

УДК 517.958

М. П. Г а л а н и н, А. П. Л о т о ц к и й,
С. С. У р а з о в

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОНТАКТА В УСКОРИТЕЛЕ ТИПА РЕЛЬСОТРОН*

Проведен цикл расчетно-теоретических исследований переноса тока в высокоскоростном якоре рельсотронного ускорителя. Результаты трехмерного математического моделирования подтвердили существование надежного металлического контакта при скорости якоря до 700 м/с и позволили определить момент начала кипения материала якоря в зоне контакта. Показано, что момент начала кипения связан с переходом разряда в дуговую стадию переноса тока при скорости около 1,8 км/с. Соответствие данных численных и натуральных экспериментов позволяет использовать расчетную модель для прогнозирования скоростных контактов в подобных устройствах.

В работе [1] изложены основные результаты экспериментальных исследований эрозии электродов ускорителя типа рельсотрон, простейшая схема которого показана на рис. 1.

Напомним, что в интервале скоростей от 0,7 до 1 км/с металлический контакт между ускоряемым проводящим якорем и токоподводящим рельсом начинает разрушаться из-за высокой плотности тока, сосредоточенного на задней границе контактной зоны. Это явление концентрации тока на границе контакта принято называть “скоростным

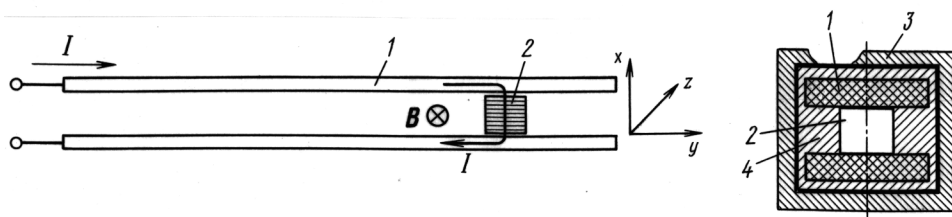


Рис. 1. Принципиальная схема рельсотрона:

1 — направляющий и токопроводящий рельс; 2 — ускоряемое тело (якорь или иная токовая арматура); 3 — силовой бандаж канала; 4 — изолятор; **В** — магнитная индукция; **I** — протекающий ток

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-01-00461).

скинированием”. Его анализу посвящено много работ (например, работы [2–4]). Одним из способов уменьшения концентрации тока является использование контактных пар (якорь–рельс) из материалов с существенно различной проводимостью (алюминий–графит) [5], однако обычно этот способ малоэффективен из-за увеличения резистивных потерь в электрической цепи ускорителя. Известны попытки повысить скорость начала деградации контактов до 2,5–3 км/с с использованием искусственных способов организации подвода тока к якорю с дульной части ускорителя. Однако в работе [6] показано, что это неизбежно приводит к уменьшению ускоряющей силы. Таким образом, успешное уменьшение влияния скоростного скинирования тока на разрушение контактов требует привлечения новых идей и детального исследования процесса токопереноса. Отметим, что зона скоростного скинирования практически недоступна для проведения измерений в силу малых размеров и высокой скорости перемещения якоря. Численное моделирование в этом случае является одним из немногих инструментов исследования. Настоящая работа посвящена описанию трехмерной модели и обсуждению результатов расчетов, которые с хорошей точностью соответствуют экспериментальным наблюдениям процессов разрушения металлических контактов рельсотронного ускорителя. В приведенных расчетах использованы геометрические размеры реального устройства и представленная на рис. 2 типичная зависимость полного протекающего через ускоритель тока от времени в соответствии с данными

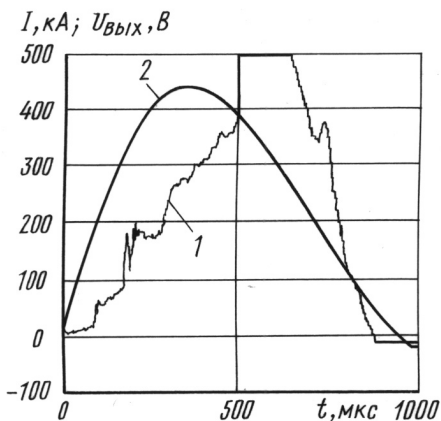


Рис. 2. Величины выходного напряжения (1) и силы тока (2) в канале с медными рельсами при ускорении металлического якоря до 2,7 км/с (через 500 мкс после старта якорь покидал канал)

работы [1], полученными ранее на экспериментальном рельсотронном ускорителе ЭММА-6.

Математическая модель. Для описания электромагнитных полей использовано так называемое квазистационарное или магнитогидродинамическое приближение уравнений Максвелла [7]. Замкнутая трехмерная нестационарная во времени модель [7–10] объединяет расчет распределения тока в проводниках и локального тепловыделения с непосредственным расчетом ускоряющей силы. При этом модель однородна по различным подобластям с различающейся электропроводностью: типа проводник или диэлектрик.

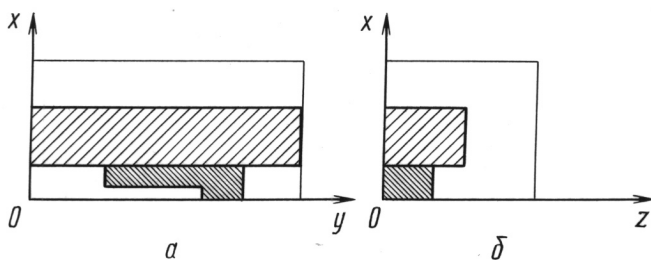


Рис. 3. Схема сечения рельсотрона плоскостями $z \equiv \text{const}$ (а) и $y \equiv \text{const}$ (б)

Схема модельной пространственной области, использованной в расчетах, представлена на рис. 3. Якорь в этом случае движется в положительном направлении оси y .

При ускорении тел в рельсотроне наиболее сложные и интересные явления происходят в окрестности якоря, характерная протяженность которой сравнима с поперечным размером канала. Поэтому при моделировании целесообразно ограничить рассматриваемую область и рассматривать поля в пространственной области, жестко связанной со скользящим якорем. Длина этой области (в направлении оси y) составляет несколько калибров ускорителя в обе стороны от якоря (см. рис. 3). Поэтому при расчете будем рассматривать не весь трехмерный ускоритель, а его часть, приходящуюся на область, жестко связанную с якорем и движущуюся вместе с ним. При таком подходе возникает проблема задания граничных условий на передней и задней границах исследуемой области. Для боковых границ области эта проблема не возникнет, так как канал рельсотрона обычно заключен в проводящий силовой бандаж.

