

УДК 537.84

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЭЛЕЯ — ТЕЙЛОРА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЛАЙНЕРОВ

С. Ф. Гаранин, А. М. Буйко, В. Б. Якубов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

E-mails: sfgar@yandex.ru, a.m.buyko@vniief.ru, V.B.Yakubov@vniief.ru

Представлен обзор работ, в которых исследуется неустойчивость Рэля — Тейлора, возникающая при высокоскоростной имплозии лайнеров, и работ, посвященных экспериментальному и численному моделированию развития и подавления этой неустойчивости.

Ключевые слова: имплозия лайнеров, z-пинч, неустойчивость Рэля — Тейлора, аспектное отношение, численные решения двумерных задач магнитной гидродинамики.

DOI: 10.15372/PMTF20170503

Введение. Разгон лайнеров до высоких скоростей осуществляется с помощью высокого магнитного давления, создаваемого при пропускании по лайнерам сильных импульсных электрических токов. Как правило, для разгона лайнеров используются азимутальные магнитные поля, создаваемые токами, протекающими вдоль оси и имеющими в двумерном случае радиальную составляющую (z-пинч-геометрия), или продольные (полоидальные) магнитные поля, создаваемые азимутальными токами (θ -пинч-геометрия).

Магнитная имплозия лайнеров [1, 2] используется в экспериментах при изучении свойств материалов, находящихся под действием высокого давления. При использовании магнитной имплозии лайнеры могут достигать скоростей, значительно превышающих скорости, получаемые с помощью взрывчатых веществ или в газовых пушках. При этом магнитное давление, по крайней мере, в некоторых направлениях (например, в направлении z при разгоне лайнера в z-пинч-геометрии) выравнивается практически мгновенно, что способствует достижению большей симметрии имплозии. При больших скоростях и большей симметрии достигаются большие температуры и давления в мишени. Так как параметры электрических контуров, обеспечивающих разгоняющий ток в экспериментах, могут меняться в широком диапазоне, ускорение лайнера и его конечную скорость можно менять в соответствии с условиями эксперимента. Магнитное поле обеспечивает плавный разгон лайнеров без возникновения ударных волн, что позволяет контролировать состояние лайнера, а также изучать изоэнтропическое сжатие материалов.

Имплозия лайнеров (рис. 1) используется для создания сильных ударных волн в мишенях, размещаемых вблизи оси симметрии, для совершения работы над магнитным полем (и генерации сильных магнитных полей), сжатия замагниченной плазмы и увеличения ее внутренней энергии, безударного сжатия вещества, контактирующего с лайнером, или вещества самого лайнера и т. д.

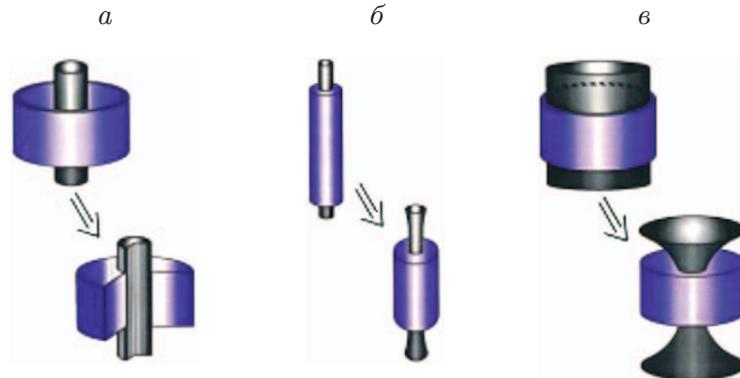


Рис. 1. Примеры имплозии лайнеров:

a — ударное сжатие, *б* — квазиизоэнтропическое сжатие, *в* — гидродинамическое сжатие

Важной для приложений характеристикой лайнера является динамическое давление ρv^2 (ρ , v — плотность вещества лайнера и его скорость), получаемое при имплозии, поскольку именно эта величина характеризует плотность энергии. Поэтому лайнер должен иметь высокую плотность, что можно обеспечить, если в процессе имплозии лайнер остается в конденсированном состоянии (при испарении и переходе лайнера в плазменное состояние его плотность может уменьшиться на несколько порядков).

