

Об эрозии катода при амплитуде разрядного тока свыше 100 кА

© П.Б. Репин, Н.В. Егоров

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: NVEgorov@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 5 сентября 2013 г. В окончательной редакции 30 апреля 2014 г.)

Приведены результаты двумерных магнитогидродинамических расчетов эрозии вольфрамового катода в водородной среде при амплитуде разрядного тока свыше 100 кА. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными. Также представлены результаты расчетов эрозии для импульса тока амплитудой ~ 1 МА.

Введение

Современные мощные электрофизические установки [1–3] обеспечивают в нагрузочных узлах импульсы тока амплитудой 1–10 и более мегаампер при времени нарастания импульса менее $1 \mu\text{s}$. Токонесущие элементы установок под действием таких импульсов подвергаются эрозии с выносом продуктов как поперек, так и вдоль направления протекания тока, что может оказывать влияние на физические процессы, протекающие в нагрузках. В первом случае это происходит из-за утечек в вакуумных передающих линиях, а во втором — за счет подмешивания продуктов эрозии к плазменным нагрузкам [4]. Уникальность мультимегаамперных установок и технические сложности проведения экспериментов обуславливают сравнительно небольшое число работ, посвященных исследованию эрозии в указанном диапазоне токов, и недостаточную изученность вопроса, несмотря на его значимость. Так, в [5] изучалось формирование плазменных слоев на поверхности электродов передающих линий и их влияние на транспортировку мультимегаамперных импульсов тока, а исследования выноса продуктов эрозии в направлении протекания тока проводились при амплитуде тока, не превышающей сотен килоампер [6,7]. В то же время, как показано в [7], эрозия уже при этих амплитудах тока имеет свои особенности — наблюдается немонотонный во времени характер поступления материала электродов в разрядный промежуток, масса эродированного металла превышает типичные для слаботочных режимов значения и достигает 10 mg/C . Для объяснения наблюдаемых явлений авторы [7] предложили новый механизм эрозии, связанный с вылеском металла с поверхности электрода из-за нарушения баланса сил магнитного давления тока и газокинетического давления в ванне расплава.

Обнаруженные особенности эрозии электродов в сильноточном режиме [7] стимулируют продолжение исследований в этом направлении. С учетом сложности и дороговизны экспериментов в мегаамперном диапазоне токов повысить эффективность исследований можно, сочетая эксперименты с численным моделированием процессов. Для этого необходимы программные продукты,

достоверность работы которых подтверждена согласием с экспериментальными данными. В настоящей работе предпринята попытка моделирования экспериментов, описанных в [6,7], с помощью двумерного магнитогидродинамического кода „МЭГ-2D“ [8]. Проведено также моделирование эрозии электрода в той же геометрии, но с током, нарастающим до 1 MA за $\sim 1 \mu\text{s}$. Описаны особенности эрозии в этом режиме.

Расчетная модель

Двумерный эйлеров магнитогидродинамический код „МЭГ-2D“ [8] предназначен для расчета течений неоднородной (многокомпонентной) электропроводящей среды в присутствии магнитного поля без учета процессов теплопроводности и переноса излучения в плоских или цилиндрических (r, z) координатах. Для расчета многокомпонентной среды код обеспечивает возможность наличия в расчетной сетке смешанных ячеек, содержащих более одного компонента. В качестве исходных уравнений, описывающих течения неоднородной среды, принимаются соотношения, выражающие законы сохранения импульса и парциальных массы и внутренней энергии:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \text{div}(\rho_k \mathbf{v}_k) = 0,$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \text{div} \mathbf{S} - \text{grad} P + \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \mathbf{H}],$$

$$\rho_k \frac{d\varepsilon_k}{dt} = S_{i,j} D_{i,j} - P_k \text{div} \mathbf{v}_k + \sigma_k E_{\text{mov}}^2.$$

Здесь k — номер компонента, ρ_k — его плотность, \mathbf{v}_k — скорость, ε_k — удельная (на единицу массы) внутренняя энергия, P_k — давление, σ_k — удельная электропроводимость, ρ , P — средние по объему ячейки плотность и давление, \mathbf{v} — скорость среды, \mathbf{j} — плотность электрического тока, c — скорость света в вакууме, \mathbf{H} — напряженность магнитного поля, \mathbf{E}_{mov} — напряженность электрического поля в системе отсчета, движущейся с веществом, \mathbf{S} — девиатор тензора напряжений, \mathbf{D} — тензор скоростей деформации. Запись $S_{i,j} D_{i,j}$ означает