При разработке модели использовано существенное различие длины ускорителя (по оси y) и его поперечных размеров. Учтено также, что единственной заданной электромагнитной величиной можно считать полный ток, определяемый источником питания. Поэтому естественно рассмотреть модель, в которой на торцах расчетной области заданы тангенциальные компоненты магнитного поля, соответствующие бесконечно длинной (вдоль оси y) системе проводников, для каждого из которых задан полный ток. Это поле является решением соответствующей двумерной задачи. В результате для задания граничных условий необходимо решить две специальные задачи для интегродифференциальных уравнений на торцах [8]. Трехмерная задача решается с использованием алгоритма, предложенного в работе [7], по заданным тангенциальным компонентам магнитного поля.

В настоящей работе построены алгоритмы задания граничных условий, обобщенные для различных конструкций ускорительного ка-

нала, и разработаны новые алгоритмы и программы, позволяющие получить численные результаты, соответствующие конкретному техническому объекту. Они позволяют, в частности, исследовать явление деградации металлической проводимости. В данном случае получено хорошее качественное и количественное соответствие результатов расчетов и экспериментов.

В задаче предполагается, что электропроводность σ материалов зависит от температуры. В проводящей подобласти возможны фазовые переходы: плавление и кипение.

Математическая модель и вычислительный алгоритм подробно рассмотрены в работах [7–10]. Далее используются обозначения, принятые в работах по моделированию электромагнитных явлений. Они совпадают с обозначениями, использованными в работах [7–10].

Для решения возникающей системы линейных алгебраических уравнений используется метод сопряженных градиентов совместно с неполным разложением Холесского [11–14].

Далее приведены результаты расчетов распределений различных полей в ускорителе с U-образным якорем. В данном случае длина (в направлении оси y) расчетной области, связанной со скользящим якорем, составляет 8,8 см (четыре калибра позади якоря, три калибра впереди плюс длина самого якоря). Высота области (по оси x) равна 7 см (половина высоты якоря, высота рельса плюс высота диэлектрика над рельсом). Ширина области (по оси z) равна 3,5 см (половина ширины якоря, ширина выступающей части рельса плюс ширина диэлектрика за рельсом). Высота канала (калибр) — 1 см. Длина якоря (по оси y) — 1,8 см. Высота рельса — 3 см. Расчет проведем для двух вариантов процесса: ускоряется тело массой 5 г с начальной скоростью 250 м/с; ускоряется тело массой 2,5 г с начальной скоростью 500 м/с. Начальная температура $T_0 = 290$ К. Якорь изготовлен из алюминия, направляющие — из меди.

Для решения задачи разработан универсальный для различных конфигураций объекта исследования метод описания расчетной области (развитие метода, предложенного в работе [15]). При формировании файла-описателя области в программу задания характеристик области добавлена система разделения подобластей, относящихся к якорю и рельсу. В результате трехмерная область разделяется на параллелепипеды (секции) с гранями, параллельными координатным плоскостям. Параллелепипеды отличаются друг от друга материалами, характеристиками сетки или условиями на границах. В каждом таком параллелепипеде определено количество ячеек сетки. Такие характеристики, как плотность, электропроводность и другие параметры материала, определяются однозначно номером, сопоставленным данному парал-

лелепипеду, и номером, определяющим физический смысл объекта (якорь, рельс). Изменение использованных ранее программ с учетом новой системы описания области позволяет применять программный комплекс для исследования объектов различной конфигурации.

Полученные параметры пространственной области используются для дальнейшего расчета. По ним рассчитывается набор логических массивов, полностью определяющих область, ее границу и, тем самым, матрицу системы линейных алгебраических уравнений (т.е. разностную схему) для решаемой задачи. Наиболее сложным является задание значений массивов на границах области. В настоящей работе предложена новая система формирования логических массивов в граничных ячейках, позволяющая независимо от конфигурации объектов (в отличие от старых систем) получать значения граничных компонент массивов.

Подобласти, различающиеся по материалу, в проведенных расчетах разбиты на дополнительные разностные ячейки: по оси x в соответствии с приведенным выше описанием $4 + 8 + 8 + 4$, по оси y — $4 + 8 + 8 + 4$, по оси z — $8 + 6 + 4$. В результате в пространственной области находится 35625 ребер сетки, 32544 граней, 10368 ячеек. Номера ячеек по соответствующим осям координат обозначены i_x, i_y, i_z .

Результаты математического моделирования. Приведем некоторые результаты расчетов. Далее в графическом виде представлены распределения \mathbf{H}, \mathbf{j} , силы Лоренца $\mathbf{f} = [\mathbf{j}, \mathbf{H}]$ в сечениях области различными плоскостями. Все сечения проходят через якорь или рельс. Показан также ряд других характеристик ускорения.

Ускорение током силой 250 кА. На рис. 4 приведены рассчитанные временные зависимости сосредоточенных характеристик процесса ускорения: полного тока, максимальной температуры в области, скорости и координаты якоря.

Из рис. 4, б, в следует, что при $t \approx 0,7$ мс, $v \approx 800$ м/с максимум температуры достигает 920 К, т.е. начинается плавление якоря. Об этом свидетельствует также своеобразный “излом” на графике максимальной температуры (см. рис. 4, б). Полный ток (см. рис. 4, а) изменяется по заданному закону. Якорь покидает ускоритель со скоростью около 900 м/с. В процессе ускорения температура кипения не достигнута.

Время и скорость движения якоря в начале его плавления соответствуют времени начала смещения токового распределения, измеренного в работе [1] по данным магнитного и электрического зондов. Сравнительно невысокая температура указывает на отсутствие дугового разряда. Выходная скорость тела и время вылета вполне соответствуют данным, полученным при натурном эксперименте.

