

УДК 537.84

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ИМПЛОЗИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЛАЙНЕРОВ

А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, В. В. Змушко, В. М. Калашников,
В. Н. Мохов, Н. В. Соколова, В. Б. Якубов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров
E-mail: sfgar@vniief.ru

Представлены различные варианты постановки экспериментов на установке “Атлас” для исследования физики лайнеров и определения оптимальных условий их устойчивого движения. Один из вариантов постановки сводится к тому, чтобы по сравнению с экспериментами серии LD (Liner Demonstration), в которых наблюдалось неустойчивое движение лайнеров, уменьшить начальный радиус лайнера, не меняя его массу, что согласно двумерным расчетам должно привести к более устойчивому движению лайнера при сохранении его скорости. Предлагается также провести эксперимент, в котором на наружной поверхности лайнера создаются периодические возмущения с определенной длиной волны при одновременном увеличении его толщины. Согласно расчетам в этом случае рост хаотических возмущений несколько стабилизируется при сохранении скорости лайнера.

Ключевые слова: имплозия конденсированных лайнеров, неустойчивость Рэля — Тейлора, двумерные магнитогидродинамические расчеты.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия широкое развитие получили теоретические и экспериментальные исследования физики высоких плотностей энергии. Использование конденсированных лайнеров, разгоняемых с помощью мощных импульсных установок в Z-пинч-геометрии, является важным направлением этих исследований [1–4]. Такие лайнеры применяются в экспериментах по измерению ударных адиабат конденсированных материалов [2, 3]; при исследовании изоэнтропического сжатия веществ; при исследовании динамических прочностных характеристик различных материалов на основе измерения амплитуды возмущений в разгоняемых лайнерах [4]; при моделировании работы различных устройств и их фрагментов при высоких скоростях и давлениях; при изучении гравитационного турбулентного перемешивания ускоряемых веществ с различной плотностью на границе их раздела.

Конденсированные лайнеры, разгоняемые мощными импульсными установками, используются также для сжатия плазмы с целью ее зажигания или создания мощных источников излучения в рамках концепции МАГО/МТФ [5, 6].

При использовании конденсированных лайнеров для проведения перечисленных исследований необходимо достижение высоких плотностей энергии, что в свою очередь требует

Работа выполнена в рамках контракта между Лос-Аламосской национальной лабораторией (США) и Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (№ 37713-000-02-35, Task Order 017).

достижения скоростей конденсированных лайнеров порядка 1 см/мкс и выше. Для достижения таких скоростей используются магнитные поля мегагауссного диапазона, что приводит к плавлению или даже к испарению и переходу в плазму части лайнера (скин-слоя) [7] и соответственно к потере ее прочности. В результате в этой части лайнера создаются условия для развития неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости. Развиваясь, эти неустойчивости могут привести к возникновению неоднородного состояния лайнера, что ухудшает условия его использования, а иногда приводит к его разрушению.

Для оценки условий неразрушаемости разгоняемых жидких или газовых оболочек в условиях развития неустойчивости Рэлея — Тейлора существует простой, хотя и несколько грубый критерий, представляющий собой отношение расстояния, пройденного оболочкой, к ее толщине. Достаточно трудно разогнать оболочку, так чтобы она проходила расстояние, превышающее 10 ее толщин. При сохранении прочности у части оболочки при разгоне лайнера магнитным полем этот критерий не работает. В этом случае возможен разгон оболочки на расстоянии, превышающем 10 ее толщин. Однако при этом рост возмущений будет определяться сложной динамикой потери прочности у части оболочки в зависимости от развития неустойчивости, поскольку в зоне неоднородности джоулево тепло-выделение может возрастать (при этом объем оболочки, потерявшей прочность, может не соответствовать полученному в одномерных расчетах). В результате предсказать, каким образом будут развиваться неустойчивости при движении лайнера, достаточно сложно.

Даже при близких условиях разгона лайнеров динамика развития неустойчивости Рэлея — Тейлора может существенно различаться. Так, в близких по условиям лайнерных экспериментах, проведенных на установке “Shiva-Star” в Военно-воздушной исследовательской лаборатории США и на установке “Атлас” в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США), получены рентгенограммы лайнеров, свидетельствующие о существенном различии развития неустойчивости [4, 8]. В опытах серий NTLX (Near Term Liner Experiments) на “Shiva-Star” и HF (Hydro-Features) на “Атласе” на рентгенограммах зафиксировано умеренное или слабое развитие неустойчивости, а в экспериментах серии LD (Liner Demonstration) на “Атласе” — существенное развитие неустойчивости.

Изучение неустойчивости лайнеров в рассматриваемых экспериментах с помощью двумерных расчетов и оценок [4, 8, 9] показало, что теоретическое объяснение различного поведения лайнеров в данных опытах является трудной задачей и даже малое различие постановок задачи может оказать существенное влияние на результаты расчетов. Тем не менее в [9] с помощью прямых двумерных численных магнитогидродинамических (МГД) расчетов роста возмущений показано, что условия экспериментов HF и NTLX приводят к меньшему росту возмущений, чем условия экспериментов LD, если этот рост определять по степени развития возмущения внутренней поверхности. Сравнение расчетной формы наружной поверхности для экспериментов HF и LD показывает, что в расчетах, так же как в экспериментах, лайнер HF остается слабо деформированным, а лайнер LD оказывается сильно деформированным. На рис. 1 приведены результаты расчетов лайнеров, полученные в [9]. В экспериментах LD и NTLX формы наружной поверхности лайнеров даже при использовании максимально мелкой сетки остаются качественно подобными и достаточно сильно возмущенными. Таким образом, вопрос об устойчивости движения конденсированных лайнеров требует дальнейшего изучения.

