

## Исследования работы импульсного магнитного компрессора с электродинамическим разгоном лайнера

© Е.В. Грабовский,<sup>1</sup> В.П. Бахтин,<sup>1</sup> А.М. Житлухин,<sup>1</sup> В.Ф. Левашов,<sup>1</sup> А.П. Лотоцкий,<sup>1</sup> Д.А. Топорков,<sup>1</sup> Н.М. Умрихин,<sup>1</sup> Н.М. Ефремов,<sup>1</sup> М.К. Крылов,<sup>1</sup> Г.Н. Хомутильников,<sup>1</sup> Ю.Н. Сулимин,<sup>1</sup> М.П. Галанин,<sup>2</sup> А.С. Родин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 142190 Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047 Москва, Россия  
e-mail: lototsky@triniti.ru

(Поступило в Редакцию 1 октября 2013 г.)

Приведены результаты экспериментов по ускорению пластинчатых лайнеров на созданном электромагнитном компрессоре магнитного потока, предназначенном для обострения мощности импульсов тока с начальной амплитудой до 3 МА. Выбор геометрии контура сжатия лайнера в виде полосковой линии позволил использовать один источник тока как для ускорения лайнера, так и для создания магнитного потока в области сжатия. Исследованы динамика разгона и характер деформации пластинчатых лайнеров в течение цикла работы устройства. В выполненных экспериментах для питания компрессора использовалась батарея конденсаторов. На выходной индуктивной нагрузке получено усиление амплитуды тока в 1.6 раза при двукратном сокращении длительности импульса. Данные экспериментов сравнены с результатами численных расчетов течения материала лайнеров, адекватно отражающими протекающие процессы в таком компрессоре.

### Введение

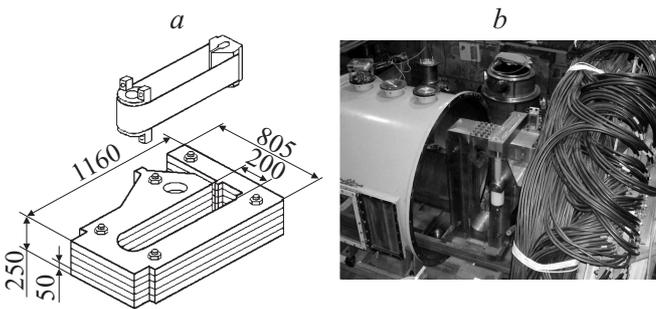
Взрывомагнитные генераторы (ВМГ) в настоящее время являются самыми мощными источниками электрического тока. Наибольшее распространение получили спиральные и дисковые генераторы [1]. Реже используются простые пластинчатые генераторы типа „кузнечные меха“ [2]. В этих устройствах энергия взрывчатого вещества (ВВ) преобразуется в кинетическую энергию металлического проводника в замкнутой цепи с током, сжимающего магнитный поток. В результате ток в контуре возрастает. ВМГ позволяют получать импульсы тока в нагрузке амплитудой в десятки и сотни мегаампер с характерным временем 5–10 мкс. Энергия в контуре при этом может превышать 100 МДж [3].

ВМГ с электрической энергией выхода 3–10 МДж достаточно хорошо отработаны и используются для проведения различных прикладных исследований [3]. Однако работа с ними невозможна в условиях обычной лаборатории. Использование большого количества ВВ требует специальных мер защиты и лицензирования. Поэтому интересно рассмотреть возможность использования электромагнитной энергии для деформирования электрического контура в компрессионном генераторе тока. Работа магнитного компрессора (МК) основана на преобразовании электромагнитной энергии входного питающего контура в кинетическую энергию разгоняемого лайнера, а затем в энергию магнитного поля нагрузки. В качестве источника питания такого преобразователя мощности можно рассматривать индуктивный накопитель (ИН), обладающий высоким удельным запасом энергии по сравнению с конденсаторной батареей.

Для создаваемой экспериментальной установки МОЛ (Магнитный Обостритель Лайнер) [4,5], базовым элементом которой является индуктивный накопитель на 12.5 МДж, должно быть разработано устройство, обеспечивающее сокращение времени вывода энергии ИН с величины 100 до 3–5 мкс в низкоиндуктивной нагрузке конечного каскада. Предполагается, что таким устройством будет МК, в котором основой деформируемого лайнера являются две плоские металлические пластины, ускоряемые навстречу друг другу электромагнитным полем. Выбор такой схемы обусловлен несколькими причинами. Это простота изготовления и легкая замена ленточного лайнера в сохраняемом ускорительном витке, возможность выбора длины и ширины ленты для оптимального согласования электрических параметров контуров. Благодаря предложенной и рассчитанной авторами оригинальной конфигурации магнитной системы МК [4,6], автоматически обеспечивается накачка магнитного поля в зону сжатия.

Эффективная работа МК требует скорости лайнера более 1 км/с и минимизации потерь в скользящих или перемещаемых контактах. Это общие проблемы магнитокомпрессионных устройств. Вместе с тем электродинамический механизм вносит заметные особенности в динамику разгона пластин лайнера и контактов по сравнению с газодинамическим разгоном продуктами ВВ.

Первые эксперименты по разгону пластины с током, проведенные на малом макете лайнера полоскового типа [4], прошли успешно. Для детальных исследований был построен пробный макет МК мегаджоульного уровня энергии. Он питается от емкостного накопителя установки „ПУМА“ [7]. Ускорительный виток изготовленного МК и камера установки показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** *a* — эскиз ускорительного витка; *b* — размещение витка в камере установки МК „ПУМА“. Размеры указаны в миллиметрах.

Использование емкостного накопителя энергии позволило согласовать времена ускорения пластинчатого лайнера и величину ускорительного тока в относительно короткой системе. При этом ее поперечное сечение соответствует размерам МК, разрабатываемого для установки МОЛ. Таким образом, на макете МК могли быть экспериментально изучены и решены основные физико-технические проблемы данного каскада усиления мощности и в рабочем режиме отработаны его основные узлы.

Результаты исследования динамики движения лайнера при скоростях до 0.9 km/s и сжатия магнитного потока во внутренней области лайнера ( $B_{\max} = 25$  T) опубликованы в [6,8]. Их можно сформулировать следующим образом:

- пластинчатые лайнеры в полосковой конфигурации ускоряются однородно вдоль длины пластин,
- последовательное включение внешнего массивного (толкающего) витка и лайнера на стадии разгона лайнера улучшает характеристику ускорителя,
- магнитная конфигурация МК позволяет захватить часть магнитного потока рассеяния ускорителя в зону сжатия лайнера, освободив систему от дополнительного контура возбуждения,
- при сжатии протяженных лайнеров имеет место эффект „пинчевания“ длинных пластин, уменьшающий их рабочую ширину,
- разработанные теоретические модели и программы численного моделирования динамики лайнера (например, в приближении лайнера как вязкой проводящей жидкости) дают возможность описывать и прогнозировать характеристики устройства.

После этапа исследования динамики движения лайнера для выполнения экспериментов с выводом энергии МК в нагрузку он был реконструирован. При этом к нему был подключен внешний нагрузочный виток, показанный на рис. 2 сверху.