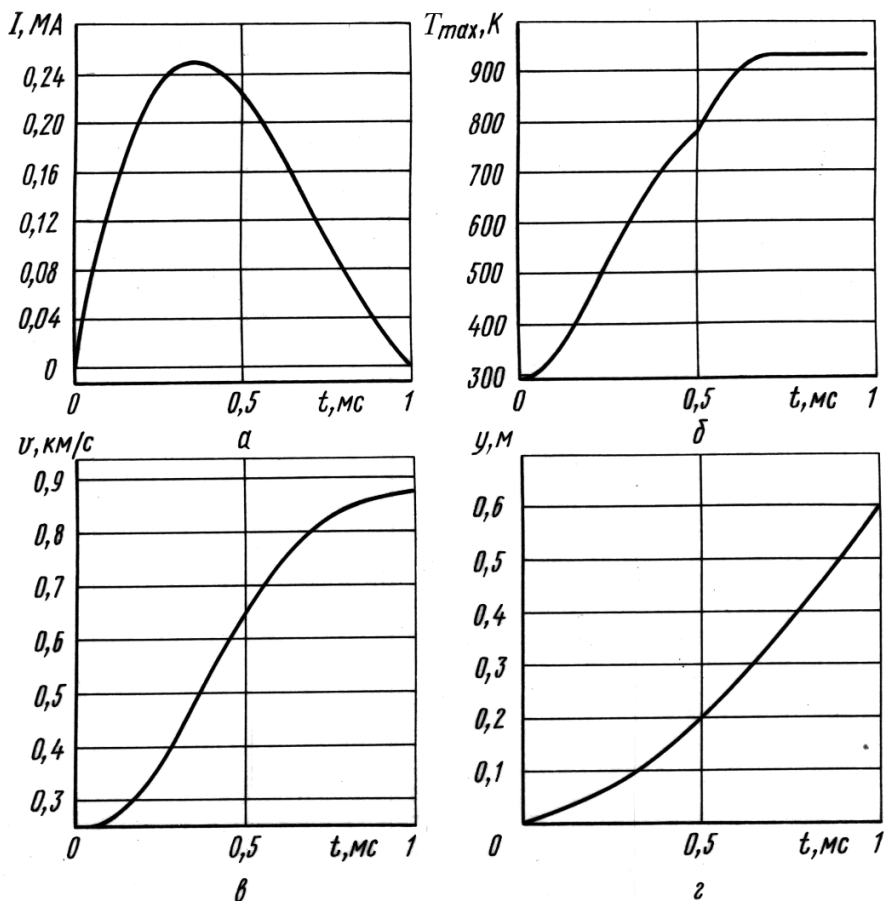


Рис. 4. Временные зависимости сосредоточенных характеристик процесса ускорения:

полного входного тока (а), максимальной температуры якоря (б), скорости (в) и координаты (г) якоря

Разгон металлического якоря до скорости более 2 км/с. На рис. 5 приведены рассчитанные временные зависимости сосредоточенных характеристик процесса ускорения: полного тока, максимальной температуры в области, скорости и координаты якоря.

Из рис. 5, б, в следует, что при $t \approx 0,21 \text{ мс}$, $v \approx 1 \text{ км/с}$ максимум температуры достигает 920 К, т.е. начинается плавление якоря. Далее при $t \approx 0,35 \text{ мс}$, $v \approx 1,8 \text{ км/с}$ максимум температуры достигает 2720 К, т.е. начинается кипение якоря. Об этом свидетельствует своеобразный “излом” на графике максимальной температуры (см. рис. 5, б).

Эксперимент [1] свидетельствует, что в момент времени $t = 0,35 \text{ мс}$ возникает дуговая стадия разряда с характерным падением напряжения до значения $U_{\text{д}} = 150 \text{ В}$ на дуговом канале сантиметровой длины. Дуга загорается непосредственно после инъекции металлического пара

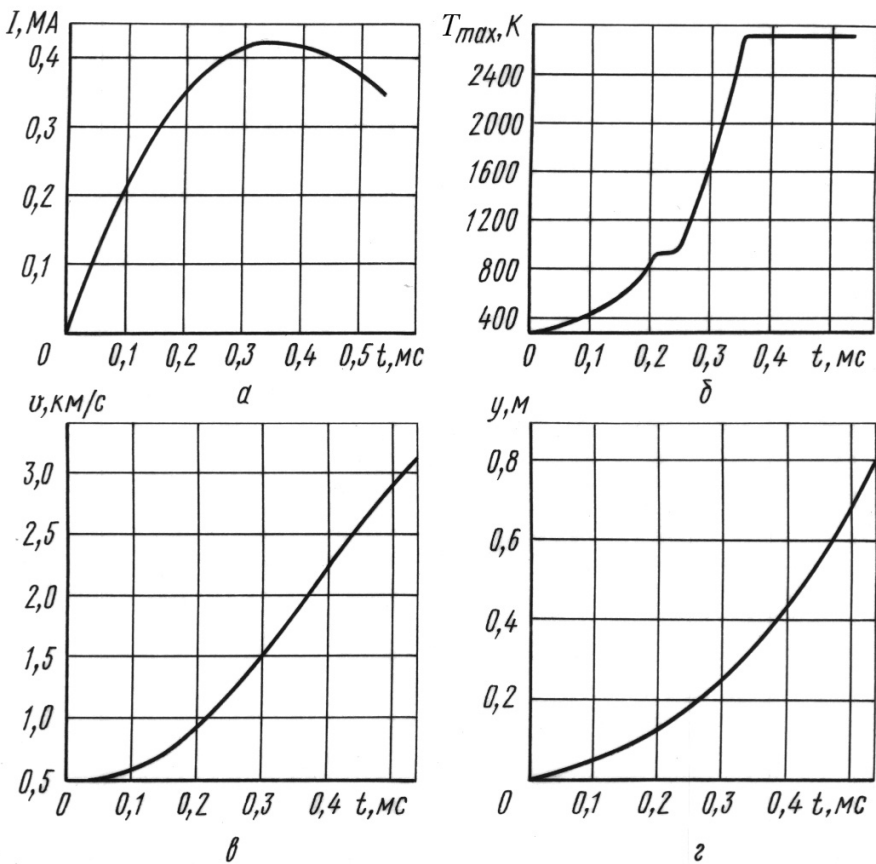


Рис. 5. Временные зависимости сосредоточенных характеристик процесса ускорения:
 полного входного тока (а), максимальной температуры якоря (б), скорости (в) и координаты (г) якоря

в канал и его ионизации. В этот момент времени происходит падение напряжения на якоре:

$$U_{я} = I \frac{dL}{dt} \sim I \frac{dL}{dy} \frac{dy}{dt} = IL'v.$$

При характерной силе тока $I = 300$ кА, погонной индуктивности канала $L' = 2,7 \cdot 10^{-7}$ Гн/м и скорости 1,8 км/с напряжение $U_{я} = 145$ В становится сравнимым с U_d . Начиная с этого момента значительная часть тока переносится дуговым разрядом, а результат расчета завершающей фазы ускорения может отличаться от данных эксперимента. Выходная скорость тела по расчетам составляет 3 км/с, а в эксперименте получена величина на 10 % меньше. Тем не менее, время начала разрушения контакта (плавления) и окончательной деградации (начала кипения) в расчетах и экспериментах соответствуют друг другу.