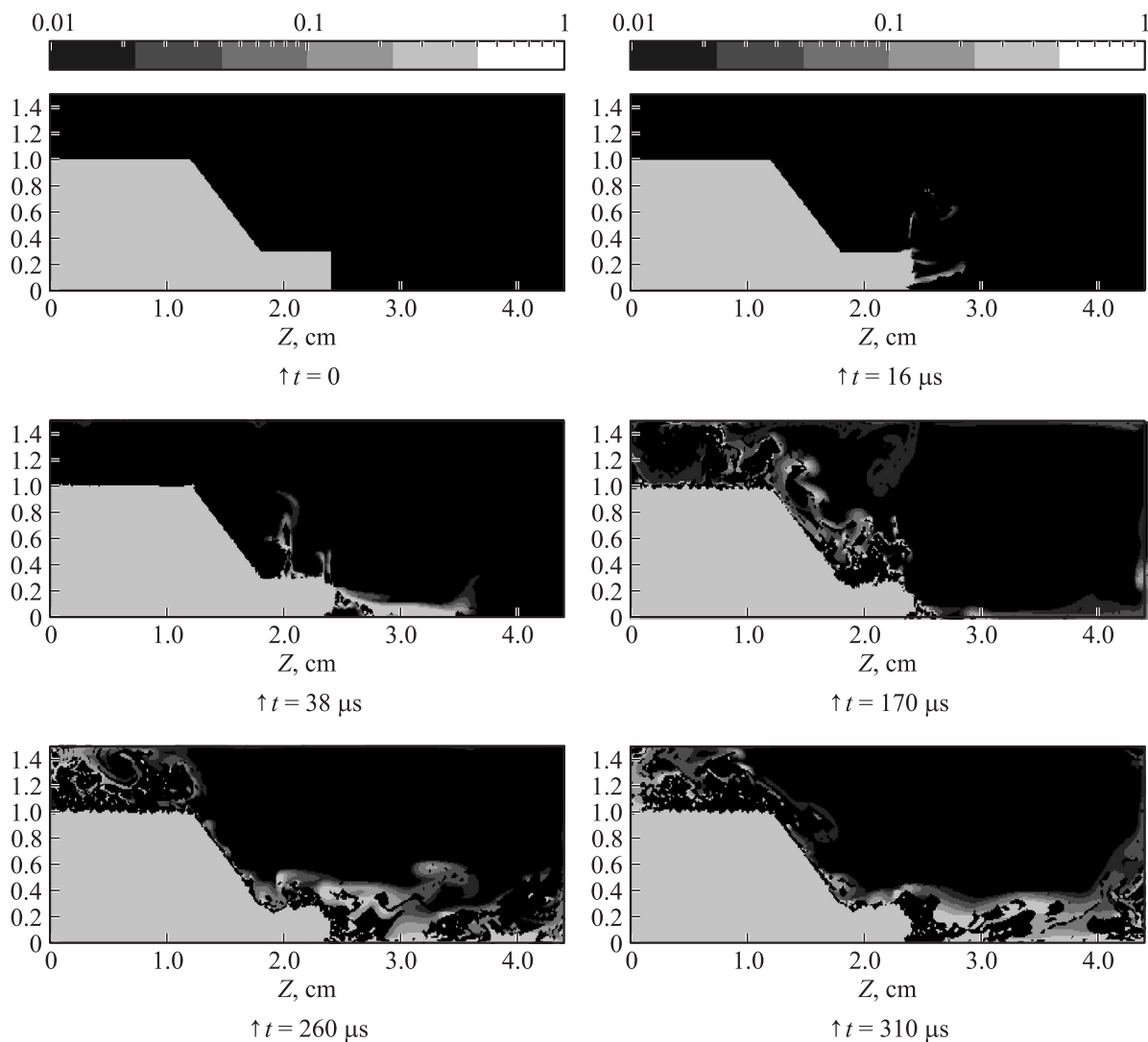


Рис. 1. Распределение плотности (в г/см³) в различные моменты времени. Вольфрам с плотностью выше 1 г/см³ и ниже 10 мг/см³ отображается на рисунке серым и черным цветом.

суммирование по всем индексам ($i, j = x, y, z$ в декартовой и r, z, φ в цилиндрической системе координат). Формулы приведены в системе СГС.

Давления веществ вычисляются по их уравнениям состояния, а электропроводимость — по соответствующим моделям проводимости. Уравнения для электромагнитных величин, компонентов тензоров \mathbf{S} и \mathbf{D} в цилиндрической системе координат, а также методы расчета всей совокупности уравнений описаны в [8]. Здесь отметим только, что расчетная сетка — прямоугольная, скорость среды определяется в узлах сетки, а компоненты тензора \mathbf{S} , азимутальная компонента магнитного поля и скалярные величины — в центрах ячеек.