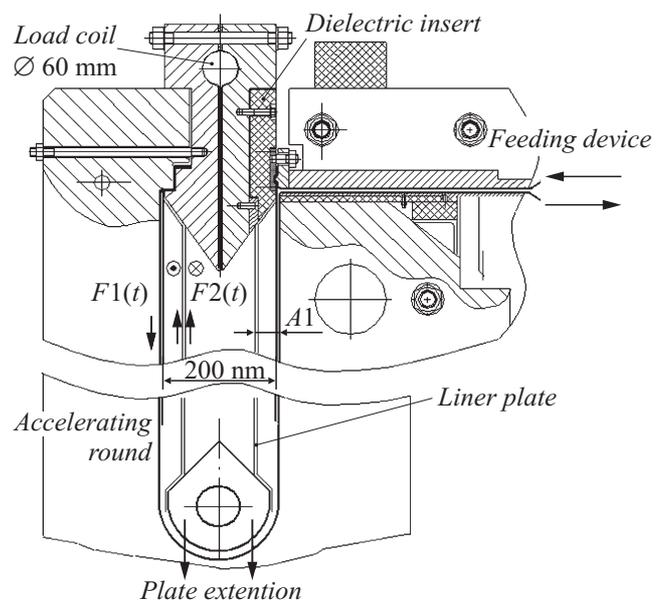
В проведенных на этой стадии экспериментах подробно исследован и оптимизирован процесс захвата магнитного потока в центральной области сжатия и вытеснения его из полости лайнера во внешнюю нагрузку. Оценены потери магнитного потока и эффективность генерации

энергии в нагрузке. В ходе расчетного сопровождения работы выбрана численная модель, наиболее полно соответствующая реальной экспериментальной картине процессов. Законченный этап макетирования рабочей модели и полученные результаты позволили приступить к проектированию МК для установки МОЛ.

## Конструкция МК, узел ввода и вывода тока, работа МК на внешнюю нагрузку

Камера МК с ускорительным витком показана на рис. 1, *b*. Перед пуском для снижения мощности ударной воздушной волны она откачивалась до давления 0.2 bar. Для скоростной фотосъемки процесса ускорения лайнера по бокам камеры сделаны диагностические окна. Узел ввода и вывода тока МК объединяет токоподводы от источника питания, устройство включения нагрузки и прижимные контакты для установки пластины лайнера. Конструкция узла показана на рис. 2.

Пластины лайнера выполнены из цельной алюминиевой ленты (АД-0) и имеют поперечное сечение  $1.5 \times 210$  mm. В начальный момент времени они натянуты вдоль поверхности витка и электрически отделены от него пленочной изоляцией. Поверхность витка, изготовленного из стали, для уменьшения нагрева и диффузии магнитного поля перед каждым пуском облицовывается медным листом толщиной 1 mm. Оптимальный момент времени подключения нагрузки определяется изменяемой при движении лайнера магнитной конфигурацией устройства и текущей величиной тока. Момент подключения обеспечивается диэлектрической вставкой с



**Рис. 2.** Нагрузочный узел МК и токовые соединения ввода и вывода токов. Положение пластин лайнера ( $A1 = 35$  mm) соответствует моменту времени завершения их ускорения перед электрическим соединением с нагрузочным витком. Ширина витка (в направлении, перпендикулярном рисунку) равна 250 mm.

рассчитанной толщиной (величина  $A1$ , рис. 2). Узел снабжен датчиками тока (пояса Роговского) для измерения входного ускоряющего тока, тока через верхний нагрузочный виток и датчиком напряжения на входе МК.

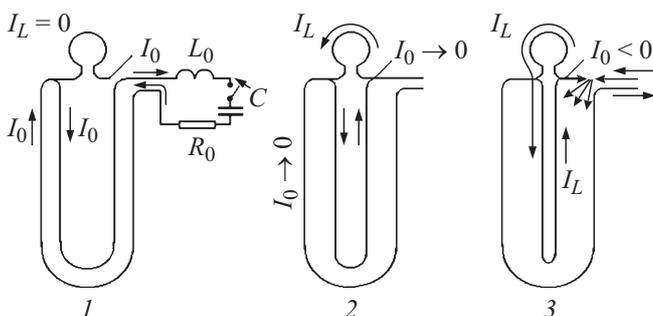
До момента замыкания цепи нагрузки лайнер на рис. 2 ускоряется магнитным полем  $F1(t)$ , генерируемым в зазоре ускорительного витка. При этом в полости сжатия между пластинами лайнера появляется поле  $F2(t)$ , которое соответствует потоку рассеяния. Полости с полями  $F1(t)$  и  $F2(t)$  связаны взаимной индуктивностью. Электрическая цепь нагрузки включается в момент времени  $t^*$ , когда появляется электрический контакт сдвигающимся к центру лайнером (определяется толщиной изолятора  $A1$ , рис. 2), после чего магнитный поток поля  $F2(t^*)$  вытесняется в нагрузочный виток через изолированную щель при дальнейшем движении пластин по инерции. Конструктивно выбор точки включения нагрузки рассчитан, исходя из анализа магнитной конфигурации [6] и сопоставления с результатами ранее выполненных ускорительных экспериментов [8].

## Последовательность работы МК и результаты экспериментов

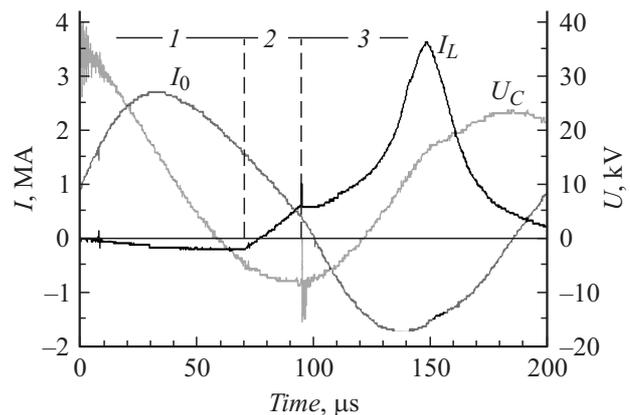
Выбор основных параметров макета устройства исходил из заданной максимальной скорости каждой пластины лайнера  $1 \text{ km/s}$ . При параметрах используемой конденсаторной батареи [7] ( $C = 3 \text{ mF}$ ,  $R = 1.2 \text{ m}\Omega$ ,  $L = 0.3 \text{ }\mu\text{H}$ ) длина витка выбрана равной  $0.8 \text{ m}$  для согласования с ускорителем лайнера. Амплитуда разрядного тока в ускорителе лайнера достигала величины  $I_0 \sim 3 \text{ MA}$  при времени нарастания  $35\text{--}40 \text{ }\mu\text{s}$ . При этом индуктивность внешней нагрузки, которая включает одновитковый соленоид  $d = 60 \text{ mm}$  и длиной  $250 \text{ mm}$  и щель, соединяющую зону сжатия потока, составляла  $22.9 \text{ nH}$  [9,10]. Корректировка параметров разгона проводилась выбором исходной ширины устанавливаемых алюминиевых пластин.

Процесс генерации импульсного тока в нагрузке МК разделяется на 3 фазы, которые схематично представлены на рис. 3.