В данном варианте расчетов ускорения якоря до большой скорости с сильным нагревом интересны распределения токов и температурных полей по зоне контакта. Рассмотрим их подробнее.

Возрастанию температуры проводника способствует повышенная в нем плотность электрического тока j . На рис. 6 представлены распределения плотности тока в моменты плавления и кипения материала якоря. Видно, что происходит смещение во времени некоторых экстремумов

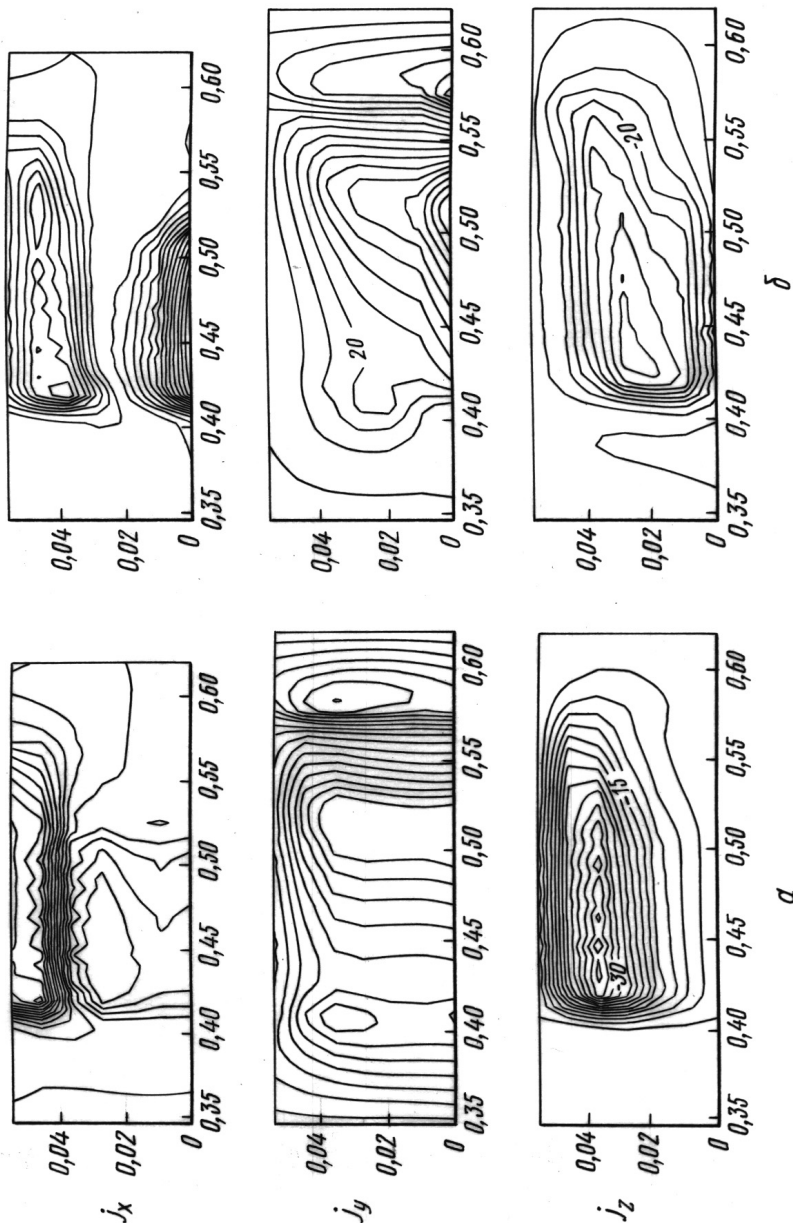


Рис. 6. Распределение плотности тока в сечении плоскостью $x = \text{const}$ контакта якоря и рельса ($t_x = 12$)са для $t = 0,216$ (а); $0,396$ (б) мс; по оси абсцисс — координата y , по оси ординат — координата z

компонент \mathbf{j} . Это приводит к движению волн плавления и кипения по поверхности якоря.

Сопоставление распределений \mathbf{j} с распределениями T показывает, что нагрев задней и боковой частей поверхности якоря в плоскости контакта вызван высоким значением компонент j_x и j_z . Ток распределяется преимущественно по поверхности якоря. На поверхности контакта в зонах наибольшего нагрева сила Лоренца достигает наибольших значений.

Анализ распределений T , представленных на рис. 7, показывает, что максимум достигается в задней (по направлению движения) части якоря.

Из рис. 7 видно, что нагрев поверхности якоря, соприкасающейся с рельсом, возрастает по направлению от центрального к боковым се-

