УДК 537.8,519.6

ДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛАЙНЕРА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО СЖАТИЯ ПЛАЗМЫ

В.П. Бахтин¹, М.П. Галанин^{2,3}, А.М. Житлухин¹, А.П. Лотоцкий¹, А.С. Родин^{2,3}

¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, Троицк, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В экспериментах с адиабатическим сжатием плазмы цилиндрическими лайнерами металлические оболочки являются элементами электрической цепи, поэтому необходимо подобрать такой профиль лайнера вблизи концевых участков, который позволит сохранить его герметичность и электропроводность. Для оценки напряжённо-деформированного состояния оболочки в осесимметричном приближении выполнено численное моделирование движения центральной части цилиндрического лайнера и движения части лайнера вблизи закреплённого концевого участка, обеспечивающего замыкание токовой цепи. Для описания лайнера использована модель упругопластического материала для больших деформаций. Проведено исследование влияния выбранной кривой деформирования на характеристики движения. Выполнен полномасштабный натурный эксперимент со сжатием длинной профилированной тонкостенной оболочки лайнера диаметром 90 мм импульсным током амплитудой 6 МА. Сравнение результатов натурального и численного экспериментов показало удовлетворительное совпадение измеренной и расчётной радиальной скорости оболочки лайнера при сохранении целостности стенок сжимаемого объёма.

Ключевые слова: цилиндрический лайнер, импульсный ток, математическое моделирование, большие деформации.

DYNAMICS OF FLOW OF TRAILER ELEMENTS OF CYLINDRICAL LINER FOR PULSE COMPRESSION OF PLASMA

V.P. Bakhtin¹, M.P. Galanin^{2,3}, A.M. Zhitlukhin¹, A.P. Lototskiy¹, A.S. Rodin^{2,3}

¹SRC RF TRINITI, Moscow, Troitsk, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In experiments with adiabatic compression of plasma by cylindrical liners the metal shells are elements of electrical circuit, therefore it is necessary to select such a profile of the liner near trailer sections, which will allow to save its tightness and electrical conductivity. For assessment of the strain-stress distribution in the shell within axisymmetric approximation the numerical modeling of the motion of some liner parts is executed. The motion of the central part of the cylindrical liner and the motion of the liner's part near the fixed trailer section, which provides the closure of the current circuit, are considered. For the description of the liner a model of elasto-plastic material for large deformations is used. The effect of the selected deformation curve on the motion characteristics is studied. A full-scale natural experiment was performed with compression of a long profiled thin-walled shell with a diameter of 90 mm by a pulsed current with an amplitude of 6 MA. Comparison of the results of natural and numerical experiments showed a satisfactory agreement between the measured and calculated radial velocity of the liner shell while maintaining the integrity of the walls of the compressed volume.

Key words: cylindrical liner, pulsed current, mathematical modelling, large deformations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-61-71

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В термоядерных экспериментах с адиабатическим сжатием плазмы открытые торцы цилиндрического лайнера используются для заполнения внутреннего объёма дейтериевой плазмой. По этим торцам от неподвижных кольцевых контактов протекают большие токи, которые в конфигурации Z-пинч достигают величины более 10 МА [1]. Цилиндрические оболочки под действием продольного тока должны сжиматься с радиальными скоростями около 4–6 км/с, сохраняя полную герметичность и электропроводность. Указанные условия требуют профилирования толщины стенки лайнера на концах сжимаемой рабочей части оболочки. При этом желательно минимизировать длину концевой части с переходным сечением, поскольку она исключена из основного процесса обжатия плазмы.

Ввиду достаточно широкого диапазона, в котором варьируется энергетика экспериментов по сжатию плазмы, а соответственно и начальные условия, величины токов и размеры, желательно иметь достаточно надёжный расчётный инструмент для проектирования узлов разгона лайнеров.

Для описания движения подобных деформируемых оболочек обычно используют модель вязкой несжимаемой жидкости на фиксированной расчётной сетке (эйлеров подход) [2]. В рамках продолжения

цикла работ, описанных в [3—5], далее рассмотрены математическая и численная модели упругопластического тела с учётом больших деформаций, реализованные на подвижной лагранжевой сетке.