Цель настоящей работы — изучение возможных постановок экспериментов на установке “Атлас” для исследования физики схлопывающихся лайнеров. Для изучения развития неустойчивостей предлагается три постановки экспериментов, в которых с расчетно-теоретической точки зрения возможно более устойчивое движение лайнеров. Если результаты эксперимента подтвердят теоретические предсказания о большей устойчивости лай-

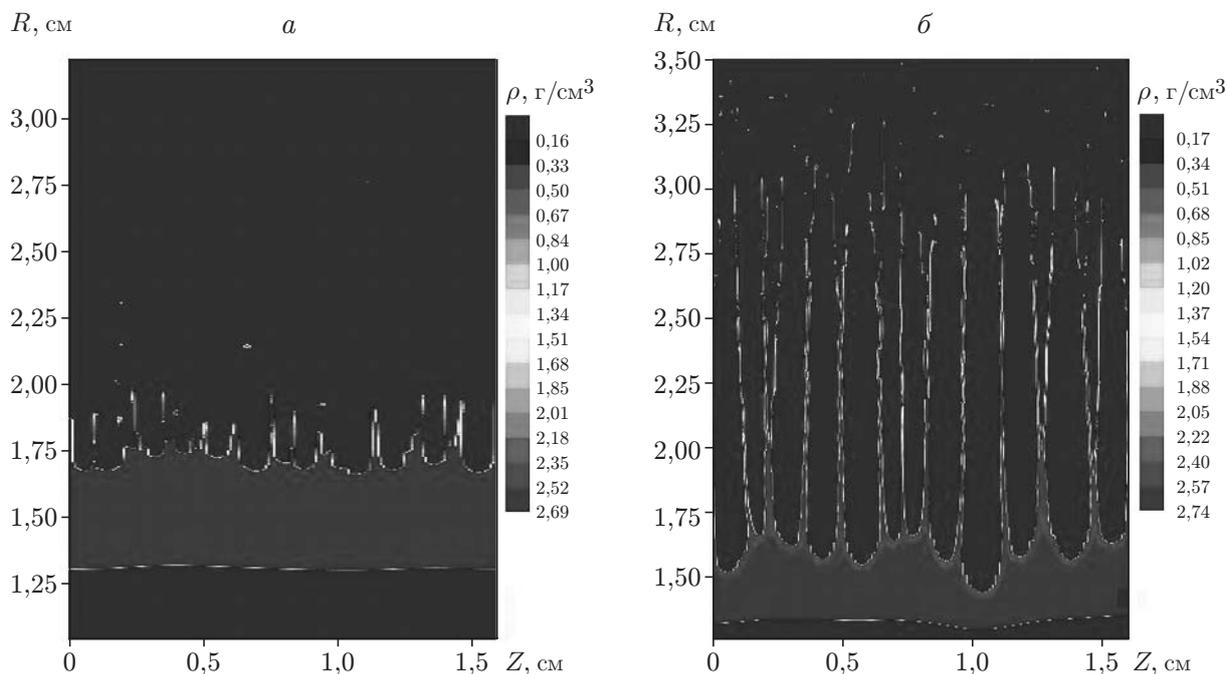


Рис. 1. Изолинии плотности лайнера, полученные в расчетах HF (а) и LD (б) для момента времени, соответствующего положению внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 1,3$ см

нерной имплозии для этих условий, это будет означать, во-первых, что указанные предположения и расчетно-теоретические модели являются правильными, а во-вторых, что предлагаемые методы являются эффективными для борьбы с неустойчивостями.

Первый вариант постановки задачи сводится к тому, чтобы по сравнению с экспериментами серии LD, в которых наблюдалось неустойчивое движение лайнеров, уменьшить начальный радиус лайнера R (с 5 до 3 см), не меняя его массу. Расчеты показывают, что при этом возможно получение таких же скоростей лайнера, как и в экспериментах серии LD, при том же радиусе измерительного узла, равном 1 см. Однако, поскольку в этом случае аспектное отношение R/δ (δ — толщина лайнера) значительно уменьшится (уменьшится количество толщин, проходимых лайнером), можно ожидать более устойчивого движения лайнера. Для подтверждения этих предположений требовалось провести прямые двумерные численные расчеты разгона лайнеров с учетом роста возмущений.

Второй вариант постановки заключается в том, чтобы создать на наружной поверхности лайнера периодические возмущения с определенной длиной волны, так чтобы за время разгона возмущения не успевали разрушить лайнер, но могли эффективно подавлять рост хаотических возмущений. Имеется ряд экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что крупномасштабные нарастающие возмущения могут подавлять рост хаотических возмущений меньшего масштаба. Например, в экспериментах по изучению неустойчивости Рэлея — Тейлора наблюдаемая поверхность пузырей [10, 11], как правило, остается достаточно гладкой, и на ней отсутствуют видимые возмущения, несмотря на то что в соответствии с критериями развития указанной неустойчивости она должна быть неустойчивой. Вторым примером может служить увеличение амплитуды периодических возмущений в лайнерах [12] до очень больших значений (значительно превышающих длину волны и сравнимых с толщиной лайнера) без существенных искажений, вызванных хаотическими возмущениями. О возможности подавления роста мелкомасштабных возмущений крупно-

масштабными может свидетельствовать то обстоятельство, что в отличие от покоящейся жидкости наличие растущих возмущений приводит к возникновению сдвига скорости и как следствие к “растягиванию” мелкомасштабных возмущений и ослаблению их роста.