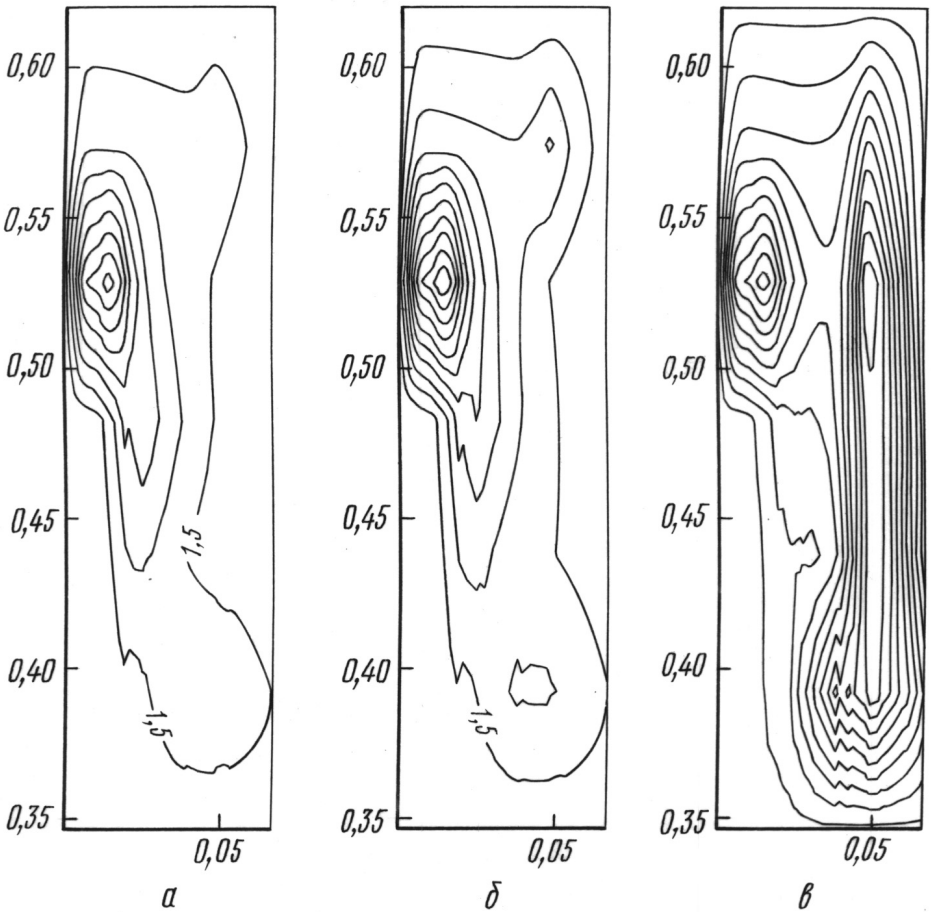


Рис. 7. Распределения температуры (T , 200 К) в якоря в сечениях плоскостями $z = \text{const}$ при $t = 0,216$ мс:

$i_z = 2$ (а), 5 (б), 8 (в); по оси абсцисс — координата x , по оси ординат — y

чениям. Увеличение температуры можно наблюдать также во внутренних подобластях якоря (в местах U-образного изгиба). Во всех сечениях плоскостями $z = \text{const}$ видно, что происходит нагрев в месте изгиба, возрастающий в направлении по оси z от центра. Плавление материала (и его кипение) начинается с областей, близких к боковой (по всем координатам) границе ускоряемого тела.

Поскольку плавление и кипение якоря начинаются на поверхности контакта с рельсом, то для исследования эрозии наибольший интерес представляет распределение температуры на этой поверхности в различные моменты времени. На рис. 8 приведены соответствующие изотермы (от минимального до максимального значений).

Рис. 8 иллюстрирует неравномерный нагрев материала ускоряемого тела с максимальными значениями температуры на границах области якоря в плоскости контакта с рельсом. Наибольшее нарушение металлического контакта имеется на участках, где происходит кипение материала.

На рис. 9 представлены изотермы от температуры в 2000 К до максимального значения в том же сечении (плоскость контакта якоря и рельса) в различные моменты времени. Тем самым, рис. 9 иллюстрирует распространение по поверхности якоря волны кипения, которая соответствует максимальной эрозии материала (эрозия возможна и при плавлении) и деструкции электрического контакта металлического типа.

Как видно из построенных изотерм, кипение начинается в задней угловой точке якоря и распространяется преимущественно по боковой поверхности. По прошествии некоторого времени кипение начинается также в передней части якоря, после чего с двух сторон движется к центру области.

Приведенные изотермы позволяют сделать вывод, что скорость распространения волны плавления от заднего края по якорю составляет 50–100 м/с, что несколько меньше данных, приведенных в работе [1], но имеет тот же порядок, что и экспериментальные данные.

На рис. 10, 11 приведены трехмерные распределения некоторых величин в сечении всей расчетной области, включающем рельс и диэлектрик, расположенный над рельсом, плоскостью контакта якоря и рельса.

Из приведенных на рис. 10, 11 распределений видно, что магнитное поле распространяется по области в основном через диэлектрическую часть, а плотность тока достигает наибольших значений в подобласти якоря, причем компоненты j_x и j_y плотности тока имеют экстремумы противоположных знаков в различных частях якоря.

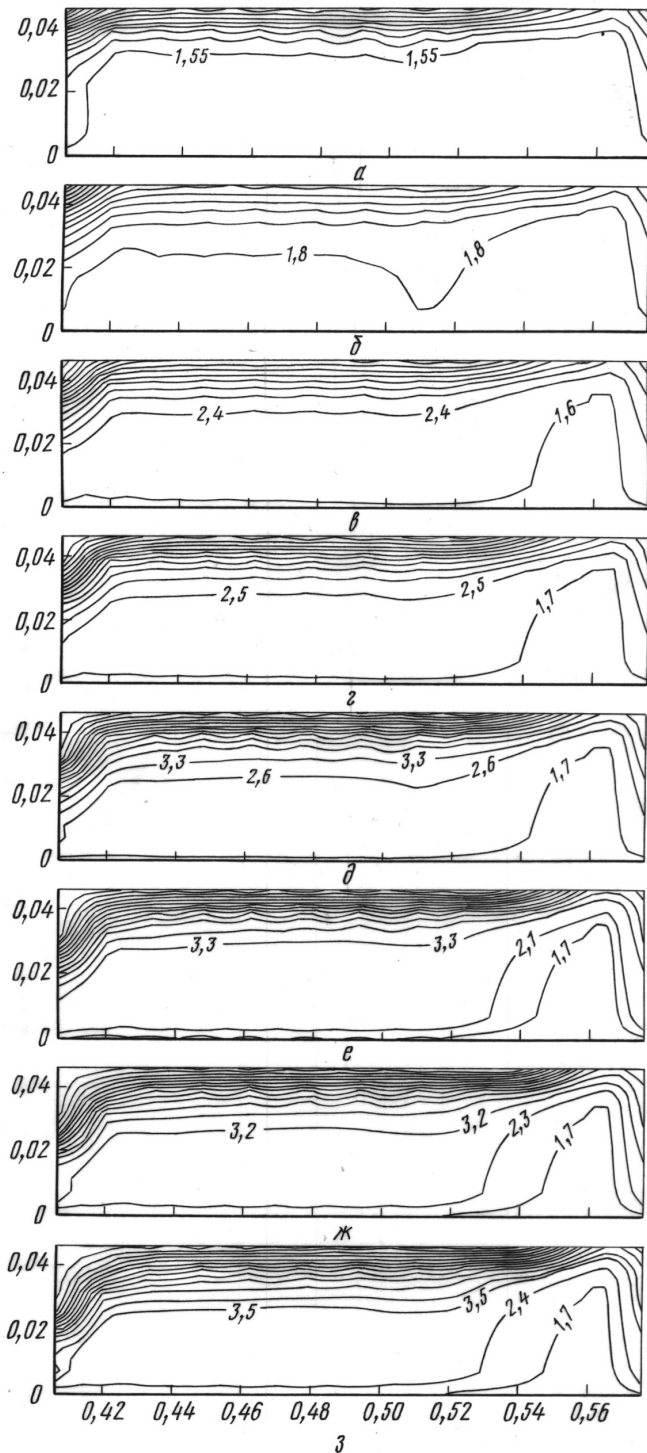


Рис. 8. Распределения температуры ($T, 200 \text{ К}$) в сечении плоскостью $x \equiv \text{const}$ контакта якоря и рельса ($i_x \equiv 12$) в различные моменты времени: $t = 0,216$ (а); $0,327$ (б); $0,363$ (в); $0,396$ (г); $0,426$ (д), $0,451$ (е); $0,474$ (ж); $0,493$ (з) мс; по оси абсцисс — координата y , по оси ординат — z