Вместе с тем необходима экспериментальная проверка результатов расчётов в условиях, близких к реальному ускорению лайнера. Ранее в [6] при различной конфигурации токоподводов проведено исследование поведения полосковых лайнеров, которые условно можно рассматривать как элемент образующей поверхности цилиндрической оболочки. Определены условия сохранения целостности лайнера в месте ввода тока при разгоне пластины лайнера до скоростей порядка 1 км/с.

В представленной работе проведено сравнение результатов расчётов с данными полномасштабного эксперимента, выполненного на базе ёмкостного накопителя «ПУМА» при амплитудном значении тока разгона 6 МА. Вопрос целостности оболочки на всём протяжении цикла её сжатия оставался под контролем.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛАЙНЕРА

Рассмотрим электромагнитный ускоритель с цилиндрическим лайнером. В силу цилиндрической симметрии объекта для моделирования движения лайнера справедливо цилиндрически симметричное приближение. Область моделирования, соответствующая половине продольного сечения (схематично показана на рис. 1), включает в себя неподвижный проводник (индуктор) и ускоряемый проводник (лайнер). На данном этапе моделирования считаем, что лайнер и индуктор соединены в одну последовательную

Рис. 1. Половина продольного сечения цилиндрического ускорителя (плоскость rz)

электрическую цепь (цепь индуктора) и по ним течёт заданный полный ток I_p (в одном направлении по индуктору и в противоположном направлении по лайнеру).

Будем использовать следующие обозначения (см. рис. 1): $G = G_1 \cup G_2$ — рассматриваемая область; $G_1 = \bigcup_{k=1}^2 S_k = \{\mathbf{r} \in G : \sigma = 0\}$ — проводящая подобласть, состоящая из двух цилиндрических проводников (S_1 — лайнер, S_2 — индуктор); $G_2 = \{\mathbf{r} \in G : \sigma = 0\}$ — подобласть диэлектрика, состоящая из трёх несвязанных друг с другом подобластей G_{21} , G_{22} , G_{23} (см. рис. 1); ∂G_1 и ∂G_2 — границы G_1 и G_2 соответственно.

Для описания электромагнитных полей используем систему уравнений Максвелла в МГД-приближении [7]. В силу симметрии области, начальных и граничных условий считаем, что векторы напряжённости магнитного $\mathbf{H}$ и электрического $\mathbf{E}$ полей и вектор скорости $\mathbf{V}$ имеют следующую структуру:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= (0, H_\varphi, 0)^T; \\ \mathbf{E} &= (E_r, 0, E_z)^T; \\ \mathbf{V} &= (v_r, 0, v_z)^T. \end{aligned} \quad (1)$$

Для рассматриваемой расчётной области с учётом приближения (1) напряжённость магнитного поля в диэлектрических подобластях полностью определяется значениями токов, которые протекают через проводники:

$$H_\varphi(t) = \begin{cases} 0, & \mathbf{r} \in G_{21} \\ \frac{2I_B}{r}, & \mathbf{r} \in G_{22} \\ 0, & \mathbf{r} \in G_{23} \end{cases} \quad (2)$$

В проводниках для магнитного поля используется следующее уравнение [4]:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{4\pi\sigma} \operatorname{rot} \mathbf{H} - \operatorname{rot} [\mathbf{V} \times \mathbf{H}] = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (3)$$

В качестве граничных условий на торцах проводников поставлено условие равенства нулю производной H_ϕ по нормали (равенство нулю касательного компонента напряжённости электрического поля), а на других границах — условие непрерывности H_ϕ при переходе от диэлектрика к проводнику.

В рассматриваемом приближении ток, текущий по цепи индуктора, считаем заданной величиной.

Приведём математическую модель упругопластического тела с учётом произвольных деформаций, применённую в [3—5], для описания электромагнитного ускорения лайнера.

