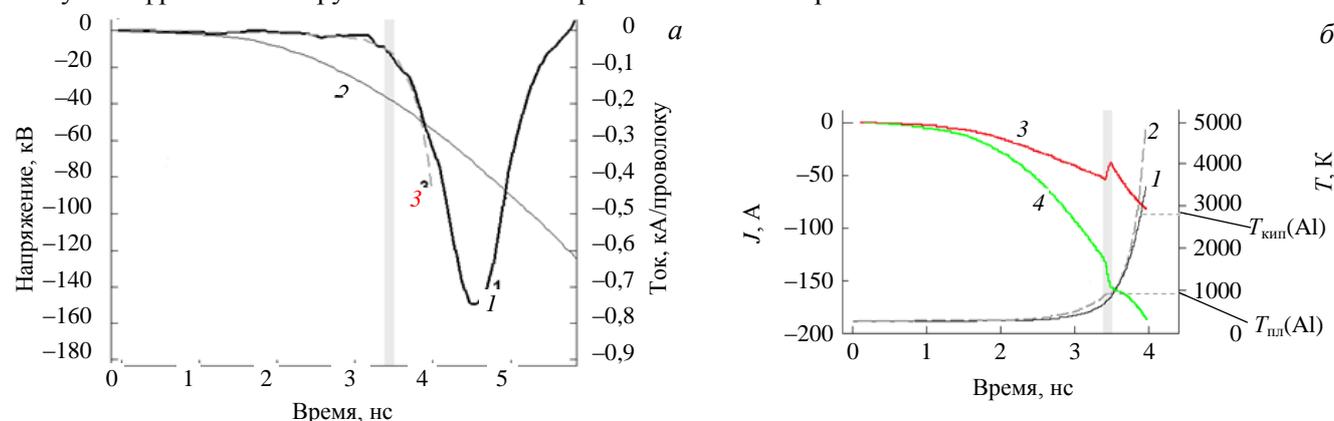


Рис. 5. Стадия инициации лайнера из вольфрамовых проволок ( $\varnothing 6$  мкм) с напылением алюминия ( $\Delta \approx 0,4$  мкм): а — электротехнические параметры нагрузки: 1 — омическое напряжение  $U_R(t)$ , 2 — ток  $J(t)$ , 3 — расчётное напряжение  $J(t)R(t)$ ; б — расчётные зависимости от времени: 1 — температуры вольфрамовой проволоки, 2 — напылённого слоя, 3 — тока через напылённый слой, 4 — тока через проволоку

Измерения тока и напряжения на лайнере на стадии инициации позволяют определить энерго вклад в лайнеры различных типов. Оценка среднего значения энергии  $E_d$ , вложенной в металлическое покрытие

тие до пробоя, была произведена путём интегрирования электрической мощности с последующей нормировкой на число атомов в проводнике:

$$E_d = \int_0^{t_b} J(t) U_R(t) dt, \quad (5)$$

где  $J$  — ток в расчёте на одну проволоку;  $U_R$  — омическое напряжение на проволоках лайнера;  $t_b$  — момент времени, когда напряжение на проволоках спадает вдвое по отношению к максимальному. Такой выбор пределов интегрирования объясняется тем, что в течение падения напряжения до нуля джоулев энерговклад распределяется между проволоками (металлизированными волокнами) и окружающей их плазмой.

В случае проволочных лайнеров с напылением по экспериментально определённым току и напряжению, вообще говоря, можно было определить лишь общий энерговклад в проволоку с напылением, так как распределение токов между проволокой и покрытием известно лишь до момента достижения покрытием температуры кипения. Исходя из имеющегося расчётного распределения токов, было сделано предположение, что распределение тока в процентном соотношении до пробоя оставалось таким же, как на момент окончания расчёта. Тогда получалось, что в проволоку с напылённым висмутом было введено 87% от общего значения энерговклада, а в проволоку с напылённым алюминием — 68%.

В табл. 2 приведены усреднённые значения вложенной электрической энергии в различные лайнеры вместе с соответствующей эксперименту с конкретной нагрузкой усреднённой скоростью нарастания тока в расчёте на одну проволоку  $\langle dJ/dt \rangle \approx J(t_b)/t_b$ . Также в таблице приведено значение энерговклада в цилиндрическую нагрузку из «чистых» вольфрамовых проволок, полученное в работе [14].