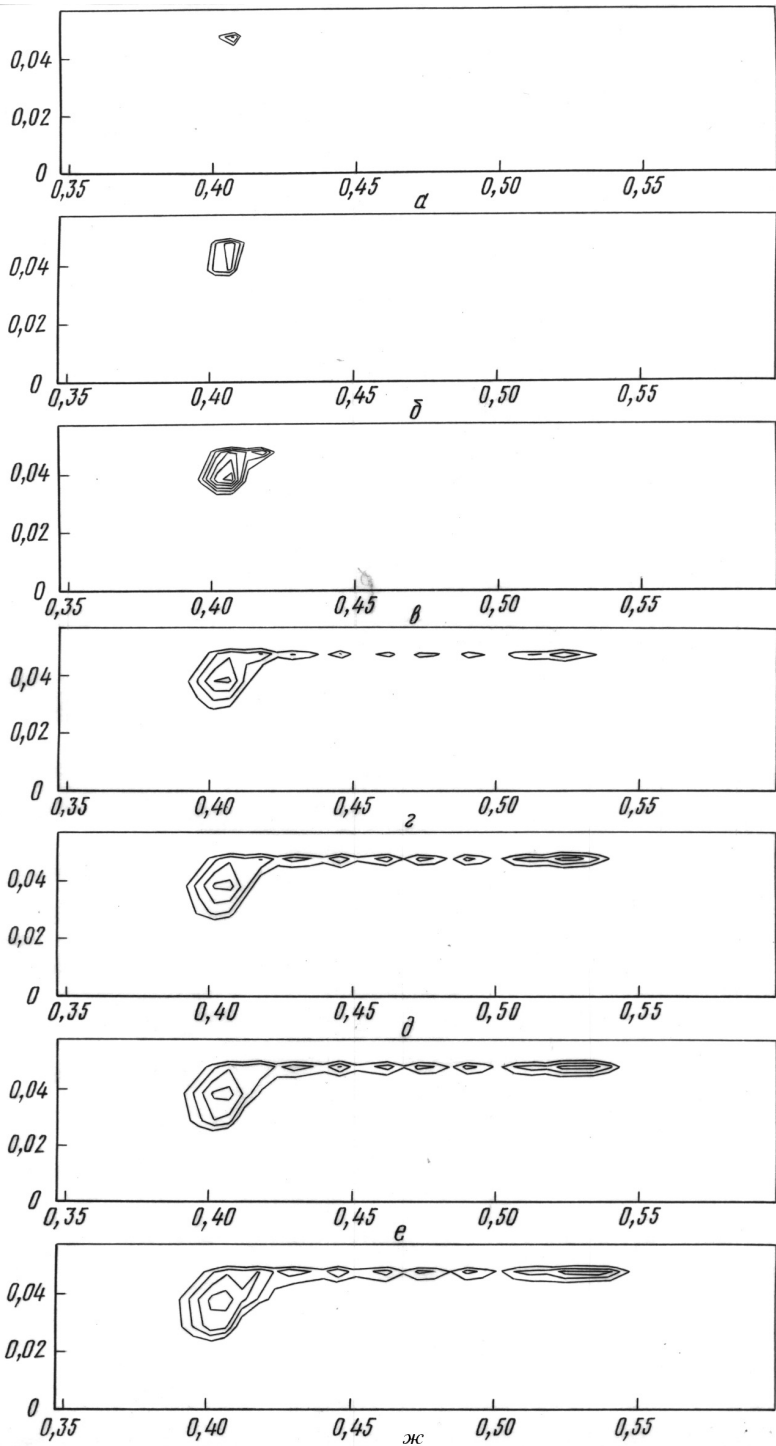


Рис. 9. Распределения температуры ($T, 200\text{ К}$) выше 2000 К в сечении плоскостью $x = \text{const}$ контакта якоря и рельса ($i_x = 12$) в различные моменты времени: $t = 0,327$ (а); $0,363$ (б); $0,396$ (в); $0,426$ (г); $0,451$ (д); $0,474$ (е), $0,493$ (ж) мс; по оси абсцисс — координата y , по оси ординат — z