Уравнение движения лайнера в момент времени t , записанное в текущих лагранжевых координатах $\tilde{a}_j$ (в дальнейшем будем использовать обозначение UL-координаты), имеет следующий вид [8]:

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla_{\tilde{a}} (\mathbf{S} + \mathbf{S} \nabla_{\tilde{a}} \mathbf{u}) + \mathbf{f} \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} (\mathbf{S} + \mathbf{S} \nabla_{\tilde{a}} \mathbf{u}) \mathbf{n} |_{\Gamma_s} &= 0; \\ \mathbf{u} |_{\Gamma_u} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{u} = (u_r, u_z)$ — вектор перемещения; $\mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ — вектор скорости; $\ddot{\mathbf{u}} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$ — вектор ускорения; ρ — текущая плотность вещества; $\mathbf{f} = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}]$ — вектор силы Лоренца, действующей на тело; $\nabla_{\tilde{a}} = \frac{\partial}{\partial \tilde{a}_j} \mathbf{k}_j$ — оператор дифференцирования по UL-координатам; $\mathbf{S}$ — второй тензор напряжений Пиолы—Кирхгоффа; Γ_s — часть границы, на которой заданы силовые условия; Γ_u — часть границы, на которой заданы кинематические условия (на торцах лайнер закреплён по нормали, на других частях границы поставлено силовое устройство).

Во всех формулах подразумевается использование цилиндрических координат: $\tilde{a}_1 = r$, $\tilde{a}_2 = \phi$, $\tilde{a}_3 = z$. При вычислении градиентов и иных операторов применяется правило суммирования по повторяющимся индексам.

Отметим, что в каждый фиксированный момент времени t текущие лагранжевы координаты $\tilde{a}_i$ совпадают с эйлеровыми координатами x_i , различие между UL- и эйлеровым подходами проявляется в использовании разных определений скоростей величин (тензора деформации, тензора напряжений и т.д.).

Основные соотношения теории пластического течения для случая больших деформаций сформулированы следующим образом:

— тензор скорости деформации $\mathbf{d}$ можно представить в виде суммы упругой $\mathbf{d}^e$ и пластической $\mathbf{d}^p$ составляющих

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}^e + \mathbf{d}^p; \quad (6)$$

— определяющее соотношение задано формулой

$$\boldsymbol{\sigma}^{\text{Tr}} = \mathbf{C}^E : \mathbf{d}^e = \mathbf{C}^E : (\mathbf{d} - \mathbf{d}^p); \quad (7)$$

— пластическая составляющая тензора скорости деформации определяется по ассоциативному закону пластического течения

$$\mathbf{d}^p = \lambda \frac{\partial f_y}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \lambda \boldsymbol{\sigma}'. \quad (8)$$

Здесь $\mathbf{C}^E$ — стандартный тензор коэффициентов упругости; λ — параметр модели, аналогичный множителю Лагранжа; $\boldsymbol{\sigma}'$ — девиатор тензора напряжений Коши; $\boldsymbol{\sigma}^{\text{Tr}}$ — производная Трусделла тензора напряжений; f_y — функция текучести Мизеса.

Более подробная использованная модель упругопластического тела описана в [8].

ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Численная модель для расчёта электромагнитных величин получена после применения к уравнению (3) метода Галеркина [4].

Численная модель для упругопластического лайнера основана на применении принципа возможных перемещений к уравнению движения (4). Использован смешанный метод конечных элементов (МКЭ) [9], в

котором в качестве независимых переменных выступают перемещения и давления. Под давлением понимается шаровая часть тензора напряжений $S_{ii}/3$. Для аппроксимации перемещений применялись линейные базисные функции, для аппроксимации давлений — кусочно-постоянные в пределах ячейки сетки базисные функции. Смешанный метод позволяет получать более точные результаты по сравнению со стандартным МКЭ при моделировании слабосжимаемых материалов, в том числе для случая больших деформаций.

В расчётах в качестве параметров материала лайнера применялись следующие характеристики алюминия (Al): плотность $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 70,5 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,31$. Для моделирования пластических свойств Al использована модель упругопластического тела с линейным упрочнением, для которой предел текучести задан формулой [10]

$$\sigma_y = \sigma_{0y} + E_p \bar{\epsilon}^p,$$

где σ_{0y} — начальный предел текучести; E_p — модуль пластичности, который задаёт наклон кривой деформирования в зоне пластичности; $\bar{\epsilon}^p$ — эффективная пластическая деформация.

Поскольку в случае динамического нагружения материала его прочностные характеристики повышаются по сравнению со случаем стационарного нагружения, то выбрано значение $\sigma_{0y} = 60 \text{ МПа}$, модуль пластичности варьировался в различных расчётах в широком диапазоне.