В первой фазе процесса ускоряющий ток  $I_0$ , протекающий по витку, возвращается по лайнеру и ускоряет



**Рис. 3.** Три фазы (1–3) перестройки схемы протекания токов в цикле работы МК для питающим CLR контуром.  $R_0 = 1.2 \text{ m}\Omega$ ,  $L_0 = 300 \text{ nH}$ ,  $C = 3 \text{ mF}$ .



**Рис. 4.** Оциллограммы тока питания  $I_0$ , тока и нагрузки  $I_L$  и напряжения  $U_C$  емкостного источника (выделенные интервалы времени 1–3 соответствуют фазам процесса на рис. 3).

пластины в направлении плоскости симметрии. Между пластинами лайнера генерируется магнитное поле. Верхний нагрузочный виток в правой части электрически отделен диэлектрической вставкой, на которую ложится пластина лайнера (рис. 3, фаза 1).

Во второй фазе (рис. 3, фаза 2) ускоренный лайнер замыкает цепь нагрузочного витка и при уменьшении емкостного тока  $I_0$  ускорительного витка в нагрузку появляется ток  $I_L$ , соответствующий захваченному лайнером магнитному потоку. Он небольшой по величине, так как индуктивность полости лайнера значительно больше индуктивности нагрузки. С уменьшением тока  $I_0$  уменьшается давление магнитного поля, и ускорение лайнера завершается.

В начале третьей фазы растягиваемая в процессе деформации пластина лайнера обрывается на поверхности диэлектрической вставки. При изменении направления емкостного тока  $I_0$  сила, прижимающая пластину лайнера к поверхности, исчезает, а продольное натяжение в пластине растет из-за продолжающегося движения лайнера. Обрыв приводит к возникновению дугового разряда, который прожигает пленочную изоляцию на входе питающего токопровода. Источник питания коротко замыкается. С этого момента контур нагрузки со сжимающимся по инерции лайнером ведет себя независимо от источника питания, генерируя сильноточный импульс тока в верхнем витке на рис. 3, фаза 3. Экспериментально наблюдаемый обрыв ленты лайнера — это несущественный фактор для работы устройства.

Описанные выше фазы работы МК отмечены на оциллограммах, представленных на рис. 4. Амплитудное значение тока в ускоряющей системе составило  $2.8 \text{ MA}$ . Замыкание электрической цепи нагрузки произошло в момент времени  $t = 70 \text{ }\mu\text{s}$  от начала процесса, обрыв ленты лайнера соответствует моменту  $t = 95 \text{ }\mu\text{s}$ . Это видно по изменению величины производной тока  $dI_0/dt$  из-за скачкообразного уменьшения индуктивности. При дальнейшем движении лайнера по инерции и его торможении до остановки ток в нагрузке достиг величин

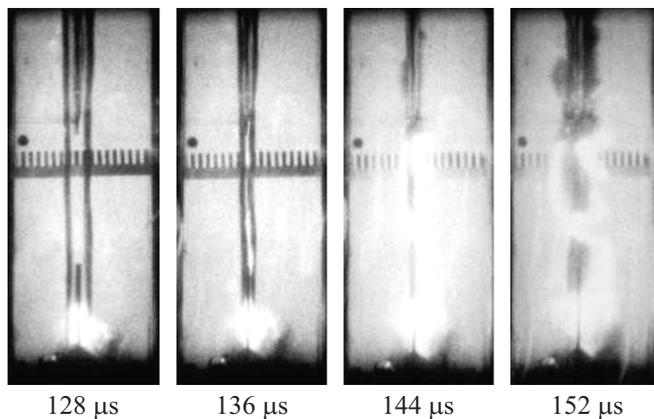
ны 3.8 МА. Коэффициент усиления тока, таким образом, равен 1.35. Симметричная форма импульса нагрузочного тока наблюдается как в проведенных экспериментах, так и ранних опытах при сжатии магнитного поля внутри пластин [8].

### Динамика ускорения и торможения пластин лайнера

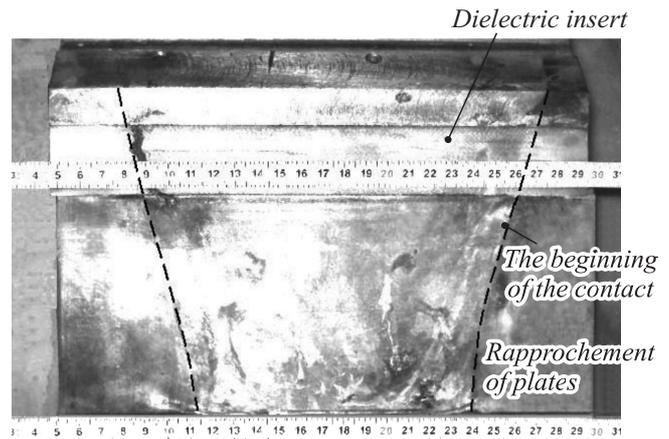
На рис. 5 приведены кадры теневой фотосъемки, соответствующие максимальному схождению пластин лайнера. Для оценки скорости, перпендикулярной направлению перемещения пластин, установлена планка с нанесенными через 10 мм делениями. На кадрах видно, что пластины сходятся симметрично, и после момента времени  $t = 148 \mu\text{s}$ , имеет место их обратное движение. Максимальная скорость пластин составляет величину 0.81 км/с. Видны загорающиеся дуги в точках контактов при встрече пластин, обусловленные некоторой малой регулярной неоднородностью движения.

Наблюдаемое отражение пластин, сжимающих магнитный поток, также следует и из симметрии формы тока  $I_L$  в нагрузочном витке вблизи его максимума при  $t = 145 \mu\text{s}$  (рис. 4) Оценка сопротивления лайнера при учете его омического нагрева протекающим током показывает, что оно не должно превышать 0.2 мΩ, и постоянная времени L/R для нагрузочного контура не может быть хуже, чем 0.1 мс. При этом наблюдаемая величина времени удвоения и спада тока  $I_L$  на рис. 4 равна 15 μs.

На рис. 6 показаны следы на торцевом контактном узле, замыкающем цепь нагрузки, оставленные лайнером. Отчетливо видно уменьшение ширины пластины лайнера в процессе разгона. При начальном размере 210 мм эффективная ширина лайнера в момент касания контактного участка  $170 \pm 1 \text{ мм}$ . Эта ширина в значительной мере определяет геометрическую и магнитную конфигурацию нагрузочного контура, а с учетом



**Рис. 5.** Кинограмма теневой съемки пластин лайнера в ускорительном витке. Вертикальный размер области съемки 0.5 м. Ширина кадра соответствует внутреннему размеру окна витка 0.2 м. Экспозиция кадра 3 μs.



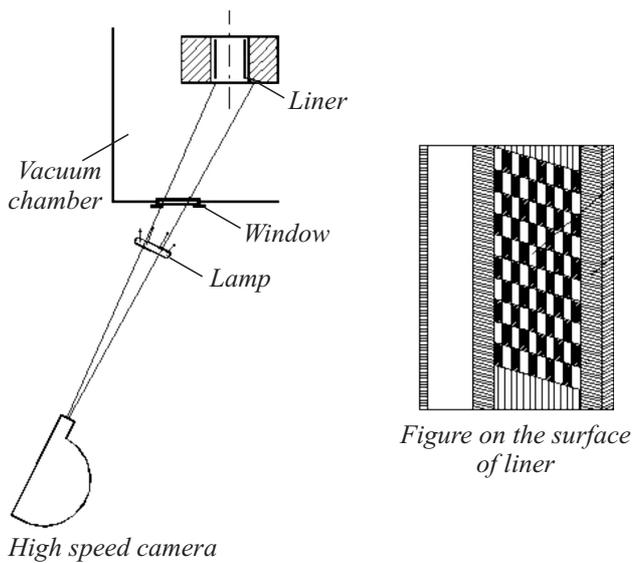
**Рис. 6.** Фотография следа лайнера на поверхности клиновидной части.