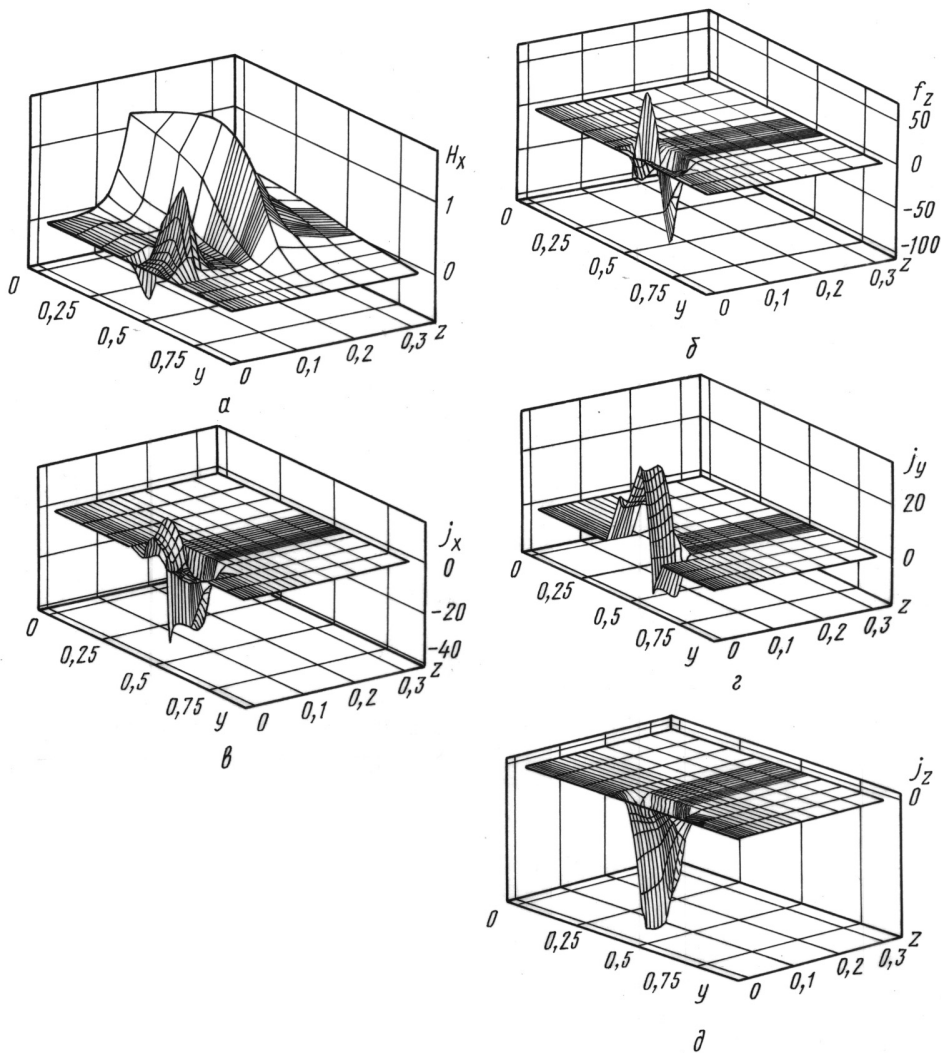


Рис. 10. Распределения компонент физических полей H_x (а), f_z (б), j_x (в), j_y (г), j_z (д) в сечении плоскостью $x = \text{const}$ контакта якоря и рельса при $t = 0,233$ мс, $i_x = 12$

Для понимания динамики нагрева поверхности якоря на рис. 12 построены распределения температуры в плоскости контакта якоря и рельса в различные моменты времени.

Распределения температуры во всей расчетной области показывают, что самому сильному нагреву подвержено ускоряемое тело. Температурное поле распространяется по поверхности якоря с двух сторон, причем наибольшая температура достигается сначала в задней части якоря, а затем распространяется по направлению движения якоря.

Выполненные расчеты более подробно рассмотрены в работе [16].

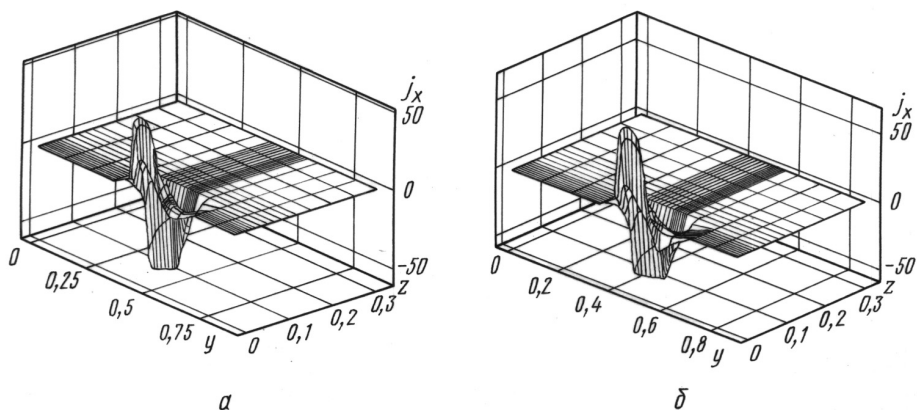


Рис. 11. Распределения нормальной компоненты j_x плотности тока в сечении плоскостью $x = \text{const}$ контакта якоря и рельса в различные моменты времени: $t = 0,366$ (а); $0,400$ (б) мс

Заключение. Проведенные исследования представляют одну из немногих работ, в которых рассмотрены измерения во время перехода контакта в рельсотроне от металлической фазы к фазе так называемого “гибридного” контакта. Получено экспериментальное подтверждение наличия тока на передней поверхности металлического якоря, определены время начала деградации металлической проводимости в задней части якоря и соответствующая этому времени скорость якоря. Приведенные результаты делают возможной адекватную привязку результатов численных расчетов к реальным физическим процессам. Сложность электрофизических процессов, происходящих на высокоскоростном контакте, усугубляется существенной трехмерностью геометрии рельсотронных ускорителей. Поэтому измерения, проведенные на контактах рельсотрона, позволили получить лишь некоторые оценки для переходных процессов.

Из полученных трехмерных распределений векторных и скалярных полей наибольший интерес представляют распределения температуры в области контакта якоря и рельса, где происходит испарение материала и деградация металлического контакта. Температура испарения материала якоря, в первую очередь, достигается в задней части контактной поверхности. В дальнейшем испарение распространяется по направлению движения якоря в виде серповидной волны.

Полученные в расчете данные качественно и количественно согласуются с экспериментальными результатами. Время существования надежного электрического контакта металлического типа, полученное в эксперименте, вполне согласуется с расчетным временем момента начала плавления. Момент появления кипения материала якоря соответствует моменту разрушения металлической проводимости. Расчетная