Расчеты проводились в геометрии и при условиях, приближенных к описанным в работах [6,7]. Расчетная область (рис. 1, $t = 0$) в силу цилиндрической симметрии, а также симметрии относительно центральной плоскости, представляла собой квадрант сечения разряд-

ной камеры плоскостью Orz . Электрод диаметром 6 мм полагался вольфрамовым, межэлектродный зазор 4 см. Внутренняя полость камеры диаметром 30 мм заполнена водородом при начальном давлении 1 МПа. Начальная температура веществ полагалась равной 300 К. Правая граница расчетной области задавалась идеально проводящей. Запитка электродной системы производилась в точках с координатами ($z = 0, r = 1$ см) и ($z = 4.4$ см, $r = 1.5$ см) импульсом тока, заимствованным из работы [7] и сглаженным. При этом проводимость ячеек верхней строки обнулялась. Инициирование разряда в расчетах моделировалось заданием высокой электрической проводимости водорода в приосевых ячейках (в [6,7] разряд инициировался на оси системы путем электровзрыва тонкой металлической проволоки).

Для вольфрама в твердой фазе использовалась упругопластическая модель прочности Прандтля–Рейсса [9]. При этом предел текучести и модуль сдвига вычис-

лялись с учетом теплового разупрочнения материала: $G = G_0(1 - \varepsilon_t/\varepsilon_m)$, где G_0 — соответствующая величина при статическом нагружении, ε_t — тепловая часть удельной внутренней энергии, ε_m — удельная энергия плавления вещества. Уравнения состояния вольфрама были получены по модели „РОСА-МИ“ [10], описывающей термодинамические свойства металлов в широкой области состояний, перекрывающей реализуемые в наших расчетах, а водород представлялся как идеальный газ. Электрическая проводимость водорода определялась по Брагинскому [11], а для вольфрама использовалась широкодиапазонная модель проводимости [12]. Разогрев вещества в расчетной области ограничивался температурой 300 кК.

Результаты расчетов и их обсуждение

Результаты проведенного моделирования продемонстрировали согласие с экспериментальными данными на качественном, а по ряду параметров и на количественном уровне. Как показали расчеты, эрозии подвергается не только торец электрода, но и вся его поверхность, расчетная область быстро заполняется парами вольфрама различной плотности, вовлеченными, как и в [6], в вихревое движение.

На начальной стадии процесса наблюдаются несколько струй вольфрамовой плазмы с торцевой поверхности электрода (рис. 1, $t = 16 \mu\text{s}$). Радиальные координаты оснований струй на поверхности электрода однозначным образом связаны с распределениями плотности и температуры вольфрама вдоль торца электрода, формирующимися под действием звуковых волн, возбуждаемых в материале электрода при локальном выделении энергии в ходе инициирования разряда. Распределения плотности вольфрама вдоль торцевой поверхности электрода в моменты времени, предшествующие возникновению струй

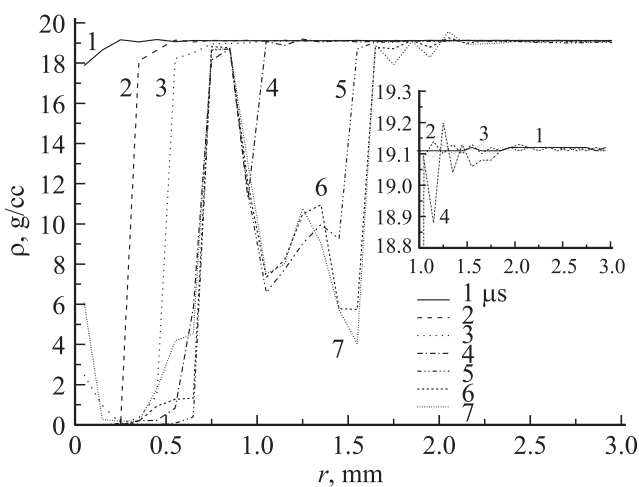


Рис. 2. Мгновенные распределения плотности вольфрама вдоль торца электрода в первые $7 \mu\text{s}$ от начала импульса тока с дискретностью $1 \mu\text{s}$. Цифрами отмечены моменты времени.