В расчётах физические характеристики материала принимались постоянными. В дальнейшем планируется включить в модель уравнение теплопроводности и учитывать зависимость свойств материала от температуры.

В тестовых расчётах ток, текущий по проводникам, задавался формулой $I_p = I_0 \sin \omega t$ с амплитудой $I_0 = 4 \text{ МА}$ и полупериодом, равным 50 мкс. Для сравнения с экспериментом ток задавался в виде ломаной, аппроксимирующей полученную в эксперименте осциллограмму.

Поскольку магнитное поле в диэлектрике задано формулой (2), то сетка строилась только в лайнере (использовалась прямоугольная сетка). Характерный шаг по времени $\tau = 0,2 \text{ мкс}$, характерный шаг пространственной сетки $h = 0,2 \text{ мм}$.

Все расчёты проводились до момента времени, при котором минимальный радиус внутренней поверхности лайнера достигал 5 мм.

Сначала рассмотрено движение центральной части лайнера. Расчётная область представляла собой половину участка продольного сечения цилиндрической оболочки с внутренним радиусом $R_0 = 48,4 \text{ мм}$ и постоянной толщиной $\Delta R_0 = 1,6 \text{ мм}$. Высота участка равна $L = 3 \text{ мм}$. На торцах расчётной области перемещение по нормали равно нулю (торцы закреплены), на боковых поверхностях лайнера выполнено условие свободной границы, лайнер движется под действием объёмной силы Лоренца. Для данной постановки задачи концевые зоны не входят в расчётную область, все величины фактически оказываются зависящими только от одной пространственной переменной r .

Выполнено исследование зависимости интегральных параметров движения оболочки от выбранной кривой деформирования. На рис. 2, а показаны графики зависимости от времени скорости центра масс

Рис. 2. Графики интегральных параметров для различных кривых деформирования: а — скорость лайнера: — $V_r \sigma_{y0} = 60, E_p = 0$; Δ — $V_r \sigma_{y0} = 60, E_p = 100$; $\square$ — $V_r \sigma_{y0} = 60, E_p = 500$; $\diamond$ — $V_r \sigma_{y0} = 60, E_p = 1000$; б — толщина лайнера: $\circ$ — $\Delta R \sigma_{y0} = 60, E_p = 0$; Δ — $\Delta R \sigma_{y0} = 60, E_p = 100$; $\square$ — $\Delta R \sigma_{y0} = 60, E_p = 500$; $\diamond$ — $\Delta R \sigma_{y0} = 60, E_p = 1000$

лайнера, на рис. 2, б — графики зависимости от времени толщины оболочки для вариантов расчётов, в которых модуль пластичности принимал значения $E_p = 0, 100, 500, 1000$ МПа.

Здесь и далее на представленных графиках скорость нормирована на величину 100 м/с, координаты лайнера r, z — на величину 1 мм, время — на величину 1 мкс, давление — на величину 1 МПа.

Из представленных графиков видно, что в расчёте с идеальным упругопластическим материалом ($E_p = 0$) лайнер двигался быстрее всего (скорость центра масс в конце расчёта составляла величину около 1400 м/с), при этом его толщина увеличилась более чем в 5 раз (с 1,6 до 8,3 мм). Увеличение модуля пластичности приводит к увеличению зоны упругости, следовательно, к увеличению роли внутренних упругих сил, которые противодействуют процессу сжатия лайнера и замедляют его движение, поэтому для расчёта с $E_p = 500$ МПа максимальная (по модулю) скорость центра масс составила величину около 1200 м/с, для расчёта с $E_p = 1000$ МПа — 960 м/с, при этом толщина лайнера увеличилась в 3 раза (с 1,6 до 4,8 мм). Для расчётов с $E_p \geq 500$ МПа ближе к концу расчётов сила упругой реакции материала начинала превышать силу Лоренца, поэтому ускорение тела меняло знак.