Третий вариант постановки экспериментов основан на использовании эффекта магнитной стабилизации. Эффект стабилизации неустойчивости Рэля — Тейлора при магнитном разгоне лайнера, обусловленный максвелловским натяжением магнитных силовых линий, теоретически предсказан в [13] с учетом результатов работы [14]. Экспериментально существование этого эффекта было подтверждено в лайнерном эксперименте на установке “Pegasus-2” [15]. Рассматриваемая стабилизация имеет ярко выраженную анизотропию. Если направление канавок, выполненных резцом при обработке поверхности лайнера, совпадает с направлением магнитного поля, то эффект стабилизации отсутствует. Если направление канавок перпендикулярно направлению магнитного поля, то наличие указанного эффекта обуславливает максимальное снижение скорости роста возмущений (вплоть до нуля для коротковолновых возмущений с длинами волн $\lambda < 4\pi\delta$). В общем случае, когда направление канавок образует с направлением магнитного поля угол θ , условие устойчивости определяется формулой $\lambda < 4\pi\delta \sin^2 \theta$ [14].

При обычной токарной обработке поверхностей лайнера канавки имеют вид цилиндрической спирали, но с шагом, практически равным нулю, что соответствует практически нулевому значению угла θ , т. е. отсутствию эффекта магнитной стабилизации. Отметим, что в эксперименте [15] угол наклона нанесенных канавок равен $\theta = 45^\circ$. Возникает вопрос: можно ли процесс окончательной обработки наружной поверхности лайнера изменить таким образом, чтобы канавки имели не азимутальное направление ($\theta = 0^\circ$), а направление с углом θ порядка 45° (канавки в виде цилиндрической спирали с шагом порядка диаметра лайнера) или с углом $\theta = 90^\circ$ (канавки вдоль оси z)? Если технологически это возможно, то представляет интерес проведение эксперимента с таким лайнером.

1. ВЛИЯНИЕ АСПЕКТНОГО ОТНОШЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛАЙНЕРА

1.1. Результаты одномерных расчетов. Исследуем возможность уменьшения начального радиуса лайнера при сохранении его массы, высоты (4 см) и скорости на приемном радиусе (равном 1 см) в экспериментах серии LD. В этих экспериментах использовались цилиндрические лайнеры (начальный радиус 5 см, толщина лайнера 0,13 см), которые разгонялись азимутальным магнитным полем, создаваемым зависящими от времени токами генераторов в Z-пинч-геометрии. В разных опытах этой серии формы кривых тока различались незначительно (типичная кривая 1 на рис. 2).

Предлагается уменьшить (по сравнению с экспериментами серии LD) начальный радиус лайнера до значения, равного 3 см. Тогда при сохранении массы лайнера его толщина будет равна $\delta = 0,23$ см. Одномерное численное моделирование имплозии лайнера с такими начальным радиусом и толщиной (далее этот эксперимент будем называть LDR) проводилось с использованием программы [7] с уравнением состояния и проводимостью алюминия, взятыми из работы [16].

Система МГД-уравнений в переменных (r, z) для магнитного поля с одной азимутальной компонентой в лагранжевой системе координат имеет вид

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0,$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p - \frac{1}{8\pi r^2} \nabla (Br)^2 + \operatorname{div} S,$$

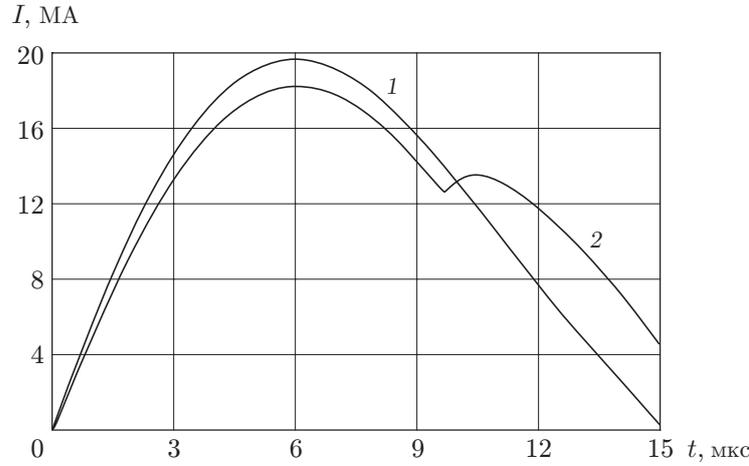


Рис. 2. Форма кривых тока для эксперимента LD (1) и LDR (2)

$$\rho \left(\frac{de}{dt} + p \frac{d(1/\rho)}{dt} \right) = \left(\frac{c}{4\pi} \right)^2 \frac{(\nabla(Br))^2}{\sigma} + S_p(SD),$$

$$\rho \frac{d(B/\rho r)}{dt} = \operatorname{div} \left(\frac{c^2}{4\pi\sigma r^2} \nabla(Br) \right),$$

где c — скорость света; ρ , e , p — плотность, внутренняя энергия и давление; \mathbf{v} — скорость; B — магнитное поле; σ — проводимость; S — девиатор тензора напряжений; D — тензор скоростей деформации; $S_p(SD)$ — первый инвариант тензора SD .