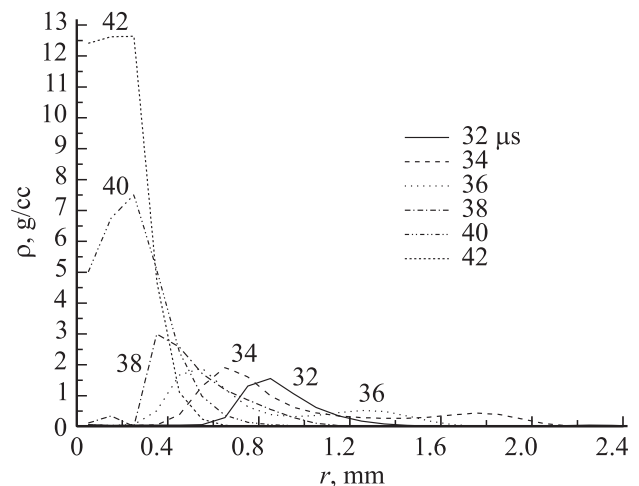


Рис. 3. Распределения плотности вещества в сечении $z = 2.9 \text{ cm}$ при образовании струи „второго типа“ во временном диапазоне $32\text{--}42 \mu\text{s}$ с интервалом $2 \mu\text{s}$. 1–7 — моменты времени.

и сразу после начала их формирования, представлены на рис. 2. Видно, что после инициирования разряда в приосевой зоне (при $r < 0,75 \text{ mm}$) плотность вещества резко падает. Это приводит к возбуждению звуковой волны и распространению в материале электрода возмущений плотности и температуры вещества. Вдали от оси ($r > 0,75 \text{ mm}$) в первые микросекунды после начала тока характерный шаг изменений плотности на торцевой поверхности электрода определяется размером счетной ячейки (см. вставку на рис. 2). В дальнейшем в результате суперпозиции прямых и отраженных от границ электрода волн пространственная структура возмущений плотности укрупняется, возрастает и их амплитуда. Они становятся точками роста струй — радиальные координаты возмущений плотности на рис. 2 и оснований струй на рис. 1 ($t = 16 \mu\text{s}$) совпадают. Следует отметить, что наиболее интенсивные струи вольфрама, истекающие из центральной зоны электрода ($r \approx 1 \text{ mm}$, рис. 1, $t = 16 \mu\text{s}$), внешне похожи на регистрируемые в экспериментах конические струи „первого типа“ по классификации авторов [6].

После прогрева электрода и образования на его поверхности расплава формируется узкая (диаметром $1\text{--}2 \text{ mm}$) плотная ($\sim 1 \text{ g/cc}$) струя „второго типа“ (рис. 1, $t = 38 \mu\text{s}$). Процесс формирования струи наглядно представлен на рис. 3, где для нескольких моментов времени даны радиальные распределения плотности вещества в сечении, отстоящем на 5 mm от торца катода. Видно, что с течением времени наблюдаются увеличение плотности вещества, вырождение кольцевой структуры струи и уменьшение ее радиуса.

По сравнению с данными [6] в рассматриваемом временном интервале плотность приосевой струи заметно выше, а температура ниже $\sim 8\text{--}10 \text{ kK}$, однако температура паров вольфрама малой плотности ($1\text{--}10 \text{ mg/cc}$),

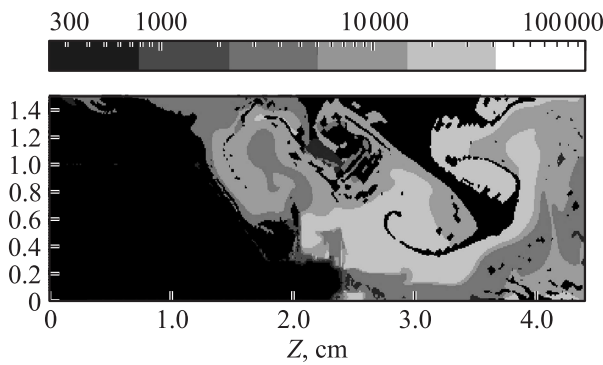


Рис. 4. Распределение температуры (в °K) в момент времени $38 \mu\text{s}$. Участки с температурой меньше 1 кК соответствуют водороду и вольфраму в твердом состоянии.

закрывающих для внешнего наблюдателя центральную струю, достигает 50–60 кК (рис. 4), что соответствует максимальным величинам, измеренным в [6]. Следует отметить, что в расчетной области, в том числе и вблизи оси, реализуются локальные участки и с более высокой (до 100 кК) температурой. Однако эти участки также не видны для внешнего наблюдателя, поскольку пробеги собственного излучения этих участков в закрывающих их парах вольфрама не превышают 0.5 мм [13]. Струя достигает правой границы расчетной области к $53 \mu\text{s}$ и начинается формирование глобального вихря — вещество струи начинает двигаться против часовой стрелки вдоль правой и верхней границ расчетной области. При этом в приосевой зоне струя постепенно расширяется до диаметра 3–4 мм и становится менее плотной.