В процессе имплозии лайнера могут развиваться неустойчивости, приводящие к нарушению его формы и росту неоднородности, в результате чего ухудшаются условия его использования или происходит его разрушение. Среди потенциально опасных неустойчивостей можно выделить неустойчивости, обусловленные взаимодействием лайнера с токоподводящими стенками, и неустойчивость Рэлея — Тейлора, возникающую в том случае, когда вещество с малой плотностью, например магнитное поле (вещество с нулевой плотностью), ускоряет вещество с большей плотностью, например лайнер. Неустойчивость Рэлея — Тейлора может возникать также при сжатии лайнером магнитного поля или низкоплотной плазмы (при торможении лайнера). Близкой к неустойчивости Рэлея — Тейлора является “сосисочная” неустойчивость, возникающая вследствие кривизны силовых линий азимутального магнитного поля, которое часто используется при разгоне лайнеров в z-пинч-геометрии. Эта неустойчивость также может приводить к росту возмущений лайнера. Близкой к неустойчивости Рэлея — Тейлора является также неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, возникающая при прохождении ударной волны через контактную границу двух разноплотных сред. Данный вид неустойчивости встречается значительно реже, поскольку сильные ударные волны возникают при ускорении лайнеров только при особых условиях, под действием слабых ударных волн возникает неустойчивость Рэлея — Тейлора с зависящим от времени ускорением. Поэтому в данной работе неустойчивость Рихтмайера — Мешкова не рассматривается.

Обзор проблем развития неустойчивости Рэлея — Тейлора несжимаемой жидкости представлен в [3]. В данном обзоре приводятся результаты работ, посвященных экспериментальному и численному моделированию неустойчивости Рэлея — Тейлора, возникающей при разгоне лайнеров, а также работ, в которых рассматриваются способы замедления ее развития. Данная работа дополняет обзор [4].

1. Неустойчивость Рэлея — Тейлора и рост возмущений. Оценки влияния “сосисочной” неустойчивости. Ниже описываются различные стадии развития неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости.

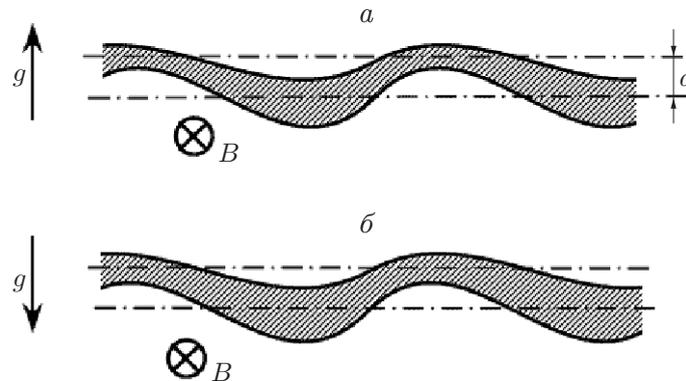


Рис. 2. Неустойчивость Рэлея — Тейлора в случае ускоряемого лайнера:
a — направление действия магнитного поля противоположно направлению силы тяжести,
б — направление действия магнитного поля совпадает с направлением силы тяжести

1.1. *Линейная стадия неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости.* Рассмотрим наиболее простой случай неустойчивости Рэлея — Тейлора [5, 6]. Пусть имеется идеальная несжимаемая жидкость, находящаяся в поле силы тяжести, имеющем ускорение g . Согласно линейной теории смещение поверхности жидкости ζ (предполагается, что на свободных поверхностях жидкости магнитное давление является постоянным, в частности нулевым), описываемое фурье-компонентой с волновым числом k , изменяется со временем по закону

$$\zeta = \zeta_0 \exp(\gamma t + ikx),$$

где γ определяется дисперсионным соотношением

$$\gamma^2 = \pm gk \quad (1)$$

(знак “+” соответствует случаю, когда жидкость поддерживается магнитным полем, направление действия которого противоположно направлению силы тяжести (неустойчивость) (рис. 2, *a*), знак “–” — случаю, когда жидкость поддерживается магнитным полем, направление действия которого совпадает с направлением силы тяжести (гравитационные волны [7]) (рис. 2, *б*)).