Т а б л и ц а 2. Энерговклад в различные проволочные и волоконные лайнеры

Проволока/волокно	$\langle dJ/dt \rangle$ , А/нс	Общий энерговклад, $E_d$ , мДж/см	Энерговклад в проволоку, эВ/ат.	Энерговклад в покрытие, эВ/ат.
W Ø6 мкм [14]	~100	32±4	11,2±1,4	—
К.в. Ø25 мкм + нап. Вi Δ ≈ 0,3 мкм	~80	25±3	—	23±3
К.в. Ø25 мкм + нап. Al Δ ≈ 0,1 мкм	~20	10,3±1,3	—	13,7±1,7
W Ø6 мкм + нап. Вi Δ ≈ 1,0 мкм	~100	81±9	25±3	10,6±1,3
W Ø6 мкм + нап. Al Δ ≈ 0,4 мкм	~100	33±4	7,8±0,9	13,6±1,6

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

У капроновых лайнеров с алюминиевым напылением длительность процессов «резистивной фазы» оказалась почти вдвое меньше по сравнению с алюминиевыми лайнерами (40 алюминиевых проволок диаметром 25 мкм каждая) из работы [14]. Хотя, с одной стороны, в этих экспериментах темп роста тока был в несколько раз медленнее по сравнению с выстрелами на другие нагрузки, с другой стороны, общая масса проводящего вещества составляла лишь 12,8 мкг, что более чем в 60 раз меньше массы сборки из алюминиевых проволок размером 25 мкм. В момент максимума напряжения значение введённой в напылённый слой энергии достигло примерно 4,9 эВ/ат. (энергия сублимации алюминия составляет 3,2 эВ/ат.), чего должно быть достаточно для полного превращения в плазму всего вещества покрытия. Формирование плазменной короны, вероятно, происходило в течение ~1 нс после того, как алюминиевое покрытие оказалось нагретым до 3500 К. К моменту максимума напряжения сопротивление плазменной короны становилось сопоставимым с сопротивлением покрытия и далее продолжало быстро спадать. Аналогичный сценарий можно предположить и при пробое волоконной нагрузки с висмутовым покрытием, где омическое напряжение также продолжало возрастать после того, как покрытие было нагрето до температуры кипения висмута. Заметно больший энерговклад в висмутовое покрытие (23±3 эВ/ат.) по сравнению с алюминиевым (13,7±1,6 эВ/ат.) связан в первую очередь с тем, что скорость нарастания тока через нагрузку в первом случае была приблизительно в 3 раза выше.

При пробое вольфрамовых проволочных лайнеров с такими же параметрами напыления по массе наблюдается несколько иная картина. Здесь, помимо теплофизических свойств материалов нагрузки, существенную роль играют их электрофизические свойства. Как уже отмечалось, висмут обладает довольно высоким удельным сопротивлением, оно превосходит аналогичную величину для вольфрама в 30 раз. Таким образом, значительная часть тока была сосредоточена в вольфраме, а сопротивление нагрузки опре-

делялось сопротивлением исходных проволок. Здесь следует отметить, что в экспериментах с лайнерами из 6-микронных вольфрамовых проволок с напылённым висмутом максимальное сопротивление нагрузки оказывалось примерно таким же, как и в случае лайнеров из таких же проволок, но без напыления.

Однако для двух упомянутых типов нагрузок могли иметься некоторые различия в механизме пробоя. Наличие висмутового напыления, по-видимому, задерживало образование плазменной короны, поскольку при относительно невысоком темпе введения энергии в напылённый слой требовалось большее время для образования пара вокруг проволоки и последующего его пробоя (на момент времени  $t = 3,5$  нс энерговыход в висмут составлял лишь  $0,56$  эВ/ат.). Кроме того, висмутовое покрытие толщиной  $1$  мкм не позволяло развиваться сильной электронной эмиссии, которая обычно способствует возникновению плазменной короны при пропускании большого тока через «чистые» вольфрамовые проволоки. Именно задержкой образования плазменной короны можно объяснить тот факт, что средний энерговыход в вольфрамовые проволоки с напылённым висмутом оказался почти в 2 раза больше, чем в «чистые» вольфрамовые проволоки при одинаковой скорости нарастания тока через них. При этом в вольфрам, согласно оценкам, было вложено  $25 \pm 3$  эВ/ат., что превосходит его энергию сублимации  $8,6$  эВ/ат. почти в 3 раза, а энерговыход в висмутовое напыление  $10,6 \pm 1,3$  эВ/ат. был много больше энергии сублимации висмута  $1,8$  эВ/ат.