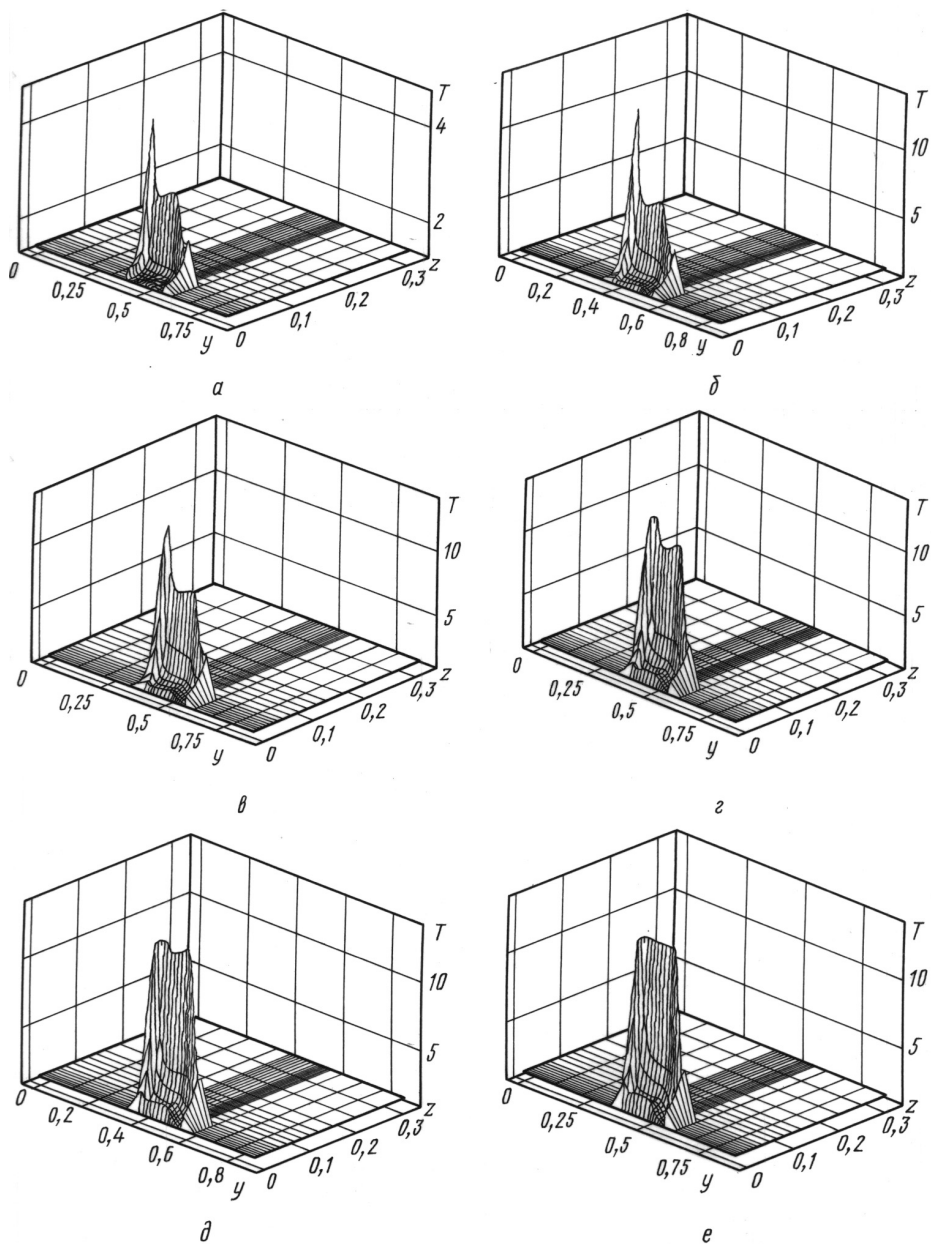


Рис. 12. Распределение температуры в сечении плоскостью $x = \text{const}$ контакта якоря и рельса в различные моменты времени: $t = 0,233$ (а); $0,366$ (б); $0,400$ (в); $0,450$ (г); $0,480$ (д); $0,499$ (е)

скорость тела на выходе из рельсотрона, как и скорость движения волны разрушения контакта, соответствует экспериментальным величинам. Геометрическое распределение волны испарения материала, полученное численно, также близко к полученному в экспериментах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков Ю. И., Лотоцкий А. П., Савичев В. В., Халимуллин Ю. А. Исследование эрозии металлических контактов в рельсотронном ускорителе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". – 1999. – № 2. – С. 46–60.
2. М а т е р и а л ы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле (Новосибирск, 10–13 апреля 1990 г.) / Под ред. М.Ф. Жукова. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1990. – 350 с.
3. М а т е р и а л ы II Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле (Новосибирск, 4–6 декабря 1991 г.) / Под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 1992. – 367 с.
4. Железный В. Б., Лебедев А. Д., Плеханов А. В. Воздействие на динамику ускорения якоря в РЭУ // Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле (Новосибирск, 10–13 апреля 1990 г.) / Под ред. М.Ф. Жукова. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1990. – С. 16–32.
5. Kareev Yu. A., Kotova L. G., Kuharenko A. T., Halimullin Yu. A. Investigation of the Metal Contact Crisis in Railguns with Resistive Rails // Proc. of 5th European Symposium on Electromagnetic Launch Technology (Toulouse, France, April 10–13, 1995). – Report 22.
6. Лотоцкий А. П., Крылов М. М., Кузнецов В. В., Халимуллин Ю. А., Савичев В. В., Галанин М. П. Магнитная конфигурация канала. Перенос тока в зоне якоря / Препр. ГНЦ РФ ТРИНИТИ 0083-А. – 2001. – 23 с.
7. Галанин М. П., Попов Ю. П. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах: Математическое моделирование. – М.: Наука, 1995. – 320 с.
8. Галанин М. П., Лотоцкий А. П., Попов Ю. П., Храмовский С. С. Численное моделирование пространственно трехмерных явлений при электромагнитном ускорении проводящих макротел // Мат. моделирование. – 1999. – Т. 11. – № 8. – С. 3–22.
9. Галанин М. П. Компьютерное моделирование в задачах конвертирования электромагнитной и кинетической энергии. Задачи и модели // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2002. – № 4. – С. 109–123.
10. Галанин М. П. Компьютерное моделирование в задачах конвертирования электромагнитной и кинетической энергии. Решение задач // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2003. – № 1–2. – С. 112–127.
11. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
12. Kershaw D. S. The incomplete Cholesky–Conjugate Gradient Method for the iterative solution of system of a linear equations // J. Comput. Phys. – 1978. – V. 26. – P. 43–65.
13. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений. – М.: Мир, 1984. – 333 с.
14. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
15. Галанин М. П., Храмовский С. С. Организация расчета трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в областях со сложной геометрией проводников и диэлектриков / Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 1999. – № 42. – 18 с.

16. Галанин М. П., Лотоцкий А. П., Уразов С. С., Халимуллин Ю. А. Математическое моделирование эрозии металлических контактов в релясотронном ускорителе / Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2003. – № 79. – 28 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.2004

Михаил Павлович Галанин родился в 1956 г., окончил в 1979 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Автор 130 научных работ в области прикладной математики, вычислительной математики и физики.



M.P. Galanin (b. 1956) graduated from the Moscow State University n.a. M.V. Lomonosov. D.Sc. (Phys.-Math.), professor of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University, senior researcher of Institute for Applied Mathematics n.a. M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences. Author of 130 publications in the field of applied mathematics, computing mathematics and physics.

Сергей Сергеевич Уразов родился в 1981 г., окончил в 2004 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области прикладной и вычислительной математики.



S.S. Urazov (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Author of 3 publications in the field of applied and computing mathematics.

Алексей Павлович Лотоцкий родился в 1944 г., окончил в 1969 г. Московский инженерно-физический институт. Д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (г. Троицк). Автор 100 научных работ в области электрофизики и физики плазмы.



A.P. Lototsky (b. 1944) graduated from the Moscow Engineering and Physical Institute in 1969. D.Sc. (Phys.-Math.), leading researcher of the Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Investigations (town Troitsk). Author of 100 publications in the field of electrophysics and physics of plasma.