Выполнено моделирование движения лайнера вблизи опоры, расположенной в концевой части устройства. Расчётная область, соответствующая участку половины продольного сечения цилиндрической оболочки, показана на рис. 3. Для предотвращения обрыва оболочки ближе к опоре толщина лайнера увеличивается от значения $\Delta R_0 = 1,6$ мм до величины $\Delta R_1 = 3\Delta R_0$. Увеличение толщины происходит на участке длиной $\Delta Z_1 = 40$ мм, длина расчётной области равна 100 мм (удвоенный внешний радиус), высота участка опоры 10 мм.

На рис. 4, а показано распределение радиальной скорости в лайнере в конце расчёта, в котором изменение толщины в начальном профиле происходило по линейному закону, на рис. 4, б — аналогичное распределение, полученное в расчёте, в котором изменение толщины в начальном профиле происходило по дуге окружности (в этом случае производная толщины лайнера по z тоже является непрерывной). В расчётах использована модель идеального упругопластического материала ($E_p = 0$).

Рис. 3. Расчётная область для участка лайнера вблизи опоры

Рис. 4. Распределение радиальной скорости: а — линейное изменение толщины оболочки ($t = 75,8$ мкс); б — гладкое изменение толщины оболочки ($t = 76,5$ мкс)

На рисунках горизонтальной чертой обозначено положение опоры. Для моделирования контакта с опорой использовалось условие прилипания.

Сравнение рис. 4, а и 4, б показывает, что при изменении толщины в начальном профиле лайнера линейным образом на участке утолщения возникали значительные неоднородности. В расчётах, для ко-

торых изменение толщины происходило гладким образом, возникающие неоднородности носили более умеренный характер.

На рис. 5, *а* показано распределение осевого компонента скорости в конце расчёта с гладким изменением толщины в начальном профиле, на рис. 5, *б* — распределение компонента тензора логарифмической деформации (тензора Генки [10]), который характеризует растяжение лайнера в продольном направлении. На рисунках видно, что в отличие от расчётов движения центральной части лайнера при моделировании концевых элементов наблюдаются значительные продольные скорости течения вещества, которые приводят к существенному продольному растяжению образующей изначального цилиндра и к формированию конусообразных воронок, показанных на рис. 4, 5.

Рис. 5. Распределение величин в лайнере ($E_p = 0$, $t = 76,5$ мкс): *а* — осевой компонент скорости; *б* — компонент тензора логарифмической деформации

На рис. 6 показаны распределения давления в лайнере в конце расчётов для модели идеального упругопластического материала ($E_p = 0$) и модели материала с значительным упрочнением ($E_p = 1000$). Так как под давлением понимается шаровая часть тензора напряжений $S_{ii}/3$, то давление имеет отрицательный знак в области, в которой действуют сжимающие силы, и положительный знак в области с растягивающими силами. Сравнение результатов двух расчётов показало, что в материале с $E_p = 1000$ возникают значительно большие упругие деформации и давления. Это приводит к тому, что в зоне начала утолщения оболочки неоднородность развивается сильнее: выделяется участок лайнера, который двигается с существенным опережением центральной части.

Рис. 6. Распределение давления в лайнере: *а* — $E_p = 0$ ($t = 76,5$ мкс); *б* — $E_p = 1000$ ($t = 80,7$ мкс)

Более подробное описание результатов расчётов для различных кривых деформирования упруго-пластического лайнера дано в [11].

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАЗГОНУ ПРОФИЛИРОВАННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Выполнено сравнение результатов расчётов с данными экспериментов, проведённых в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Цилиндрическая алюминиевая оболочка диаметром 90 мм показана на рис. 7. В основной (средней) части толщина её стенки составляла 1,3 мм.

Концевые части выполнены с увеличением толщины стенки до 4 мм и имели специальную конфигурацию для надёжного присоединения к выводам коллектора источника токовых импульсов. В этом качестве использована конденсаторная батарея «ПУМА», ранее описанная в работе [12].