текущей величины тока  $I_0$  задает величину магнитного потока, захваченного в контур нагрузки. В конце процесса сжатия магнитного поля ширина пластины лайнера уменьшается примерно до 130 мм. Край пластины оставляет более глубокий отпечаток на медной облицовке, что позволяет предположить, что на ее краях существуют некие утолщения и увеличение массы по сравнению с центральной частью. Следы, показанные на рис. 6, качественно и количественно воспроизводятся в проведенных экспериментах.

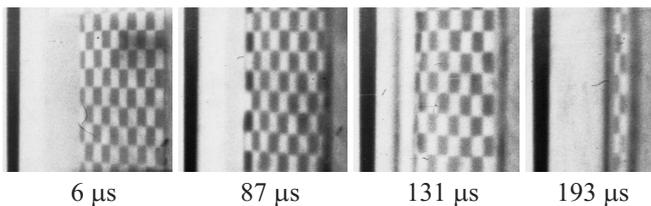
Отметим важное обстоятельство. Если ширина пластин лайнера к концу процесса сжатия уменьшается почти в 2 раза по сравнению с начальной шириной, то соответствующий размер витка нагрузки неизменен и равен 250 мм. Поэтому линейная плотность тока по лайнеру в поперечном направлении почти вдвое превышает плотность тока в нагрузке. В итоге плотность энергии магнитного поля, оставшегося между пластинами лайнера, должна вчетверо превышать плотность энергии, выведенной в нагрузку при максимальной величине тока. Это объясняет сильное отражение пластин после сжатия и явным образом наблюдается в эксперименте в виде пробитой фрагментами пластины медной облицовки ускорительного витка. Следы от удара сосредоточены на средней линии плоскости витка.

Характер деформации поперечного сечения лайнера в значительной мере влияет на способность системы эффективно сжимать магнитный поток для генерации больших токов. Поэтому определение деформации является важнейшей задачей работы. Для визуализации начальной стадии деформации плоской пластины был выполнен эксперимент с фотографированием внутренней поверхности лайнера. Схема фотографирования плоскости лайнера приведена на рис. 7.

Скоростная съемка велась под углом 30° к поверхности пластины, на внутреннюю часть которой нанесен рисунок для идентификации участков поверхности. В данном эксперименте использовалась более простая электрическая схема МК, в которой лайнер — пас-



**Рис. 7.** Схема фотографирования плоскости лайнера. Импульсная лампа смещена относительно оси наблюдения в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка.



**Рис. 8.** СФР-грамма съемки поверхности лайнера в процессе ускорения. Внизу указано время от начала подачи тока.

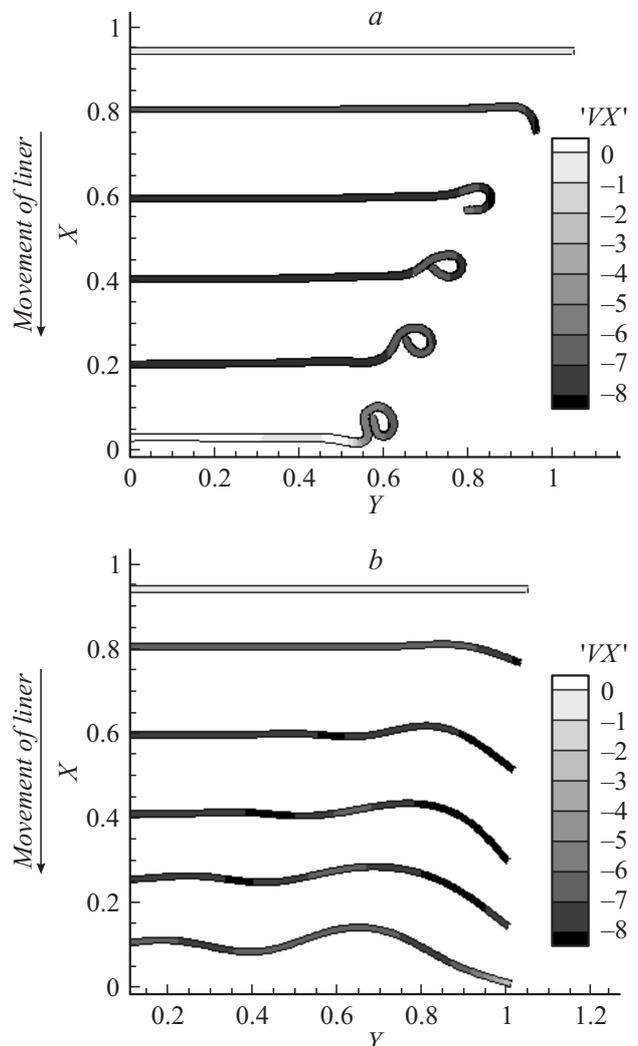
сивный короткозамкнутый виток без внутреннего магнитного поля. Режим ускорения — нефорсированный, максимальная скорость лайнера равна 0.65 km/s. На рис. 8 приведены характерные кадры скоростной съемки (СФР).

Видно, что в начале ( $t = 87 \mu\text{s}$ ) левый край пластины разворачивается внутрь, увеличивая угол к лучу зрения и параллельно направленному источнику света. Здесь увеличивается контрастность рисунка. При этом на правом краю пластины, разворачивающемся в обратном направлении, рисунок обрезается. На следующем кадре ( $t = 131 \mu\text{s}$ ) часть рисунка закрывается сворачивающимися в трубку краями пластины и пропадает. На этом же кадре видно появление в левой части видимого поля края встречной пластины. На последнем кадре ( $t = 193 \mu\text{s}$ ) встречно движущаяся пластина уже перекрывает большую часть поля зрения. Надо ожидать, что в рабочем режиме с лайнером, несущим полный ускорительный ток, деформация краев усилится. Такая же деформация лайнера на начальной стадии ускорения наблюдается и в расчетах процесса разгона пластин, приводимых ниже.