К $110 \mu\text{s}$ формирование вихря заканчивается и продукты эрозии оказываются вовлеченными, как и в [6], в общее движение вдоль контура расчетной области. Скорость вещества вдоль верхней границы расчетной области немонотонным образом меняется во времени в пределах 150–400 м/с (в [6] 90–200 м/с). На общее движение нерегулярным во времени и пространстве образом накладываются локальные вихри. В частности, в районе конической части электрода зарождается интенсивный вихрь, работающий как накопитель вещества (рис. 1, $t = 170 \mu\text{s}$). Этот вихрь смещается как целое к торцу электрода и, начиная с $\sim 220 \mu\text{s}$, обеспечивает за время $\sim 40 \mu\text{s}$ выброс в межэлектродный зазор достаточно большой массы содержащегося в нем вольфрама, создавая вблизи оси локальное уплотнение потока вещества, поступающего в результате работы большого вихря. Внешнее проявление указанного процесса имеет сходство с явлением, наблюдаемым в экспериментах [7] и трактуемым авторами как выплеск в межэлектродный зазор компактного сгустка (диска) жидкого вольфрама с поперечным размером, близким к диаметру электрода. В самом деле, локальное уплотнение вещества имеет вид кольцевой оболочки с малой осевой протяженностью (для внешнего наблюдателя кольцевая оболочка и диск выглядят одинаково) и высокой плотностью

(до 10 г/см³), перемещающейся вдоль оси (рис. 1, $t = 260$ и $310 \mu\text{s}$). Скорость оболочки на временном интервале 240–310 μs монотонно уменьшается от 160 до 50 м/с, что согласуется с измеренной в [7] величиной — 90 м/с. Следствием рассматриваемого процесса является немонотонный характер временной зависимости массы продуктов эрозии, выносимых в приосевую область межэлектродного зазора (рис. 5), что авторами [7] отмечается как одна из основных особенностей сильноточной эрозии.

Представленные на рис. 5 данные получены в результате расчета массы вольфрама, проходящего через круг с диаметром, равным диаметру электрода и отстоящим от него на 1 мм. При этом полагалось, что все потоки вещества аксиально симметричны. Такой способ определения массы продуктов эрозии, выносимых в приосевую область межэлектродного зазора, позволяет количественно сравнить результаты расчетов с данными [7]. Как видно на рис. 5, на временном интервале от ~ 220 до $260 \mu\text{s}$ в единицу времени через измерительную площадку проходит больше вольфрама, чем в остальные моменты времени. Эта немонотонность расчетной зависимости $M_{ABL}(t)$ связана с описанным выше проходом через измерительную площадку испаренной ранее и вовлеченной в вихревое движение массы вольфрама. Масштаб залпового поступления продуктов эрозии в межэлектродный зазор (между 220 и $260 \mu\text{s}$) в расчетах ниже (~ 0.1 г), чем полагают авторы [7] (0.27 г). Тем не менее следует отметить, что удельная величина эрозии, рассчитанная исходя из массы вольфрама, проходящего через измерительную площадку на протяжении всего импульса тока, совпадает с характерной для сильноточной эрозии и приводимой в [7] величиной 10 мг/С. Однако с учетом описанных выше процессов было бы некорректным полагать, что эта величина однозначно связана с эрозионным износом торцевой поверхности электрода.

Выплеск жидкого вольфрама со всей поверхности электрода по описываемому авторами [7] механизму в

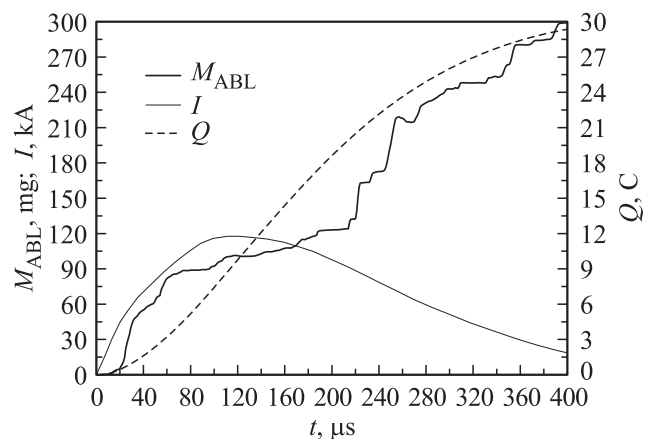


Рис. 5. Временные зависимости разрядного тока, заряда и эродированной в аксиальном направлении массы вольфрама.