Ощутимо влияет на энерговыход и предварительное нанесение тонкого алюминиевого покрытия. Дело в том, что сопротивление алюминиевого слоя толщиной  $0,4$  мкм лишь примерно в 2 раза больше сопротивления вольфрамовой проволоки диаметром  $6$  мкм. Таким образом, напылённый слой забирает на себя около трети тока генератора. Из-за высокой теплоёмкости алюминия темп нагрева его покрытия, составляющего  $3,9\%$  от массы нагрузки, в первые  $3,5$  нс после начала тока почти такой же, как у вольфрамовой проволоки. Примерно в это время температура покрытия должна была достичь значения температуры кипения алюминия при нормальном атмосферном давлении ( $T_{\text{кип}} \approx 2792$  К). По-видимому, с момента  $t = 3,5$  нс за счёт испарения вещества покрытия началось формирование вокруг проволоки газовой оболочки, с последующим её пробоем. Количество энергии, вложенной в вещество проволоки, согласно оценкам, составило  $7,8 \pm 0,9$  эВ/ат., что даже несколько ниже значения энергии сублимации вольфрама. При этом значителен был энерговыход в алюминиевое покрытие ( $13,6 \pm 1,6$  эВ/ат.). Стоит отметить, что данная величина практически не отличается от значения энергии, вложенной в алюминиевое покрытие такой же массы, нанесённое на капроновое волокно. В этих экспериментах скорость нарастания тока через алюминиевое напыление была примерно одинаковой при одинаковых параметрах напыления. Данный факт указывает на определяющую роль напылённого алюминиевого слоя с конкретными параметрами при пробое проволочных и волоконных нагрузок.

## ВЫВОДЫ

Резюмируя, можно сказать, что полученные результаты демонстрируют возможность управления энерговыходом в вольфрамовые проволочные сборки на начальной стадии имплозии с помощью предварительного напыления на поверхность проволок металла с низкой температурой плавления. Правильно подобранные параметры напыления с учётом электро- и теплофизических свойств напыляемого металла могут позволить в условиях нашего эксперимента существенно повысить энерговыход и добиться тем самым превращения вещества проволок в плазму до пробоя. Другой перспективный способ — применение волоконных нагрузок с напылённым металлом. В экспериментах с подобного рода нагрузками могут быть задействованы проводники с параметрами, недостижимыми при использованииборок из металлических проволок. Полученные результаты, а также дальнейшие исследования пробоя проволочных и волоконныхборок с металлическим покрытием разного состава и различной толщины представляют несомненный интерес с точки зрения оптимизации и создания перспективных плазмообразующих Z-пинчевых нагрузок для генерации мощных рентгеновских импульсов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГНЦ РФ ТРИНИТИ В.А. Барсуку и С.Ф. Медовщикову за изготовление лайнеров, использованных в опытах, а также коллективу установки «Ангара-5-1» за техническое обслуживание и помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-02-00900, № 13-02-00013 и № 13-02-00482.