Данный результат можно использовать при исследовании устойчивости лайнера [8], если ускорение свободного падения заменить ускорением, вызванным силой инерции, направленной противоположно ускорению жидкости (см. рис. 2). Дисперсионное соотношение (1) остается справедливым, если вместо слоя жидкости бесконечной толщины рассмотреть лайнер толщиной d , ускоряемый магнитным давлением. В этом случае ускорение лайнера g определяется магнитным давлением $p_B \equiv B^2/(8\pi)$ (B — магнитное поле):

$$g = p_B/(\rho d). \quad (2)$$

Если ускорение лайнера происходит под действием магнитного давления в соответствии с рис. 2, *a*, то движение лайнера неустойчиво (знак “+” в формуле (1)). Если ускорение лайнера обеспечивается действием других сил, а магнитное давление уменьшает это ускорение (см. рис. 2, *б*), то движение лайнера устойчиво (знак “–” в формуле (1)).

При ускорении лайнера азимутальным магнитным полем помимо неустойчивости Рэлея — Тейлора может возникать “сосисочная” неустойчивость, обусловленная тем, что при заданном аксиальном токе азимутальное магнитное поле изменяется в зависимости от радиуса по закону $B \sim 1/r$. Следовательно, магнитное давление на лайнер изменяется по

закону $p_B \sim 1/r^2$. В этом случае провалившиеся по радиусу участки лайнера под действием возросшего магнитного давления будут проваливаться еще сильнее и возмущения будут нарастать. При малых длинах волн $kr \gg 1$ “сосисочная” неустойчивость превращается в неустойчивость Рэлея — Тейлора с инкрементом, определяемым соотношением (1) [9]. При этом роль тяжелой жидкости играет вещество лайнера, легкой — магнитное поле, а роль ускорения g — величина

$$g_B = 2p_B/(\rho r) = B^2/(4\pi\rho r) = c_A^2/r, \quad (3)$$

где c_A — альфвеновская скорость.

Инкременты (1) неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости соответствуют случаю, когда между веществом лайнера и магнитным полем имеется четко выраженная граница и длины волн велики по сравнению с размером переходной области. Это справедливо в случае конденсированного лайнера. Однако если лайнер взрывается начиная с внешней поверхности, граница между магнитным полем и веществом размывается (вещество лайнера превращается в газ и на границе с вакуумом плотность вещества обращается в нуль). В переходной области зависимость инкрементов неустойчивости от волнового вектора является более сложной по сравнению с (1). Поскольку инкременты неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости растут с увеличением волнового вектора, могут представлять опасность очень малые длины волн. В случае плавного распределения плотности при наличии неустойчивости Рэлея — Тейлора или магнитного поля при наличии “сосисочной” неустойчивости при длине волны, стремящейся к нулю, инкременты развития этих неустойчивостей должны выходить на постоянный предел, зависящий от градиентов соответствующих величин. Задача о вычислении этих предельных инкрементов при малых по сравнению с характерными размерами области течения длинах волн при наличии одновременно неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости в азимутальном магнитном поле рассмотрена в [9]. В случае отсутствия магнитного поля выражение для инкремента [9] определяет коротковолновый инкремент неустойчивости Рэлея — Тейлора

$$\gamma^2 = g \left(\frac{g}{c^2} + \frac{\partial \ln \rho}{\partial r} \right)$$

(c — скорость звука). В случае отсутствия движения ($g = 0$) инкремент “сосисочной” неустойчивости целесообразно выразить через градиент магнитного давления:

$$\gamma^2 = \frac{c_A^2}{r^2} \left(\frac{\partial \ln p_B}{\partial \ln r} + \frac{2(c_A^2 - c^2)}{c_A^2 + c^2} \right).$$