Схема эксперимента и расположение элементов диагностики показаны на рис. 8. Диагностический зонд, показанный на виде А, включал три датчика:

Рис. 7. Металлическая оболочка для экспериментов по импульсному сжатию

Рис. 8. Схема эксперимента для исследования сжатия металлической оболочки: 1 — лампа-вспышка; 2 — поворотное зеркало; 3 — металлическая оболочка; 4 — изоляция; 5 — обратный токопровод; 6 — соленоид начального магнитного поля; 7 — фоторегистратор ВФУ; D1 и D2 — датчики давления; М — магнитный зонд

магнитный зонд М и два пьезоэлектрических датчика давления D1 и D2. Магнитный зонд снабжён интегрирующей цепочкой, датчики давления с дисками ЦТС-19 откалиброваны. Датчики помещены в керамическую трубку и залиты герметиком ВГО. Воспринимающая плоскость датчика D1 покрыта тонким слоем эпоксидной смолы, открыта и перпендикулярна радиусу оболочки. Датчик D2 полностью закрыт. На рис. 9 показан общий вид системы перед экспериментом. Узел сжатия оболочки помещён в камеру.

Токовая конфигурация устройства — коаксиальный токопровод, внутренней поверхностью которого являлась исследуемая оболочка. На наружной стороне коаксиальной системы размещена соленоидальная обмотка, создающая слабое продольное магнитное поле, регистрируемое при сжатии поля магнитным зондом, располагаемым

Рис. 9. Общий вид системы, присоединённой к коллектору установки «ПУМА» перед экспериментом

Рис. 10. Характерная осциллограмма ускоряющего тока и напряжения на токоподводящих выводах коллектора источника питания: — ток; — напряжение; --- расчётный ток

Рис. 11. Фрагмент фотоплёнки, отснятой на ВФУ

Рис. 12. Осциллограммы магнитного зонда (—, датчик М) и датчиков давления (....., датчик D1, ---, датчик D2) в опыте по сжатию оболочки

Рис. 13. Изменение радиуса внутренней поверхности лайнера

по оси (см. рис. 8). Показаны осветитель, просвечивающий отверстие оболочки, и приёмник изображения — сверхскоростной фоторегистратор ВФУ, щель которого расположена в диаметральной направленности отверстия оболочки. Поворотные зеркала использованы для предохранения осветителя и фоторегистратора от повреждения осколками оболочки после пуска.

Осциллограммы разрядного тока через оболочку и напряжения на коллекторе установки показаны на рис. 10 при начальном напряжении 28 кВ на батарее «ПУМА» ёмкостью 3 мФ.

На рис. 11 показана фоторазвёртка светового пучка в диаметральной щели регистратора ВФУ. Она позволяет определить перемещение и скорость внутренней границы металлической оболочки во времени до удара по телу диагностического зонда. Отсутствие засветки в осевой зоне соответствует размещению диагностического зонда, показанного на рис. 8.

Для проверочного контроля данных использовались показания магнитного зонда при начальном значении квазистационарного поля внутри оболочки 14 кЭ. Соответствующие осциллограммы сигналов измерительных датчиков показаны на рис. 12 (магнитное поле).

Показания пьезоэлектрических датчиков давления D1 и D2 демонстрируют картину поведения газодинамического давления, не имеющую отношения к электродинамике оболочки.

Для моделирования описанного эксперимента проведены расчёты с применением модели идеального упругопластического лайнера ($E_p = 0$). В расчётах использованы зависимость тока, представленная на рис. 10, и реальные геометрические размеры лайнера (по оси рассмотрен участок высотой 10 см). Начальное магнитное поле, создаваемое соленоидальной обмоткой, при разгоне оболочки не учитывалось.

На рис. 13 представлены графики зависимости от времени (по оси абсцисс, мкс) минимального радиуса точек, расположенных на внутренней поверхности лайнера (по оси ординат, мм). Сплошной линией показаны результаты расчёта (моделировалось движение центральной части лайнера (одномерный расчёт)), маркерами отмечены экспериментальные данные. Для начального промежутка времени (0 — 24 мкс) расчётная кривая изменения радиуса внутренней поверхности лайнера (не показанная на рисунке) плавно снижается от значения 43,7 до 29 мм.

В эксперименте использованы два способа измерения положения внутренней поверхности лайнера: результаты обработки высокоскоростной съёмки (маркеры — прямоугольники) и результаты обработки осциллограммы магнитного зонда (маркеры — треугольники).