## REFERENCES

1. **Al'pikov Z.A., Velikhov E.P., Veretennikov A.I. et al.** Experimental complex «Angara-5-1». — *Atomnaya energiya* (Atomic energy), 1990, vol. 68, issue 1, p. 26 (in Russian).
2. **Aleksandrov V.V., Volkov G.S., Grabovskiy E.V. et al.** Investigation of the characteristics of quasi-spherical wire liners implosion on the Angara-5-1 installation at a current up to 4 MA. — *Fizika plazmy* (Plasma Physics), 2012, vol. 38, issue 4, p. 345 (in Russian).
3. **Aleksandrov V.V., Mitrofanov K.N., Gritsuk A.N. et al.** The influence of the plasma formation intensity on the dynamics of a cylindrical wire assemblies implosion with profiled linear mass. — *Fizika plazmy* (Plasma Physics), 2013, vol. 39, issue 10, p. 905 (in Russian).
4. **Matzen M.K.** Z pinches as intense x-ray sources for high-energy density physics applications. — *Physics of Plasmas*, 1997, vol. 4, № 5, p. 1519.
5. **Smirnov V.P., Zakharov S.V., Grabovskiy E.V.** The increase of radiation intensity in quasi-spherical system "double liner". — *Pis'ma v ZhETF* (Letters to JETPh), 2005, vol. 81, issue 9, p. 556 (in Russian).
6. **Aleksandrov V.V., Branitskiy A.V., Volkov G.S. et al.** Dynamics of heterogeneous liner with prolonged plasma formation. — *Fizika plazmy* (Plasma Physics), 2001, vol. 27, issue 2, p. 99 (in Russian).
7. **Sarkisov G.S., Sasorov P.V., Struve K.W., McDaniel D.H., Gribov A.N., Oleinik G.M.** Polarity effect for exploding wires in a vacuum. — *Physical Review*, 2002, E 66, p. 046413.
8. **Pikuz S.A., Shelkovenko T.A., Sinars D.B., Greenly J.B., Dimant Y.S., Hammer D.A.** Multiphase foamlike structure of exploding wire cores. — *Physical Review Letters*, 1999, vol. 83, № 21, p. 4313.
9. **Sinars D.B., Shelkovenko T.A., Pikuz S.A. et al.** The effect of insulating coatings on exploding wire plasma formation. — *Physics of Plasmas*, 2000, vol. 7, № 2, p. 429.
10. **Sarkisov G.S., Struve K.W., McDaniel D.H.** Effect of current rate on energy deposition into exploding metal wires in vacuum. — *Physics of Plasmas*, 2004, vol. 11, № 10, p. 4573.
11. **Sarkisov G.S., Sasorov P.V., Struve K.W., McDaniel D.H.** State of the metal core in nanosecond exploding wires and related phenomena. — *J. of Applied Physics*, 2004, vol. 96, № 3, p. 1674.
12. **Aleksandrov V.V., Alekseev A.G., Amosov V.N. et al.** Experimental study and numerical simulation of the plasma formation process at the initial phase of the current implosion of a cylindrical wire assembly. — *Fizika plazmy* (Plasma Physics), 2003, vol. 29, № 12, p. 1114 (in Russian).
13. **Grabovskiy E.V., Gribov A.N., Mitrofanov K.N., Oleynik G.M., Porofeev I.Yu., Frolov I.N.** The influence of the current rise rate on the polarity effect in the assembly on installation Angara-5-1. — *Fizika plazmy* (Plasma Physics), 2007, vol. 33, issue 11, p. 1006 (in Russian).
14. **Grabovskiy E.V., Dzhangobegov V.V., Oleynik G.M.** Inductive voltage divider, located near the liner. — *Pribory i tekhnika eksperimenta* (Instruments and experimental technique), 2012, issue 5, p. 67. (in Russian).
15. **Sarkisov G.S., Rosenthal S.E., Struve K.W.** Thermodynamical calculation of metal heating in nanosecond exploding wire and foil experiments. — *Review of Scientific Instr.*, 2007, vol. 78, p. 043505.
16. **Zinov'ev V.E.** Thermophysical properties of metals at high temperatures. Reference book.— M.: Metallurgiya (Metallurgy), 1989 (in Russian).
17. **Doys G.T., Farell T.** *Electrical Resistivity Handbook*. — London: Pergamon, 1992.
18. **Chase M.W.** *NIST-JANAF Thermochemical Tables*. — 4th ed. NIST. Gaithersburg. Maryland, 1992.

## AUTHORS

**Grabovskii E.V.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; angara@triniti.ru.

**Dzhangobegov V.V.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; jvv88@triniti.ru.

**Oleinik G.M.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; oleinik@triniti.ru.

Received 9 November 2014

Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 1, pp. 80—87.