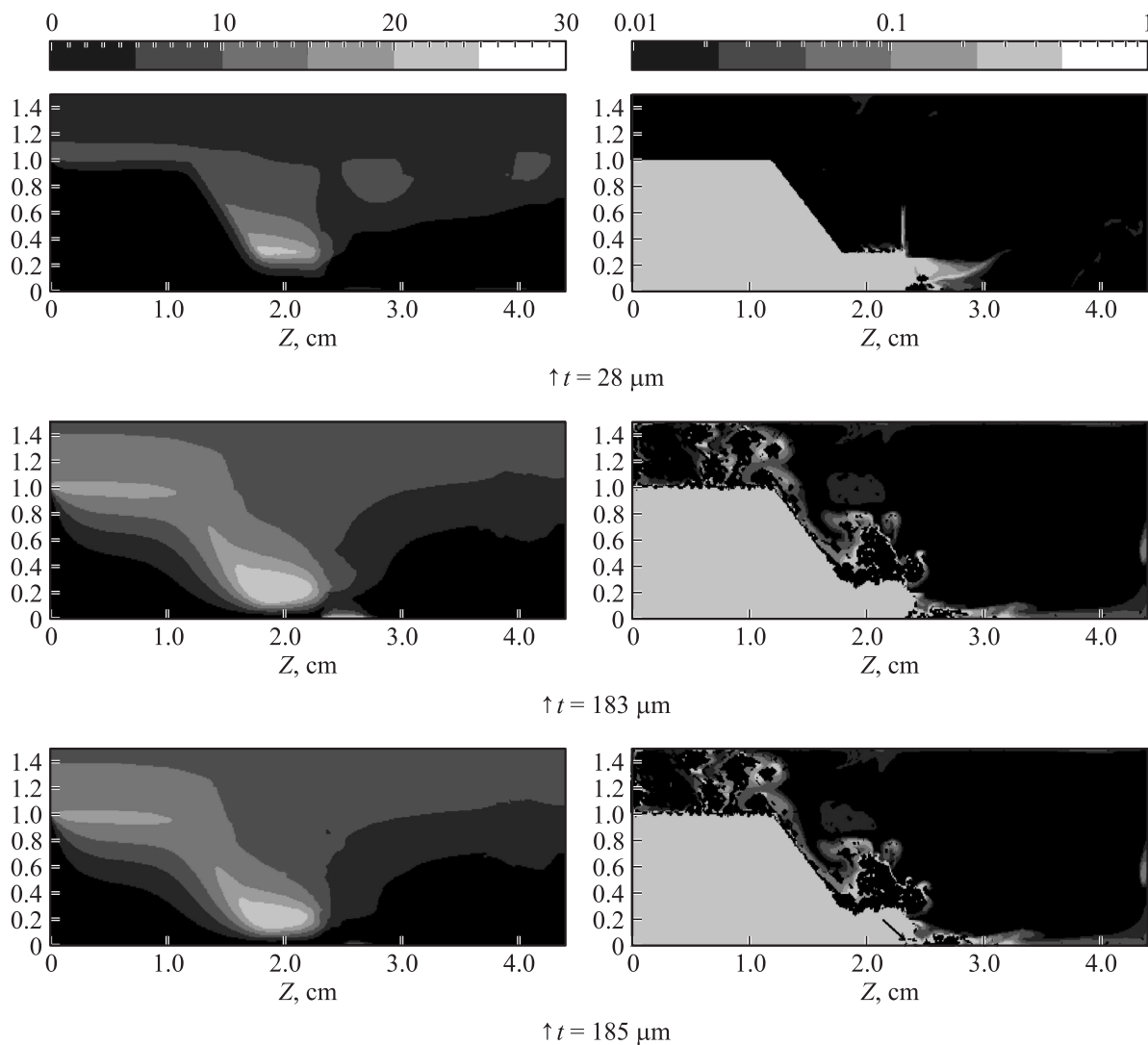


Рис. 6. Распределение магнитного поля ($-H_\varphi$, кОе, слева) и плотности (g/cc, справа) в различные моменты времени.