На рисунке видно, что расчётная кривая достаточно хорошо коррелирует с данными натурных экспериментов до момента времени 37 мкс. Потом значения радиуса, полученные после обработки высокоскоростной съёмки, начинают убывать быстрее, чем два других графика. Это может быть связано с тем, что, как видно на рис. 12, после 35 мкс происходит рост величины сжимаемого магнитного поля. Это может приводить к испарению части вещества лайнера на внутренней поверхности, изменяющего видимую границу. Второй фактор расхождения данных — это игнорирование в расчёте теплофизического состояния вещества оболочки, изменяющего её механические свойства. На 38-й мкс процесса лайнер разрушает трубку с датчиками.

Обратим внимание на поведение лайнера вблизи концевых зон оболочки. Отметим важное обстоятельство: фоторегистратор не показывает посторонних засветок на всём протяжении процесса сжатия. Это говорит о целостности оболочки, так как в противном случае нарушение контакта в цепи с большими токами не могло бы остаться незамеченным. Но при обратном разлёте оболочки под действием давления сжатого магнитного поля происходит отрыв торцевых частей лайнера от центрального участка. При скорости цилиндрической оболочки около 1,5 км/с подобный отрыв неизбежен, но в расчётах этап торможения и разрушения пока не учтён. На рис. 14, *а* показан фрагмент оторвавшегося торцевого участка лайнера после срабатывания, на рис. 14, *б* показана форма лайнера вблизи закрепления, полученная из расчётов в конце его ускорения (40-я мкс). Для большего удобства восприятия результаты осесимметричного расчёта развёрнуты в трёхмерную картину с помощью графического редактора платформы Теметос [13]. Можно заметить качественное сходство показанных фрагментов. Следует отметить, что и в эксперименте, и в расчётах желаемый результат — сохранение целостности сжимаемого объекта получен при относительно небольшом сокращении рабочей длины устройства. Подтверждено, что переходная часть сжимаемой оболочки к токоподводу может иметь длину, не превышающую её начальный радиус.

Рис. 14. Фрагмент торцевого участка цилиндрической оболочки: *а* — эксперимент (после запуска); *б* — расчёт (этап ускорения)

Таким образом, проведённое сравнение экспериментальных и расчётных результатов, выполненных для среднего однородно сжимаемого участка, показывает адекватность использованной математической и численной модели. Поэтому в концевой области, для которой экспериментальная визуализация реальной динамики затруднена, можно с достаточной надёжностью опираться на проведённые расчёты.

Таким образом, описанные математические и численные модели позволяют достаточно адекватно описать этап ускорения цилиндрического лайнера электромагнитным полем. Следует отметить, что и в эксперименте, и в расчётах желаемый результат — сохранение целостности сжимаемого объекта получен при относительно небольшом сокращении рабочей длины устройства. Подтверждено, что переходная часть сжимаемой оболочки к токоподводу может иметь длину, не превышающую её начальный радиус.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Для описания деформирования металлической оболочки выбрана математическая модель упруго-пластического тела для произвольных деформаций, для её численной реализации использован смешанный МКЭ.

Выполнена серия расчётов для моделирования движения центральной части цилиндрического лайнера. Поскольку в подобных устройствах лайнер должен сохранять полную герметичность и электропроводность, то основная серия расчётов ориентирована на моделирование движения лайнера вблизи профилированных и закреплённых концевых участков. Выполнено сравнение интегральных характеристик (скорость центра масс лайнера, изменение его толщины и т.д.) и профилей лайнера, полученных при использовании модели упругопластического лайнера с различными кривыми деформирования.

Натурные эксперименты по разгону длинной цилиндрической оболочки токами до 6 МА показали удовлетворительное совпадение измеренной и расчётной радиальной скорости оболочки лайнера при сохранении целостности стенок сжимаемого объёма.

Попутно замерено газодинамическое давление внутри сходящейся оболочки и в малом замкнутом защищённом трубчатом объёме датчиков. Данные измерений, не имея прямого отношения к обозначенной теме статьи, имеют прямое отношение к конечной цели работы — обжатию чистой дейтериевой плазмы. Из показаний датчиков видно, что оба датчика D1 и D2 разрушаются на 37-й мкс процесса, когда оболочка лайнера падает на защитную керамическую трубку. При этом датчик D1, открытый в полость лайнера, за 15—18 мкс до этого момента начинает регистрировать увеличение давления. В этот момент времени лайнер имеет внутренний радиус, превышающий половину его начальной величины. Явление «запыления» внутреннего объёма известно, ему посвящён ряд работ, в том числе [14, 15]. Вопрос защиты от такого загрязнения сжимаемой плазмы является чрезвычайно актуальным, требующим разработки и применения соответствующих и пока не известных технологий обработки поверхностей.