1.2. Нелинейная стадия неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости. Если амплитуды возмущений становятся сравнимыми с длиной волны (в случае “сосисочной” неустойчивости — с радиусом), наступает нелинейная стадия неустойчивости. На этой стадии нельзя раскладывать произвольные возмущения по фурье-гармоникам, а анализ возникающих нелинейных течений становится более сложным. Только для тонкой оболочки (c толщиной d , много меньше характерных длин волн) исследование нелинейной стадии неустойчивости Рэлея — Тейлора сводится к исследованию линейной задачи [10].

При изучении турбулентных течений, развивающихся в условиях действия неустойчивостей, представляет интерес исследование некоторых случаев нелинейного развития неустойчивости. Одним из таких случаев является задача о развитии периодических возмущений с постоянной длиной волны [11–13] при отношении плотностей тяжелой и легкой жидкостей, равном бесконечности. В задачах о неустойчивости Рэлея — Тейлора несжимаемой жидкости часто используется число Атвуда, определяемое по формуле

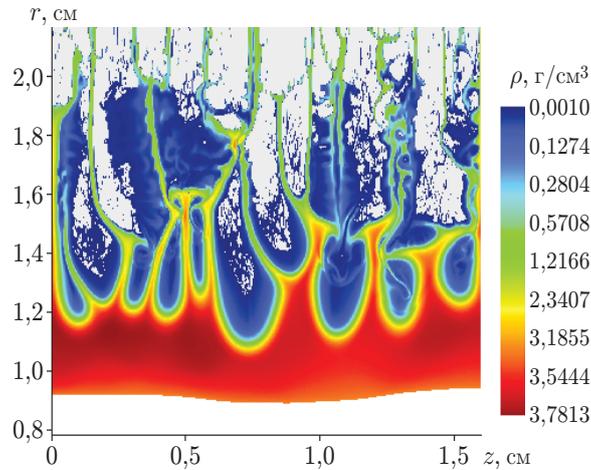


Рис. 3. Распределение плотности лайнера в процессе имплозии

$A = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$, где ρ_1, ρ_2 — плотности тяжелой и легкой жидкостей. При $\rho_2 = 0$ $A = 1$. В случае $\rho_2 \neq 0$ в линейной задаче ускорение g в формуле (1) нужно заменить на величину Ag .

Параметры, получаемые при решении задачи с периодическими возмущениями, в частности инкременты в линейной задаче и число Фруда в стационарной задаче $Fr = v/\sqrt{g\lambda}$ (v — скорость всплывания пузыря, возникающего в тяжелой жидкости; λ — длина волны; g — ускорение свободного падения), используются для построения различных моделей неустойчивости [14, 15]. Экспериментальному изучению развития периодических возмущений при магнитной неустойчивости Рэля — Тейлора первоначально твердотельных лайнеров посвящены работы [16, 17].

Другим типом возмущений, развитие которых имеет универсальный характер, являются локализованные возмущения, исследованные в работах [18–20]. Задача о развитии локализованных возмущений в плоском двумерном случае [20], когда размер зоны возмущения увеличивается в зависимости от времени по автомодельному закону

$$y \sim gt^2, \quad (4)$$

может представлять интерес для практических приложений и использоваться в качестве вспомогательной задачи при построении моделей.