расчетах не наблюдается. На протяжении всего разрядного импульса соблюдается баланс сил магнитного давления тока и газокINETического давления в прилегающей к торцу электрода области с осевым размером 1 mm. Разность работы сил газокINETического давления и магнитной энергии в объеме указанной области всегда положительна и составляет не более 10^{-3} от любой из рассматриваемых величин. В то же время механизм эрозии, предложенный для объяснения подобного явления в [7], связанный с нарушением баланса сил магнитного давления тока и газокINETического давления в ванне расплава, работает, но на локальном уровне. В самом деле, уже на этапе роста тока магнитное поле вытесняется проводящими парами вольфрама из межэлектродного зазора (рис. 6, $t = 28 \mu\text{s}$). Поэтому практически на протяжении всего разрядного импульса магнитное давление в межэлектродном зазоре не оказывает существенного влияния на происходящие там процессы. Действие электромагнитной силы проявляется в

основном на боковой поверхности электрода, приводя к движению потоков эрозионной плазмы к торцу. Тем не менее по ходу развития процесса вблизи торцевой поверхности электрода в расчетах реализуются локальные быстроизменяющиеся магнитные поля большой амплитуды (рис. 6, $t = 183 \mu\text{s}$). После исчезновения области сильного магнитного поля, в соответствии с механизмом, предложенным в [7], наблюдается выплеск небольшого количества жидкого металла (рис. 6, $t = 185 \mu\text{s}$, выплеск указан стрелкой).

В расчетах эрозии подвергается вся поверхность электрода. Полная масса продуктов эрозии, уходящих далее чем на 1 mm от начального контура электрода, монотонно растет во времени и к концу процесса достигает 1.1 g, т.е. в 3.7 раза превышает массу, проходящую через торцевую измерительную площадку. Механизм эрозии — классический — в виде пара и капель [14].

Ряд экспериментальных данных и оценок параметров плазмы получен в [6] при амплитуде разрядного то-

ка 315 кА. Расчеты с увеличенной до 315 кА амплитудой тока при сохранении временных параметров импульса показали, что в целом последовательность протекающих процессов осталась прежней. Так же как и при токе амплитудой 118 кА, происходит достаточно быстрое заполнение расчетной области проводящими парами вольфрама, вытесняющими магнитное поле из приосевой области межэлектродного зазора. Наблюдаются упомянутые выше струи первого и второго типа. Газокинетическое давление в струях увеличилось в 2–4 раза и составило от 50 до 110 МПа, что близко к оцененной авторами [6] величине (126 МПа). При этом температура в струях увеличилась незначительно, до 11–12 кК. Рост амплитуды тока привел к тому, что после образования глобального вихря в районе конической части электрода формируется не локальный вихрь, как показано на рис. 1 ($t = 170 \mu\text{s}$), а более компактное образование с достаточно высокой плотностью ($\sim 1 \text{ g/cc}$). По-видимому, это связано с увеличением магнитного поля в этой части расчетной области. Так же как и локальный вихрь в ранее проведенных расчетах, компактное образование смещается как целое вдоль электрода и поступает в межэлектродный зазор, где в виде кольцевой оболочки продолжает двигаться вдоль оси. При этом внутренний диаметр этой кольцевой оболочки несколько превышает диаметр электрода. В связи с этим величина удельной эрозии, рассчитанная по массе вещества, проходящего через торцевую измерительную площадку, составила те же 10 mg/C , несмотря на то, что полная масса вольфрама, эродированная за импульс со всей поверхности электрода и удалившаяся от нее на расстояние 1 мм и более, увеличилась примерно пропорционально росту амплитуды тока и составила 2.7 г.

Достигнутый уровень согласия расчетных и экспериментальных результатов позволяет говорить о достаточно адекватном моделировании процессов сильноточной эрозии с помощью двумерного магнитогидродинамического кода „МЭГ-2D“. Это послужило основанием для проведения прогнозных расчетов эрозии при других параметрах токового импульса. Для примера был выполнен расчет с запиткой разрядной камеры импульсом тока, полученным из представленного на рис. 5 путем обострения следующим образом: амплитуда тока была увеличена на порядок, а временные параметры сокращены на 2 порядка (время нарастания $\sim 1 \mu\text{s}$, полная длительность импульса $\sim 4.3 \mu\text{s}$). В связи с существенно более высокой мощностью нагружения разрядной камеры температура веществ в этом расчете не ограничивалась, остальные условия расчета оставлены неизменными.