Неустойчивости, приводящие к нарушению аксиальной симметрии сжимаемой цилиндрической оболочки и её внутренней границы, в данной работе не рассматривались. Учёт подобных неустойчивостей может потребоваться при решении полной задачи о сжатии оболочкой исследуемых объектов воздействия (магнитного поля и плазмы).

REFERENCES

1. **Degnan J.H. et al.** — In: Proc. of Intern. Conf. Megagauss 2012. Maui, HI, USA, 14—19 October 2012. — Sarov, 2014, pp. 156—164.
2. **Buyko A.M., Garanin S.F., Zmushko V.V.** — In coll.: International conference «XIV Khariton scientific readings». Collection of reports. Sarov, FSUE «RFNC — All-Russian RIEPh», 2013, pp. 257—264 (in Russian).
3. **Galanin M.P., Lototskiy A.P., Rodin A.S., Shcheglov I.A.** Liner motion in transverse cross-section of magnetic compressor. — Vestnik N.E. Bauman MGTU. Ser. «Estestvennye nauki» (Herald of N.E. Bauman MSTU. Ser. «Natural sciences»), 2010, № 2, pp. 65—84 (in Russian).
4. **Galanin M.P., Krylov M.K., Lototskiy A.P., Rodin A.S.** — Preprint of M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics № 103, 2015. 31 p. (in Russian).
5. **Galanin M.P., Lototskiy A.P., Rodin A.S.** Solution of integro-differential equation, describing the eletromagnetic field distribution in a magnetic compressor. — Differentsial'nye uravneniya (Differential equations), 2016, vol. 52, № 7, pp 927—936 (in Russian).
6. **Grabovskiy E.V. et al.** Electrodynamic acceleration of thin plates at high current densities. — Radiotekhnika i elektronika (Radio engineering and electronics), 2017, vol. 62, № 10, pp. 937—944 (in Russian).
7. **Galanin M.P., Popov Yu.P.** Quasi-stationary electromagnetic fields in nonhomogeneous media. Mathematical simulation. — M.: Nauka (Science). Fizmatlit (PhysMathLit), 1995. 320 p. (in Russian).
8. **Korobeynikov S.N.** Nonlinear deformation of solids. — Novosibirsk: Pub.house of SB RAS, 2000. 262 p. (in Russian).
9. **Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.** The Finite Element Method. Volume 1. The Basis. — Butterworth Heinemann, 2000. 707 p.
10. **Kojic M., Bathe K.-J.** Inelastic Analysis of Solids and Structures. — New-York: Springer-Verlag, 2005. 414 p.
11. **Bakhtin V.P. et al.** Comparison of different mathematical and numerical models for cylindrical liner motion and their check.: Preprint of M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics № 141, 2018. 36 p. (in Russian).

12. **Grabovskiy E.V. et al.** Operation of a magnetic pulse compressor with electrodynamic acceleration of a liner. — ZhTF (JTPH), 2014, vol. 54, № 7, pp. 126—135 (in Russian).
13. **Galanin M.P. et al.** — Preprint of M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics № 99, 2013. 23 p. (in Russian).
14. **Sorenson D.S.** Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals. — J. of Applied Physics, 2002, vol. 92, № 10, pp. 5830—5836.
15. **Ogorodnikov V.A. et al.** Modeling jet flows caused by the incidence of a shock wave on a profiled free surface. — Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika (Applied Mechanics and Technical Physics), 2007, vol. 48, № 1, pp. 16—23 (in Russian).

AUTHORS

Bakhtin V.P. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Galanin M.P. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia; N.E. Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; galan@keldysh.ru

Zhitlukhin A.M. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Lototskiy A.P. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia

Rodin A.S. M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq. 4, 125047 Moscow, Russia; N.E. Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; rals@bk.ru

Received 13 September 2019

Revised 29 September 2019

Accepted 30 September 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 4, pp. 61—71