В расчетах ставились следующие граничные условия: на боковых поверхностях лайнера — условие жестких гладких стенок $v_z = 0$, $\partial B/\partial z = 0$; на внешней границе лайнера — условие свободной границы и значение тока: $p = 0$, $B = 2I/(cr)$; на оси — условие равенства нулю радиальной компоненты скорости и магнитного поля: $v_r = 0$, $B = 0$.

Считалось, что в начальный момент времени магнитное поле в лайнере равно нулю, а сам лайнер покоится ($\mathbf{v} = 0$). Температура лайнера равна комнатной $T = 293$ К, нормальная плотность $\rho = 2,7$ г/см³.

В одномерном случае, когда $v_z = 0$, а все величины зависят только от r , в приведенной выше системе уравнений $\nabla = \partial/\partial r$, $\operatorname{div} = (1/r)(\partial/\partial r)r$. Эффекты прочности не учитывались.

Одномерные расчеты проводились с помощью программы [7], в которой применялось расщепление по процессам. При расчете гидродинамических уравнений использовались явные схемы, при расчете магнитной диффузии — неявные, с потоковой прогонкой.

Двумерные расчеты проводились с помощью программы “МИМОЗА” [17, 18]. Двумерные уравнения решались в два этапа (лагранжев и эйлеров). На лагранжевом этапе узлы разностной сетки считались “вмороженными” в вещество и перемещались вместе с ним. На эйлеровом этапе выполнялся пересчет величин с лагранжевой сетки на эйлерову. Алгоритм основан на расщеплении по направлениям с использованием одномерного алгоритма второго порядка точности.

Использованное в расчетах уравнение состояния имеет аналитическую форму. В этом уравнении давление p и удельная внутренняя энергия e представляет собой сумму трех слагаемых, зависящих от температуры T и плотности ρ : “холодной”, или упругой составляющей (зависящей от конденсированной плотности, скорости звука и энергии сублимации); “горячей” составляющей (определяющей уравнение состояния для высоких температур или малых плотностей), совпадающей с уравнением состояния Саха для

многократно ионизованной плазмы [19]; и “решеточной” составляющей, имеющей вид $e_3 \sim p_3/\rho \sim T^\alpha/\rho^\beta$, где $\alpha < 1$; $\beta < 0$ (это слагаемое дает вклад в теплоемкость конденсированного вещества и уменьшается (по сравнению со вторым слагаемым) при высоких температурах или малых плотностях в плазменной области). Первое и третье слагаемые уравнения состояния удовлетворяют термодинамическому тождеству точно, поэтому погрешность, с которой выполняется указанное тождество, определяется только уравнением Саха и должна быть небольшой. При использовании этого уравнения в программе двухфазные состояния и соответственно правило Максвелла обычно не учитываются, при этом предполагается, что в неустойчивых состояниях ($\partial p/\partial \rho < 0$) в разных счетных ячейках вещество само будет распадаться на газовую и конденсированную фазы. Преимущество этого подхода состоит в том, что в расчетах вещество в двухфазной области является неоднородным, что соответствует действительности.

В расчетах сопротивление вещества в плазменном и конденсированном состояниях определяется различными формулами. Сопротивление вещества в плазменном состоянии считается спитцеровским с поправками на неидеальность и с учетом рассеяния электронов на нейтральных атомах. Сопротивление вещества в конденсированном состоянии считается пропорциональным внутренней энергии и обратно пропорциональным плотности. В промежуточных состояниях используется интерполяция по значениям сопротивления вещества в конденсированном и плазменном состояниях.

В расчете LDR ток в установке “Атлас” менялся в соответствии с ее электротехнической схемой. Параметры схемы близки к параметрам в экспериментах LD (зарядное напряжение батареи приблизительно равно 160 кВ, начальная индуктивность нагрузки — 26 нГн). Форма полученной кривой тока (кривая 2 на рис. 2) несколько отличается от формы кривой в экспериментах LD, что в основном обусловлено большей индуктивностью, вводимой в процессе имплозии лайнера.

На рис. 3 приведены зависимости скорости внутренней поверхности лайнера от радиуса, полученные в расчетах LD и LDR. Расчетные кривые тока соответствуют представленным на рис. 2. На рис. 3 видно, что при уменьшении начального радиуса лайнера без изменения его массы скорость его внутренней границы на приемном радиусе, равном 1 см, не меняется. Это объясняется тем, что в расчетах LD разгон лайнера происходит в основном на участке, где значение тока уменьшается (при радиусе лайнера, равном 2 см, ток приблизительно равен 8 МА), а в расчетах LDR на достаточно протяженном участке разгона

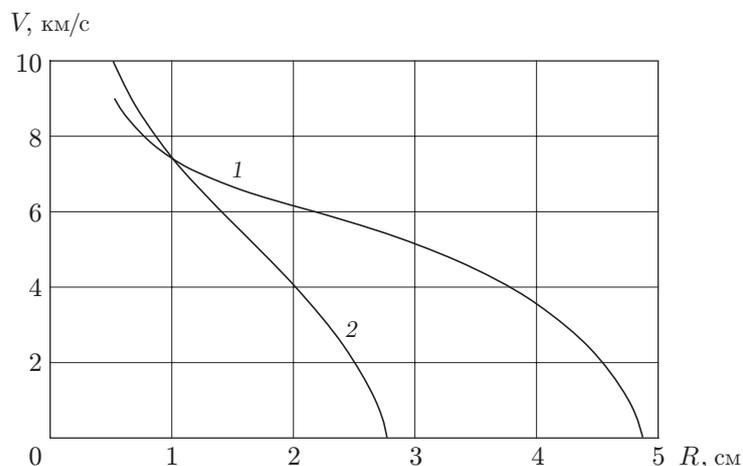


Рис. 3. Зависимость скорости внутренней поверхности лайнера от радиуса для расчетов LD (1) и LDR (2)

лайнера ток близок к максимальному (при радиусе лайнера, равном 2 см, ток приблизительно равен 18 МА).