Результаты расчета продемонстрировали, что в этом режиме протекающие процессы имеют качественно другой характер. Вплоть до окончания импульса тока пары вольфрама не успевают заполнить расчетную область. Струйных явлений в осевой зоне и описанных выше вихревых движений вещества не наблюдается. Как следствие магнитное поле из приосевой области межэлектродного зазора не вытесняется. Магнитное поле

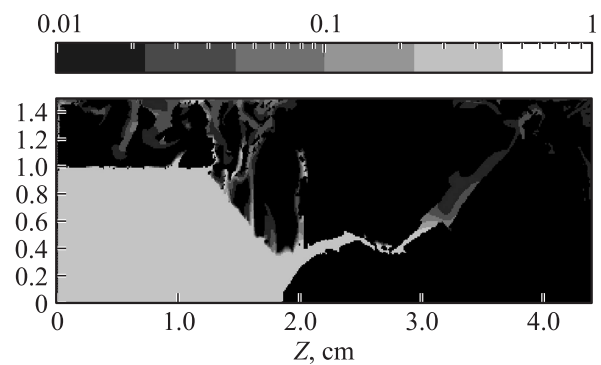


Рис. 7. Распределение плотности (в g/cc) в момент $4.3 \mu\text{s}$ после мощного импульса тока.

выдавливает образующийся на торцевой поверхности электрода расплав из осевой зоны на кромку электрода и далее в радиально-осевом направлении. В результате к концу импульса тока узкая часть электрода радиусом 3 мм подвергается сильному эрозионному износу и почти целиком разрушается (рис. 7). Активные эрозионные процессы протекают также на конической поверхности электрода и в значительно меньшей степени на цилиндрической поверхности большого радиуса (1 см). Продукты эрозии с этой части электрода распространяются в основном в радиальном направлении, образуя каналы утечки тока, снижающие ток в осевой зоне. Полная масса продуктов эрозии, удалившихся от начального контура электрода на расстояние 1 мм и более, составила 1.8 г, что соответствует величине удельной эрозии 600 mg/C , что в 16 раз выше, чем в предыдущем режиме (37 mg/C).

Заключение

По двумерной магнитогидродинамической программе „МЭГ-2D“ с использованием упругопластической модели прочности проведено моделирование эрозии вольфрамового катода в водородной среде при амплитуде разрядного тока несколько сот килоампер и характерном времени его нарастания $\sim 100 \mu\text{s}$. Достигнуто согласие с экспериментальными данными на качественном, а по ряду параметров и на количественном уровне. Показано, что эрозия электрода происходит по классическому механизму в виде пара и капель. Величина удельной эрозии с торца электрода, полученная в расчетах, составила 10 mg/C , что согласуется с восстановленным из эксперимента значением. Удельная эрозия со всей поверхности электрода заметно выше и достигает 37 mg/C .

Показано, что увеличение амплитуды тока на порядок до $\sim 1 \text{ MA}$ при сокращении времени нарастания до $\sim 1 \mu\text{s}$ и полной длительности импульса до $\sim 4.3 \mu\text{s}$ при прочих равных условиях ведет к качественному изменению характера эрозионных процессов и повыше-

нию величины удельной эрозии со всей поверхности электрода до 600 mg/C.

Список литературы

- [1] *Spielman R.B., Deeney C., Chandler G.A., et al.* // Phys. Plasmas. 1998. Vol. 5. P. 2105–2111.
- [2] *Альбинов Г.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И.* и др. Атомная энергия, 1990. Т. 68. С. 26.
- [3] *Селемир В.Д., Демидов В.А., Ермолович В.Ф.* и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 5. С. 424–434.
- [4] *Гаранин С.Ф.* Физические процессы в системах МАГО-МТФ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. 343 с.
- [5] *Грабовский Е.В., Левашов П.Р., Олейник Г.М.* и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 9. С. 782–793.
- [6] *Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 1. С. 28–35.
- [7] *Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А.* и др. // ДАН. 2003. Т. 388. Вып. 1. С. 37–40.
- [8] *Егоров Н.В., Барабанов В.Н., Власов Ю.В.* // Мощная импульсная электрофизика. Сб. докл. конф. „XIV Харитоновские тематические научные чтения“. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 51–56.
- [9] Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007.
- [10] *Гордеев Д.Г., Гударенко Л.Ф., Каякин А.А., Куделькин В.Г.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. 2010. Вып. 3. С. 19–25.
- [11] *Брагинский С.И.* // Вопросы теории плазмы. Вып. 1. М.: Атомиздат, 1963. С. 183–272.
- [12] *Vijko A.M.* et al. // Megagauss Fields and Pulsed Power Systems / Ed. by V.M. Titov, G.A. Shvetsov. NY: 1990. P. 743–748.
- [13] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [14] *Henke B.L., Lee P., Tanaka T.J.* et al. Low-energy x-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection // Atom. Dat. and Nucl. Dat. Tabl. 1982. Vol. 27. N 1.