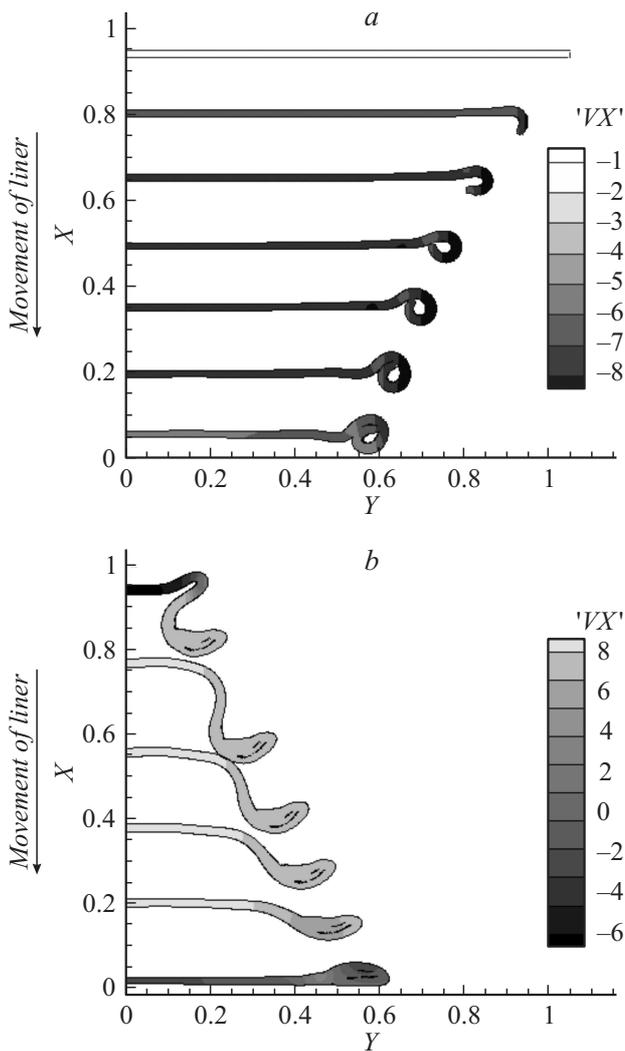
## Математическое моделирование работы МК. Сравнение с данными экспериментов

Одной из поставленных задач являлось определение поведения краев пластин лайнера при его ускорении и последующем сжатии магнитного поля.

В модели жидкого лайнера [11] (рис. 9, а) под действием силы Лоренца происходит отгибание, а потом закручивание края пластины. Здесь повышена плотность токов и, кроме того, действует натяжение линий магнитного поля, которые огибают пластину. Движение лайнера происходит сверху вниз, от поверхности витка  $X = 1.0$ . Закручивающийся край пластины сначала опережает центральную часть, но в дальнейшем начинает от нее отставать. Поэтому при приближении пластин к



**Рис. 9.** Положения лайнера для различных моментов времени в диапазоне времени от  $t = 0$  до  $150 \mu\text{s}$ .  $X = 1.0$  соответствует расстоянию 100 mm от средней плоскости витка  $X = 0$ ;  $Y = 1.0$  соответствует размеру 100 mm ширины лайнера. Показана половина симметричного сечения; а — модель жидкого лайнера, б — модель упругого лайнера.



**Рис. 10.** Расчет положения и конфигурации лайнера при прямом и обратном (после отражения) ходе лайнера. Модель упругопластического тела. Моменты времени: *a* —  $t = 0.52, 72, 92, 110, 130$  и  $150 \mu\text{s}$ ; *b* —  $t = 170, 200, 220, 264, 300 \mu\text{s}$ .

средней плоскости витка (ось абсцисс) сначала происходит торможение центральной части пластин, и она отражается вверх, а уже потом тормозятся их сближающиеся края.

В расчете модели упругого лайнера [12] (рис. 9, *b*) под действием электромагнитных сил край пластины, на котором сосредоточена максимальная плотность тока, значительно опережает центральную часть пластины, по которой бегут упругие волны. В конце расчета край пластины достиг нижней части расчетной области (произошел контакт с краем встречной пластины), после чего работа программы останавливается.

На рис. 10 приведены результаты расчета движения лайнера с использованием упругопластической модели [13]. На этапе торможения лайнера максимальная плотность тока сосредоточена в тонком слое, расположенном в нижней части утолщения на крае пластины. Формирующаяся сила Лоренца сначала тормозит

и сминает закрученный край, а потом останавливает и толкает вверх центральную часть. На рис. 9 и 10 оттенками серого показана вертикальная компонента скорости (нормированная на величину  $100 \text{ m/s}$ ).

Результаты моделирования показали, что в процессе движения край лайнера заворачивается внутрь и к началу процесса торможения образует двойной виток. Чтобы прояснить физическую суть данного явления, на рис. 11 приведены распределения плотности тока (нормированы на величину  $200 \text{ A/cm}^2$ ) и вектора силы Лоренца на крае лайнера. Из приведенных рисунков видно, что на крае лайнера концентрируется максимальная плотность тока и в результате взаимодействия тока с магнитным полем формируется сила Лоренца ( $\mathbf{f} = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}] = (-jH_y, jH_x, 0)$ ), которая загибает край лайнера вниз ( $t = 37 \mu\text{s}$ ).

Закручиваясь, край лайнера образует замкнутую трубку. При этом значения плотности тока на сближающихся участках имеют разный знак, и сила Лоренца препятствует их дальнейшему сближению. Однако под действием сил инерции контакт все-таки происходит. Образовавшийся замкнутый контур продолжает закручиваться под действием силы Лоренца ( $t = 120 \mu\text{s}$ ). На этапе торможения лайнера максимальная плотность тока сосредоточена в тонком слое, расположенном в нижней части утолщения на крае пластины. Формирующаяся сила Лоренца сначала тормозит и сминает закрученный край, а потом останавливает и толкает вверх центральную часть ( $t = 148 \mu\text{s}$ ).

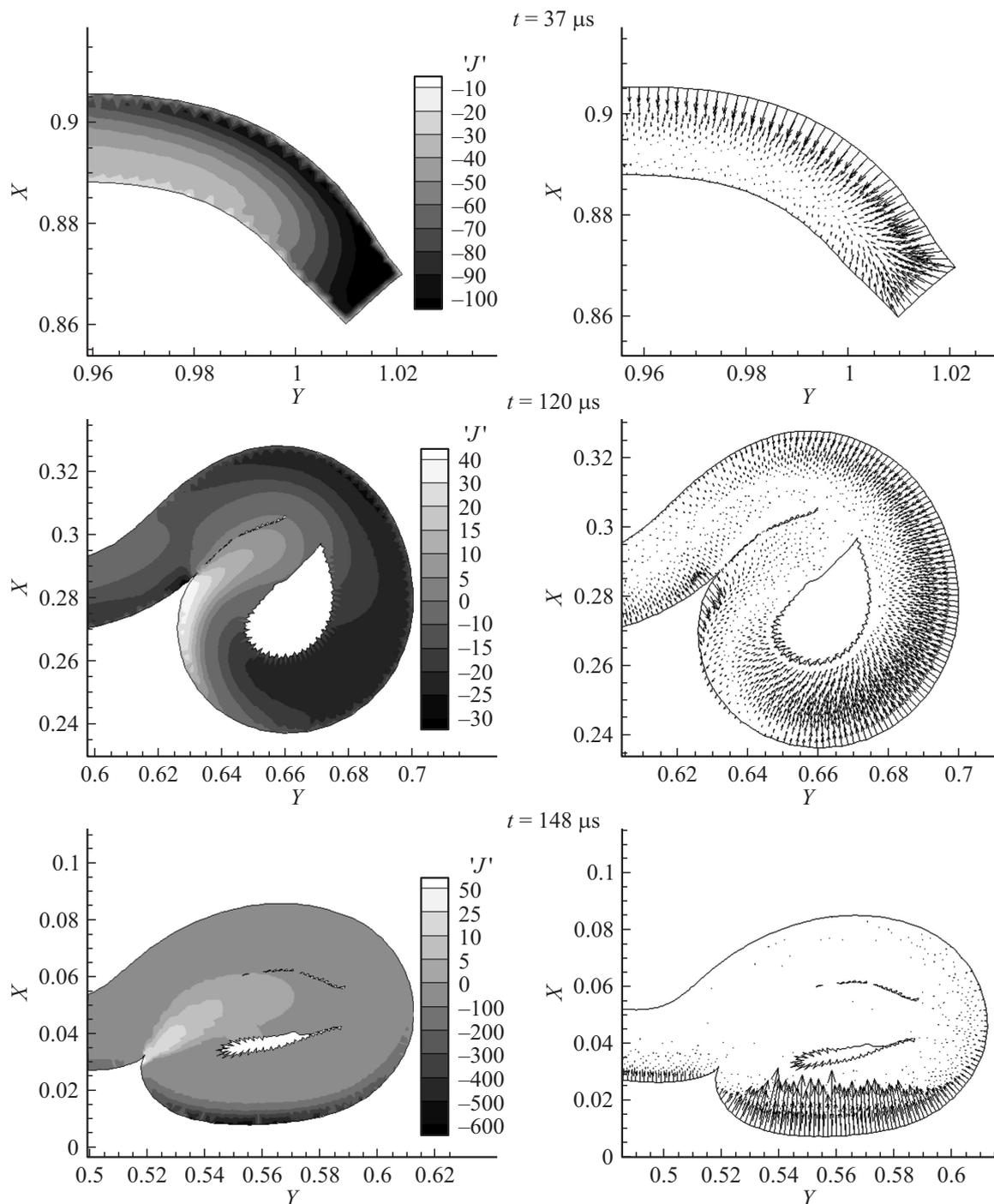
На рис. 12 показано распределение магнитной индукции  $B$  вблизи края лайнера перед столкновением пластин. Из рисунка видно, что магнитное поле, огибая лайнер, меняет направление (знак). На заключительном этапе сжатия магнитного поля наряду с уменьшением площади области, заключенной между пластинами лайнера, наблюдается значительный рост амплитуды магнитного поля.