Поскольку на динамику развития неустойчивости Рэлея — Тейлора существенное влияние должны оказывать распределение джоулева тепла в скин-слое лайнера и толщина расплавленной зоны, представляет интерес исследование пространственного распределения МГД-величин по лайнеру. Несмотря на то что в расчетах LDR при уменьшении радиуса лайнера джоулев нагрев внешней поверхности оказывается существенно большим (например, при радиусе лайнера, равном 2 см, в расчетах LD температура поверхности составляет 0,26 эВ, а при меньшем начальном радиусе она равна 0,46 эВ), зона, в которой температура превышает 0,1 эВ, что примерно соответствует плавлению, несколько уменьшается, и при радиусе лайнера, равном 2 см, ее масса составляет 37 % массы лайнера, в то время как в расчетах LD она равна 44 %. Таким образом, при уменьшении начального радиуса лайнера его состояние представляется менее подверженным развитию неустойчивости.

1.2. Двумерное МГД-моделирование развития возмущений. Для исследования устойчивости движения лайнеров проведены двумерные численные расчеты разгона лайнеров с учетом роста возмущений. Расчеты проводились для двумерной (r, z) -геометрии на эйлеровой сетке, при этом учитывались прочность материала, определяемая по упругопластической модели, его разупрочнение при плавлении, резистивная диффузия и джоулево тепловыделение.

При расчете движения лайнера использовалась кривая тока для экспериментов LDR (кривая 2 на рис. 2).

В расчетах начальные возмущения с характерной величиной, определяемой разрешением используемой в численных расчетах сетки Δ , считались случайными. Теоретические аргументы, приведенные в работе [9], показывают, что возникающая при этом неточность является незначительной. Фактически неточность будет незначительной, если разрешение сетки (а значит, и величина возмущений) достаточно мало. Поэтому необходимо проводить расчеты на сходимость с уменьшением Δ . Это позволит убедиться в том, что при уменьшении размера ячейки сетки результаты расчетов меняются незначительно.

Как показали расчеты, длина волны λ_m наиболее быстро развивающихся возмущений в эксперименте LD приблизительно равна 4 мм. Для того чтобы включить в расчет наиболее опасные моды возмущений, ширина расчетной области была выбрана равной 1,6 см, т. е. превышала значение λ_m .

На рис. 4 показаны изолинии плотности, полученные в двумерных расчетах LDR на сетке с разрешением $\Delta = 0,0025$ см по радиусу и 2Δ по координате z . Видно, что в расчетах LDR лайнер является менее деформированным, чем в расчетах LD (см. рис. 1, б).

Расчеты показали существенное различие степени развития возмущений, амплитуда a которых, определяемая как половина разности между максимальным и минимальным по радиусу положениями внутренней поверхности, составляет: в расчете LD $a \approx 0,0265$ см, в расчете LDR $a \approx 0,0026$ см, т. е. на порядок меньше (при уменьшении радиуса лайнера до значения, равного 1 см, амплитуда возмущений в расчете LDR незначительно возрастает ($a \approx 0,0031$ см)).

Поскольку из-за развития неустойчивости масса лайнера уменьшается, он может разгоняться до больших скоростей. Для эксперимента LD в одномерном расчете скорость внутренней части лайнера на радиусе 1,3 см составляет 6,9 км/с, а в двумерном расчете средняя по координате z скорость внутренней части лайнера на этом радиусе равна 7,4 км/с; для эксперимента LDR эти значения составляют 6,32 и 6,57 км/с соответственно. Таким образом, в расчете для эксперимента LDR уменьшение массы лайнера менее существенно.

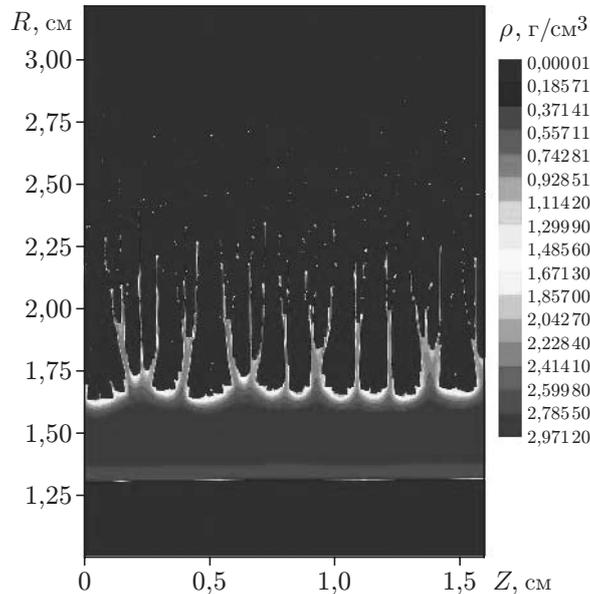


Рис. 4. Изолинии плотности лайнера, полученные в расчете LDR для момента времени $t = 7,83$ мкс, соответствующего положению внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 1,3$ см

2. РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛАЙНЕРА ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

2.1. Выбор периодических возмущений. Длина волны λ^* и начальная амплитуда a_0^* специально задаваемого периодического возмущения выбирались с учетом следующих условий: 1) возмущение в процессе развития не должно достигать внутренней границы лайнера; 2) амплитуда возмущения должна быть достаточно большой, чтобы его влияние на рост хаотических возмущений было значительным; 3) длина волны и амплитуда периодического возмущения должны быть значительно больше длины волны и амплитуды коротковолновых возмущений, создаваемых резцом в процессе изготовления лайнера; 4) начальная амплитуда a_0^* специально задаваемого периодического возмущения должна быть порядка длины волны.

Следует отметить, что при выполнении условий 3, 4 возможно уменьшение скорости роста коротковолновых (по сравнению с длиной волны периодического возмущения) возмущений, по крайней мере за счет уменьшения нормальной составляющей ускорения силы “тяжести” на участках поверхности, находящихся между горбами и впадинами периодического возмущения. При этом смысл условия 4 состоит в следующем: чем больше отношение амплитуды к длине волны периодического возмущения, тем существеннее уменьшается сила “тяжести”. Влияние создаваемого периодическими возмущениями сдвига скорости на рост мелкомасштабных возмущений также будет тем больше, чем больше сам сдвиг, т. е. чем больше амплитуда периодических возмущений. Смысл условия 3 (условия крупномасштабности периодических возмущений по сравнению с хаотическими) состоит в следующем: чем больше длина волны λ^* , тем большая доля возмущений будут иметь длины волн менее λ^* .

Вследствие нелинейности процесса взаимодействия возмущений с разными длинами волн (на рассматриваемой стадии, когда возмущения нельзя считать малыми) трудно предсказать все или хотя бы наиболее существенные следствия этого взаимодействия. По-

этому проведение двумерного расчета с добавлением периодического возмущения к спектру случайных возмущений можно рассматривать как своеобразный вычислительный эксперимент. Из результатов эксперимента [13] следует, что введение периодических винтовых возмущений также позволяет подавлять рост хаотических возмущений. Однако для численного моделирования влияния винтовых возмущений необходимо проводить трехмерные расчеты, поэтому такое моделирование пока невозможно.

Для того чтобы выбрать приемлемые параметры a_0^* и λ^* , проведена серия приближенных расчетов развития периодического возмущения. В этих расчетах предполагалось, что рост амплитуды начинается с момента плавления (частичного или полного) наружной поверхности лайнера. Для нелинейной стадии развития возмущения ($a > 0,1\lambda^*$) предполагалось, что скорость внедрения периодических “пузырей” в лайнер определяется известной формулой $u \approx F_0 \sqrt{\lambda^* g}$, где $F_0 = 0,24$; g — ускорение силы “тяжести” (см., например, [20]). При расчете процесса внедрения “пузырей” учитывалось также увеличение толщины лайнера при его сжатии. Зависимость тока от времени взята из эксперимента, результаты которого приведены на рис. 2. При расчете ускорения лайнера учитывалось, что по мере внедрения в него “пузырей” эффективная масса лайнера уменьшается.

По результатам приближенных расчетов в указанной постановке были выбраны следующие начальные параметры периодического (синусоидального) возмущения: $\lambda^* = 0,04$ см, $a_0^* = 0,013$ см.

2.2. Двумерное МГД-моделирование развития возмущений. Для моделирования полета лайнера с периодическими возмущениями (расчет LDP) использовалась та же кривая тока, что и для эксперимента LD (кривая 1 на рис. 2). Таким образом, результаты одномерных расчетов для эксперимента LDP совпадают с результатами для эксперимента LD (см. рис. 3).

На рис. 5,а представлены результаты, полученные в двумерном расчете LDP на сетке с разрешением $\Delta = 0,0025$ см по радиусу и 2Δ по координате z . Начальные возмущения представляли собой сумму синусоидальных возмущений с параметрами λ^* , a_0 , указанными выше, и случайных возмущений, равномерно распределенных в каждой ячейке наружной поверхности в диапазоне $-\Delta/4 \div \Delta/4$.

Из результатов сравнения рис. 1,б и рис. 5,а следует, что в расчете LDP состояние лайнера является не менее возмущенным, чем в расчете LD. Степень развития возмущений внутренней границы в расчетах LD и LDP примерно одинакова (в расчете LDP $a \approx 0,0273$ см).

В расчете LDP внутренняя поверхность лайнера из-за уменьшения его массы в результате развития периодических возмущений приобретает существенно бóльшую скорость (приблизительно равную 8,8 км/с), чем в расчете LD. Таким образом, в расчетах LD и LDP свойства лайнеров оказываются далеко не эквивалентными. Можно предположить, что если при создании периодических возмущений увеличить толщину лайнера, то можно стабилизировать рост хаотических возмущений при сохранении скорости лайнера.

В расчете LDP1 толщина лайнера была увеличена до 1,6 мм и на его поверхности в дополнение к хаотическим создавались такие же периодические возмущения, как и в расчете LDP. Использовалась та же кривая тока, что и в расчете LD (см. рис. 2). Результаты расчета LDP1 представлены на рис. 5,б.

В расчете LDP1 скорость лайнера на радиусе 1,3 см составила 6,5 км/с, что несколько меньше скорости лайнера в одномерных расчетах LD (6,9 км/с), т. е. толщина лайнера была чрезмерно увеличена. Степень возмущения внешней поверхности лайнера на конечном радиусе в расчете LDP1 оказалась несколько меньшей, чем в расчете LDP, а возмущение внутренней границы в расчете LDP1 приблизительно в два раза меньше ($a = 0,014$ см), чем в расчетах LD и LDP. Таким образом, создавая на поверхности лайнера периодические

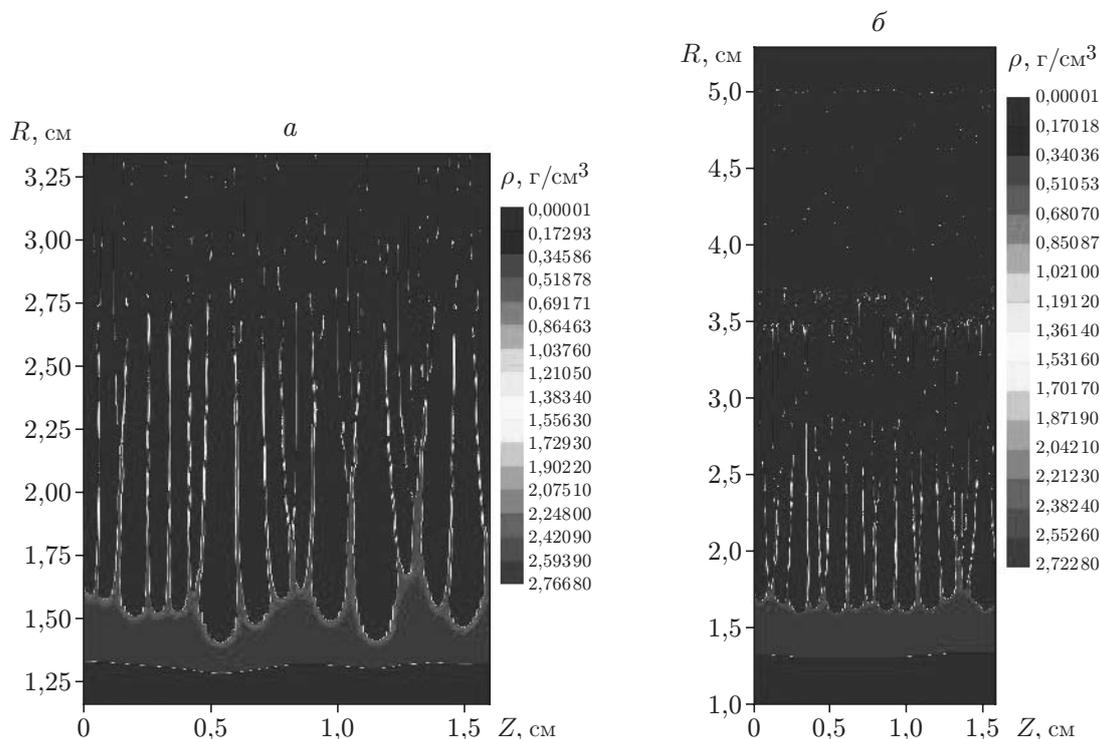


Рис. 5. Изолинии плотности лайнера, полученные в расчетах LDP и LDP1 для моментов времени, соответствующих положению внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 1,3$ см:

a — LDP ($t = 11,7$ мкс); *б* — LDP1 ($t = 13,2$ мкс)

возмущения и одновременно увеличивая его толщину, можно несколько стабилизировать рост хаотических возмущений при сохранении свойств лайнера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования физики лайнерной имплозии и определения оптимальных условий устойчивого движения лайнеров рассмотрены некоторые варианты постановки экспериментов на установке “Атлас”.

С помощью прямых двумерных численных МГД-расчетов роста возмущений показано, что уменьшение начального радиуса лайнера до 3 см при сохранении его массы (расчет LDR) приводит к существенно меньшему росту возмущений, чем в экспериментах LD, если этот рост определять по развитию возмущения внутренней поверхности. По-видимому, это обусловлено тем, что в расчете LDR лайнер проходит расстояние, равное меньшему количеству его толщин, а также тем, что за время разгона плавится меньшая его доля. Сравнение форм наружной поверхности, полученных в расчетах LDR и LD, показывает, что наружная поверхность лайнера LDR также возмущена в значительно меньшей степени.

В расчете для эксперимента LDP, в котором на поверхности лайнера создаются периодические возмущения, амплитуда возмущений как внутренней, так и внешней поверхности незначительно отличается от амплитуды, полученной в расчетах без периодических возмущений, но скорость на приемном радиусе увеличивается из-за более значительного уменьшения массы лайнера в процессе разгона. Если при создании периодических возмущений одновременно увеличивать толщину лайнера (расчет LDP1), то рост хаотиче-

ских возмущений несколько стабилизируется (согласно расчету возмущения внутренней поверхности оказываются в два раза меньшими) при незначительном изменении скорости лайнера. Такая стабилизация не является достаточно надежной из-за неточностей расчета, однако экспериментальная проверка результатов проведенных расчетов все же целесообразна, поскольку этот метод стабилизации мог бы стать универсальным, не зависящим от степени согласования нагрузки с источником тока.