Модели лайнера, соответствующие вязкой жидкости и упругопластического тела, дают сходную картину процесса ускорения лайнера.

В момент замыкания цепи нагрузки эффективная полуширина лайнера в эксперименте составляла  $85 \text{ mm}$  ( $t = 70 \mu\text{s}$ ), а в конце процесса торможения —  $65 \text{ mm}$  ( $t = 150 \mu\text{s}$ ). Измерения проведены по отпечатку края следа (рис. 6).

Для расчетной модели упругопластического лайнера полуширина пластины в соответствующие моменты имеет следующие значения:  $l_v = 87.5 \text{ mm}$  ( $t = 70 \mu\text{s}$ ),  $l_v = 61.5 \text{ mm}$  ( $t = 158 \mu\text{s}$ ); для модели жидкого лайнера полуширина пластины в соответствующие моменты имеет следующие значения:  $l_v = 89.5 \text{ mm}$  ( $t = 70 \mu\text{s}$ ),  $l_v = 62.5 \text{ mm}$  ( $t = 162 \mu\text{s}$ ). Поскольку в данных моделях на краях лайнера имеются утолщения, то это объясняет более глубокий отпечаток края лайнера на клине.

В модели упругого лайнера на всем протяжении расчета полуширина лайнера не отличалась от начальной ( $105 \text{ mm}$ ) более, чем на  $5\text{--}7 \text{ mm}$ .

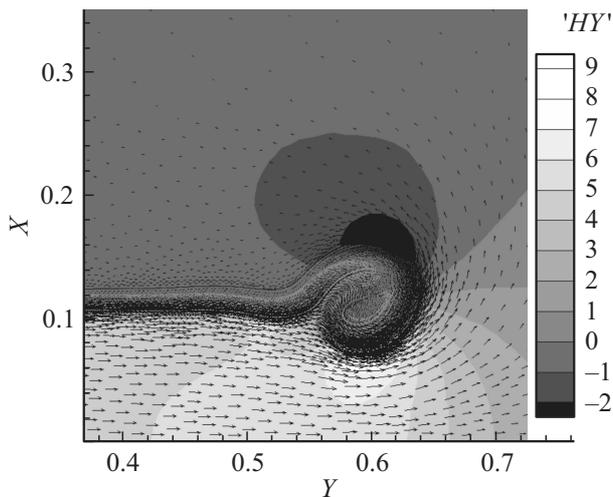


**Рис. 11.** Распределение плотности тока (левый столбец) и вектор силы Лоренца на крае лайнера в различные моменты времени.

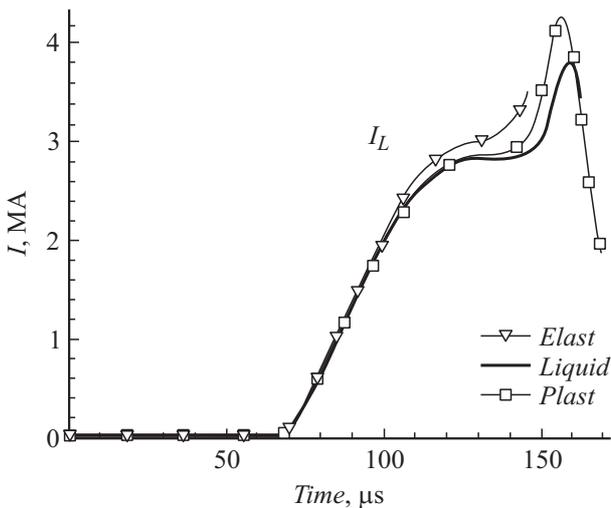
Токи в нагрузочном витке, полученные в моделях жидкого и упругопластического лайнера, показаны на рис. 13. Они имеют амплитуду 3.6–4.0 МА, близкую к экспериментальным значениям. Однако форма тока имеет первую полуволну, связанную с изменением направления тока емкостного источника (рис. 4). В расчетной электрической схеме вторая полуволна тока емкостного источника замыкается через нагрузочный виток. Отличие от данных эксперимента объяснимо, так

как шунтирование источника тока и пробой изоляции на входе в полость витка (рис. 3) — это экспериментальный и ранее непредвиденный факт.

Значительный интерес представляют сравнение выходных характеристик МК с расчетными величинами и анализ распределения видов энергии в процессе генерации токового импульса. На рис. 14 приведены расчетные графики распределения энергии по видам в процессе разгона и генерации токового импульса в нагрузке.



**Рис. 12.** Распределение горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля (нормирована на 2Т), а также вектор напряженности магнитного поля в окрестности края лайнера в момент времени  $t = 142 \mu\text{s}$ .



**Рис. 13.** Выходной расчетный импульс тока в нагрузке для различных моделей.

Для расчета с упругопластическим лайнером энергия, выведенная в нагрузочный виток (на момент максимального сжатия магнитного поля), равна  $E_{IA} = 211 \text{ kJ}$  (оценка в эксперименте 170 kJ), а энергия магнитного поля в области между пластинами лайнера на данный момент времени в расчете составила 156 kJ. В магнитное поле нагрузки преобразуется более половины кинетической энергии лайнера. Можно предположить, что в случае большего ускорения лайнера, при котором происходит физическое схлопывание пластин, можно получить выходной импульс с большей амплитудой. Отметим, что по экспериментальным данным в нагрузку выводится примерно 56% захваченного лайнером магнитного потока.