Предполагается также в экспериментах на установке “Атлас” стабилизировать полет лайнера путем специальной обработки его поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чернышев В. К., Мохов В. Н., Протасов М. С. и др.** Исследование лайнерных пондеромоторных узлов, используемых в качестве драйвера в системе с магнитным обжатием // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов.* 1992. Вып. 4. С. 42–50.
2. **Buyko A. M., Zmushko V. V., Nizovtsev P. N., et al.** On feasibility to achieve high longitudinal symmetry of cylindrical metal liners compressed by currents from most powerful disk EMG // *Digest of tech. papers 12th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey (California, USA), June 27–30, 1999* / Ed. by C. Stallings, H. Kirbie. S. l., 1999. P. 1145–1148.
3. **Buyko A. M., Burenkov O. M., Zmushko V. V., et al.** On the feasibility to achieve high pressures with disk EMG driven impacting liners // *Digest of tech. papers: Pulsed power plasma science — 2001* / Ed. by R. Reinovsky, M. Newton. Las Vegas (Nevada): Inst. of Electric. and Electron. Engrs, Inc., 2001. P. 516–519.
4. **Reinovsky R. E., Anderson W. E., Atchison W. L., et al.** Pulsed power hydrodynamics: a new application of high magnetic field // *Proc. of the 9th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Moscow — St.-Petersburg, 2002* / Ed. by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2004. P. 696–705.
5. **Garanin S. F., Mamyshev V. I., Yakubov V. B.** The MAGO system: current status // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2006. V. 26, N 4. P. 2273–2278.
6. **Degnan J. H., Cavazos T., Clark D., et al.** On research on magnetic pressure implosions of long cylindrical liners, suitable for subsequent compression of the field reversed configuration type of compact toroids // *Proc. of the 9th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Moscow — St.-Petersburg, 2002* / Ed. by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2004. P. 730–737.
7. **Гаранин С. Ф., Иванова Г. Г., Кармишин Д. В., Софронов В. Н.** Диффузия мегагауссного поля в металл // *ПМТФ.* 2005. Т. 46, № 2. С. 5–12.
8. **Atchison W. L., Faehl R. J., Lindemuth I. R., et al.** Dependence of solid liner stability on drive conditions during magnetic implosion // *Proc. of the 9th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Moscow — St.-Petersburg, 2002* / Ed. by V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2004. P. 710–717.
9. **Buyko A. M., Garanin S. F., Karmishin D. V., et al.** Analysis of the liner stability in various experiments // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. V. 36, N 1. P. 4–9.
10. **Волченко О. И., Жидов И. Г., Мешков Е. Е., Рогачев В. Г.** Развитие локализованных возмущений на неустойчивой границе ускоряемого жидкого слоя // *Письма в ЖТФ.* 1989. Т. 15, № 1. С. 47–51.
11. **Мешков Е. Е.** Неустойчивость Рэлея — Тейлора: Исслед. в лаб. экспериментах. Саранск: Тип. “Красный Октябрь”, 2002.

12. **Reinovsky R., Atchison W., Anderson W., et al.** Stability of magnetically imploded liners for high energy density experiments // Proc. of the 8th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Tallahassee (Florida, USA), 1998 / Ed. by H. J. Schneider-Muntau. Singapore: World Sci., 2004. P. 473–478.
13. **Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Ekdahl C., et al.** On feasibility of Rayleigh — Taylor instability magnetic stabilization of liner implosions // Proc. of the 8th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Tallahassee (Florida, USA), 1998 / Ed. by H. J. Schneider-Muntau. Singapore: World Sci., 2004. P. 563–566.
14. **Harris E. G.** Rayleigh — Taylor instabilities of a collapsing cylindrical shell in a magnetic field // Phys. Fluids. 1962. V. 5, N 9. P. 1057–1062.
15. **Anderson B. G., Anderson W. E., Buyko A. M., et al.** Liner experiment on verification of Rayleigh — Taylor instability magnetic stabilization effect (joint LANL/VNIIEF experiment PEGASUS-2) // Digest of tech. papers: Pulsed power plasma science — 2001 / Ed. by R. Reinovsky, M. Newton. Las Vegas (Nevada): Inst. of Electric. and Electron. Engrs, Inc., 2001. P. 354–355.
16. **Bujko A. M., Garanin S. F., Demidov V. A., et al.** Investigation of the dynamics of a cylindrical exploding liner accelerated by a magnetic field in the megagauss range // Megagauss fields and pulsed power systems / Ed. by V. M. Titov, G. A. Shvetsov. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 743–748.
17. **Софронов И. Д., Бельков С. А., Винокуров О. А. и др.** Комплекс программ МИМОЗА-99 // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та эксперим. физики. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2001. Т. 1. С. 94–101.
18. **Buyko A. M., Garanin S. F., Zmushko V. V., et al.** 2D computations for perturbation growth of magnetically driven cylindrical aluminium and aluminium alloy liners // Proc. of the 7th Intern. workshop phys. compressible turbulent mixing, St.-Petersburg (Russia), 1999 / Ed. by E. Meshkov, Yu. Yanilkin, V. Zhmailo. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2001. P. 237–243.
19. **Зельдович Я. Б.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. М.: Наука, 1966.
20. **Garabedian P. R.** On steady-state bubbles generated by Taylor instability // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1957. V. 241. P. 423.

*Поступила в редакцию 8/XI 2007 г.,
в окончательном варианте — 26/X 2008 г.*