## О размерности процесса сжатия и вытеснения магнитного потока

Электромагнитное устройство с подобной геометрией лайнерной системы создано и испытано впервые. Поэтому представляется важным обсудить некоторые особенности работы такого МК, основываясь на приведенных экспериментальных данных и наблюдения сопутствующих эффектов.

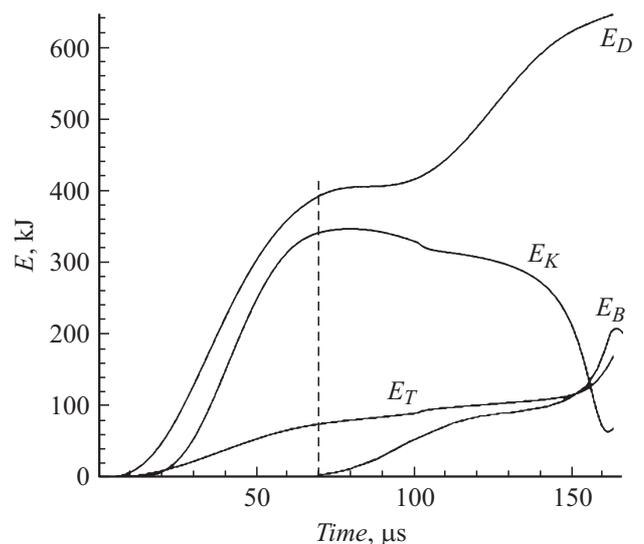
Следы от падения лайнера на концевых элементах токоподводов, показанные на рис. 6, свидетельствуют об уменьшении ширины пластин при разгоне электромагнитными силами. Учет этого эффекта может быть существенным по двум причинам:

- часть кинетической энергии лайнера, соответствующая поперечному движению массы, не может быть использована для работы по сжатию и вытеснению магнитного потока,

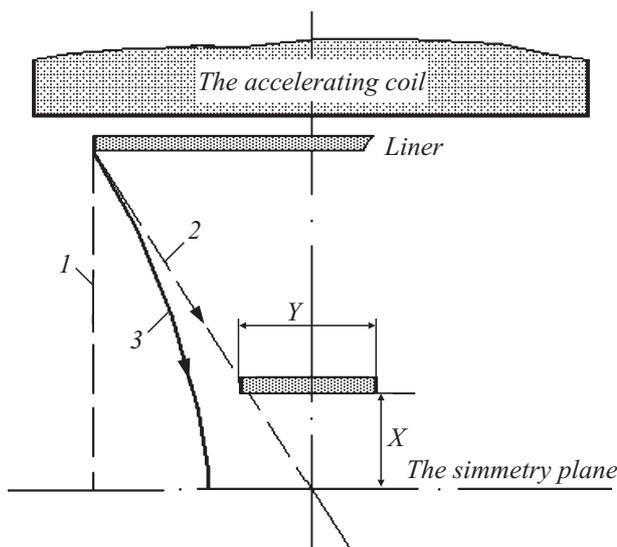
- при равном токе МК уменьшение ширины лайнера увеличивает плотность магнитной энергии в зоне сжатия потока по отношению к плотности магнитной энергии в нагрузочном витке.

На рис. 14 можно видеть, что в точке отражения пластин расчетная кинетическая энергия отлична от нуля. Это соответствует скорости перемещения массы пластины вдоль поверхности витка, так что ширина пластины после отражения продолжает уменьшаться. Этим также объясняется упомянутая выше локализация разрушения медной облицовки в середине витка при обратном ходе лайнера.

На рис. 15 условно показаны два предельных случая движения краев лайнера, которые гипотетически могли бы быть реализованы при специальном выборе толщины и материала (с точки зрения его прочностных свойств)



**Рис. 14.** Распределение энергии в процессе ускорения лайнера и генерации токового импульса:  $E_D$  — потери энергии во внешних цепях подвода тока,  $E_K$  — кинетическая энергия лайнера,  $E_T$  — внутренняя (тепловая) энергия лайнера,  $E_B$  — магнитная энергия нагрузочного витка.



**Рис. 15.** Движение краев ленты в реальном и предельных случаях: 1 — одномерное движение, 2 — движение с сохранением подобия  $Y/X = \text{const}$ , 3 — реальная траектория движения края ленты.

лайнера. В первом случае абсолютно твердая пластина движется одномерно, полностью вытесняя поток из области сжатия в нагрузочный виток до момента остановки или столкновения в плоскости симметрии. Во втором случае натяжение магнитных силовых линий на краях пластин из сверхпластичного материала обеспечивает уменьшение ее ширины, так что отношение  $Y/X = \text{const}$ . В этом случае индуктивность электрического контура в области сжатия будет сохраняться и вытеснения магнитного потока в нагрузочный виток происходить не будет. Ток в системе генератор—нагрузка будет иметь постоянную величину при торможении лайнера возрастающим давлением поля под лайнером.

В действительности в экспериментах реализуется промежуточный случай, так как использовать достаточно жесткую металлическую ленту лайнера не представляется возможным. Выбранный пластичный материал лайнера (алюминий АД-0, А5М) необходим для течения материала ленты в продольном направлении в зонах ее соприкосновения с неподвижными токовыми контактами. Как показано в работах [6,14], достаточная пластичность используемого материала при реальной массе ленты обеспечивает некоторый радиус  $r$  продольного изгиба ленты—оболочки, равновесный с давлением ускоряющего магнитного поля. При выбранных параметрах устройства величина  $r \sim 0.01$  м, что много меньше размеров окна в витке и пренебрежимо мала по отношению к длине лайнера. Такое соотношение размеров обуславливает малую область продольного растяжения пластины вблизи перемещающейся линии контакта. Остальная часть ленты в продольное движение не вовлекается, удерживаемая своей инерционной массой. Рабочая зона лайнера не испытывает заметных продольных деформаций, что позволяет получить на-

блюдаемую однородность ускорения ленты в продольном направлении и однородное сжатие поля по длине полосковой линии. Небольшая регулярная продольная неоднородность, наблюдаемая на рис. 5 в момент встречи лент, является, по-видимому, следствием возбуждения волны упругой деформации, которая проходит вдоль лайнера в самом начале нагружения ленты. Эта слабая волна успевает пробежать по лайнеру со звуковой скоростью, в отличие от волны пластического течения, скорость которой много меньше скорости лайнера [14]. Однако наблюдаемое пере замыкание токов в локальных точках вдоль лайнера ограничивает максимальный ток в нагрузке.

В одном из последних экспериментов предпринята попытка уменьшить влияние этой неоднородности, профилируя ширину пластины лайнера от 210 вверху (рис. 2) до 200 мм в нижней точке (ширина перпендикулярна плоскости рисунка). Ожидалось, что из-за различия скоростей схлопывания лайнера по длине будет получено упорядоченное по длине МК вытеснение магнитного потока в нагрузочный виток. В этом эксперименте получен ток в витке 4.05 МА при амплитуде питающего тока 2.5 МА. Коэффициент усиления тока составил 1.6.

## Обсуждение результатов

Работа сильноточных систем с пластинчатыми лайнерами сопровождается значительными потерями сжимаемого магнитного потока. Даже в сравнительно простых случаях относительная величина потерь оценивается в 40% [2]. Данные настоящих экспериментов соответствуют этим оценкам. Поэтому расчетные значения токов, игнорирующие скользящие концевые контакты, дают завышенные оценки энергии, выведенной в нагрузку. В экспериментах стадия торможения лайнера, приводящая к резкому падению контактного давления, по-видимому, является самой опасной. Тем не менее выбор магнитокумулятивной системы для обострения тока индуктивного накопителя сделан в пользу полосковой схемы [4] с пластинчатыми лайнерами. Это обусловлено простотой исполнения и возможностью замены лайнеров в неразрушаемом лабораторном устройстве. Используемые магнитная и электрическая конфигурации схемы МК с лайнером, последовательно включенным в ускорительный контур, отличаются тем, что максимальная величина индуктивности ускорителя превышает величину собственной индуктивности ускорительного витка. Увеличение градиента индуктивности позволяет поднять скорость лайнера при ограниченном токе ускорения. Структура магнитного поля при протекающем ускорительном токе обеспечивает автоматическую генерацию магнитного потока в области сжатия пластин без использования специальных катушек возбуждения.

В представленной серии экспериментов использован емкостной источник питания МК. Это усложнило выбор оптимальной точки „захвата“ магнитного потока, связанный с частотной характеристикой питающего импульса.

Существенно лучшие результаты по обострению мощности ожидаются при реальном использовании питания от индуктивного накопителя энергии, дающим аperiодический импульс тока для ускорения лайнера. Тогда появляется возможность перехватить магнитный поток в зону сжатия в более поздний момент времени, что позволит получить на установке МОЛ [5,15] токи с большей крутизной нарастания и длительностью импульса менее  $5 \mu\text{s}$ . Это подтверждено в проведенных первых расчетах МК с питанием от индуктивного накопителя.

Для расчета формы лайнера и коррекции его конфигурации при помощи изменения профиля индуктора, а также для учета диффузии поля в стадии сжатия разработаны математические модели. Соответствующая программная реализации позволяет подробно описать процессы электромагнитного ускорения и торможения плоских проводников в различных двумерных сечениях и различных приближениях упругого тела, упругопластического тела и вязкой несжимаемой жидкости.

Проведены циклы вычислений для различных моделей. Показано, что расчетные параметры движения жидкого и упругопластического лайнера хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. В целом модель упругопластического лайнера наиболее достоверно описывает движение пластин лайнера в МК.

## Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования перспективной схемы электродинамического обострителя мощности. Данные, полученные на макете с величиной тока 4 МА, показали работоспособность выбранной концепции устройства. Она может быть положена в основу таких устройств, разрабатываемых для практических применений.

2. Численное моделирование движения пластинчатого лайнера в деформируемой полосковой линии выполнено с помощью разработанных моделей и алгоритмов. Получено адекватное соответствие макроскопических параметров работы системы (движение центра масс, ширина пластин и т.д.) с экспериментальными данными. С помощью расчетов описана детальная картина течения материала пластин при сжатии магнитного потока и обратном движении лайнера.

3. По результатам работы начато проектирование МК для обострения мощности ИН с запасом энергии более 12.5 МДж, созданного для установки МОЛ.

Авторы выражают благодарность ведущему сотруднику ГНЦ РФ ТРИНИТИ А.А. Самохину за полезные замечания, сделанные в ходе подготовки настоящей работы, а также А.А. Николашину и А.Г. Серякову за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Проведение работы финансировалось Госкорпорацией „РОСАТОМ“ (контракты ГК № Н.4ф.45.90.11.1012 от 28 февраля 2011 г. и ГК № Н.4ф.44.90.12.1039 от 26 апреля 2012 г.) и частично грантами РФФИ (проекты №№ 10–08–01308, 12–01–00109, 12–01–31193).

## Список литературы

- [1] *Selemir V.D., Demidov V.A.* // Megagauss X. Proc. of the Tenth Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Related Topics. Berlin, Germany, 2005. P. 161–168.
- [2] *Кнопфель Г.А.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
- [3] Магнитокумулятивные генераторы — импульсные источники энергии / Под редакцией В.А. Демидова, Л.Н. Пляшкевича, В.Д. Селемира. Саров. РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. Т. 1. 439 с.
- [4] *Азизов Э.А., Алиханов С.Г., Бахтин В.П., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Халимуллин Ю.А., Письменный В.Д., Житлухин А.М., Велихов Е.П., Долгачев Г.И., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Смирнов В.П., Глухих В.А., Кучинский В.Г., Печерский О.П., Кормилицын А.И., Рыкованов Г.П., Галанин М.П., Попов Ю.П.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: ТЯ синтез. РНЦ „Курчатовский институт“. 2001. Вып. 3. С. 3.
- [5] *Афанасьев В.А., Грабовский Е.В., Загрядский Л.В., Ефремов Н.М., Крылов М.К., Лотоцкий А.П., Николашин А.А., Серяков А.Г., Хомутинников Г.Н.* // ПТЭ. 2008. № 4. С. 56–63.
- [6] *Галанин М.П., Лотоцкий А.П.* // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 2. С. 256–264.
- [7] *Bakhtin V.P., Skvortsov Yu., Umrikhin N.M.* // *Plasm. Devic. Oper.* 1992. Vol. 2. P. 141–153.
- [8] *Lototsky A.P., Azizov E.A., Bakhtin V.P., Grabovski E.V., Gribov N., Toporkov D.A., Hallimullin Yu.A., Zhitlukhin A.M., Krylov M.K., Homutinnikov G.N., Efremov N.M., Umrikhin N.M., Pismenny V.D., Velikhov E.P., Dolgachev G.I., Kalinin Ju.G., Kingsep A.S., Smirnov V.P., Galanin M.P., Glukhikh V.A., Kuchinsky V.G., Pechersky O.P., Kormilitcin A.I., Rykovanov G.P.* // *Proceeding of The First Euro-Asian Pulsed Power conf. EAPPC'06, China, Chengdu, 2006.* Vol. 1. P. 387–391.
- [9] *Родин А.С.* / Препринт ИПМ РАН. М.: 2009. № 50. 32 с.
- [10] *Галанин М.П., Крылов М.К., Лотоцкий А.П., Родин А.С.* / Препринт ИПМ РАН. 2011. № 5. 31 с.
- [11] *Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Родин А.С., Щеглов И.А.* / Препринт ИПМ РАН. 2009. № 58. 31 с.
- [12] *Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Родин А.С., Щеглов И.А.* // *Вест. МГТУ. Сер. Естественные науки.* 2010. № 2. С. 65–84.
- [13] *Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Родин А.С.* // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 10. С. 35–54.
- [14] *Galanin M.P., Lototsky A.P.* // *Megagauss-IX. Proc. of Ninth Int. Conf. On Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics.* Sarov, VNIIEF. 2004. P. 537–544.
- [15] *Grabovsky E.V., Gribov A.N., Lototsky A.P., Efremov N.M., Golubev V.L., Krylov M.K., Nikolashin A.A., Seryakov A.G., Homutinnikov G.N.* // *IEEE T. Plasm. Sci.* 2010. Vol. 38. N 8. P. 1750–1753.