Изучению нелинейного развития “сосисочной” неустойчивости посвящен ряд работ (см. работы [9, 21, 22] и библиографию к ним). Нелинейное развитие аксиально-симметричных возмущений, периодических по оси (не обязательно гармонических), переходит в стадию [9], описываемую автомодельным решением, в котором сжатие вещества можно считать адиабатическим, а длину перетяжки — фиксированной и в котором характерные величины (радиус перетяжки R , плотность вещества лайнера ρ и температура T) зависят от времени следующим образом:

$$R \sim t^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad \rho \sim t^{-2/(\gamma-1)}, \quad T \sim t^{-2}.$$

1.3. *Турбулентная стадия неустойчивости Рэля — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости.* Для турбулентной стадии неустойчивости Рэля — Тейлора (рис. 3) и “сосисочной” неустойчивости, так же как и для нелинейной стадии периодических и локализованных возмущений, характерно наличие пузырей и струй. Однако в отличие от периодических возмущений положение этих пузырей и струй хаотично, по мере развития неустойчивости происходит слияние пузырей, поэтому характерные амплитуды и длины

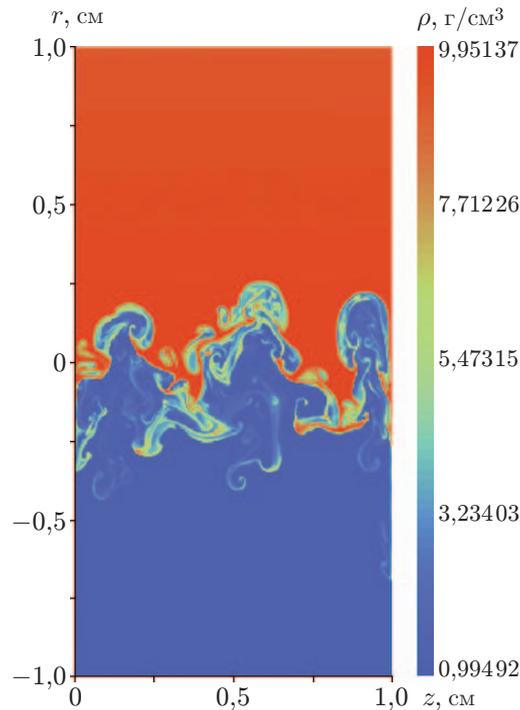


Рис. 4. Распределение плотности вещества в случае развития двумерной неустойчивости Рэлея — Тейлора в плоской задаче с постоянным ускорением при $\rho_1/\rho_2 = 10$ ($A = 0,82$)

волн возмущений увеличиваются. На этой стадии характерные длины волн и амплитуды возмущений порядка длины некоторого участка пути, пройденного с ускорением.

Сравнение ускорений g (2) и g_B (3), определяющих зоны неустойчивости Рэлея — Тейлора и “сосисочной” неустойчивости, показывает, что их значения соотносятся как R/d , причем для лайнеров с большим аспектным отношением R/d влияние “сосисочной” неустойчивости должно быть незначительным.

Турбулентность, возникающая при движении лайнеров в азимутальном магнитном поле (z -пинч-геометрия), может быть двумерной, поскольку магнитное поле препятствует искривлению магнитных силовых линий и возникновению соответствующих движений. Поэтому имеются основания полагать, что двумерные расчеты в координатах $r-z$ для магнитного поля с одной азимутальной компонентой (см. рис. 3) описывают возникающую турбулентность. Свойства двумерной магнитогидродинамической (МГД) турбулентности должны быть аналогичны свойствам двумерной гидродинамической турбулентности [23]. Примером такого рода турбулентности является развитие двумерной неустойчивости Рэлея — Тейлора в плоской задаче с постоянным ускорением [24], когда размер зоны неустойчивости Рэлея — Тейлора увеличивается со временем по автомодельному закону (4) (рис. 4).

2. Развитие неустойчивости конденсированных лайнеров в некоторых экспериментах. В работах [1, 9, 25–32] указаны области исследований, при проведении которых необходимо получение скоростей лайнеров не менее 1 см/мкс. Для этого требуется использовать магнитные поля мегагауссного диапазона, что приводит к плавлению или испарению и переходу в плазму части вещества лайнера (скин-слоя) [33]. В этой части лайнера теряется прочность и создаются условия для развития неустойчивости Рэлея — Тейлора, в результате чего нарушается форма лайнера, ухудшаются его эксплуатационные характеристики или происходит его разрушение.

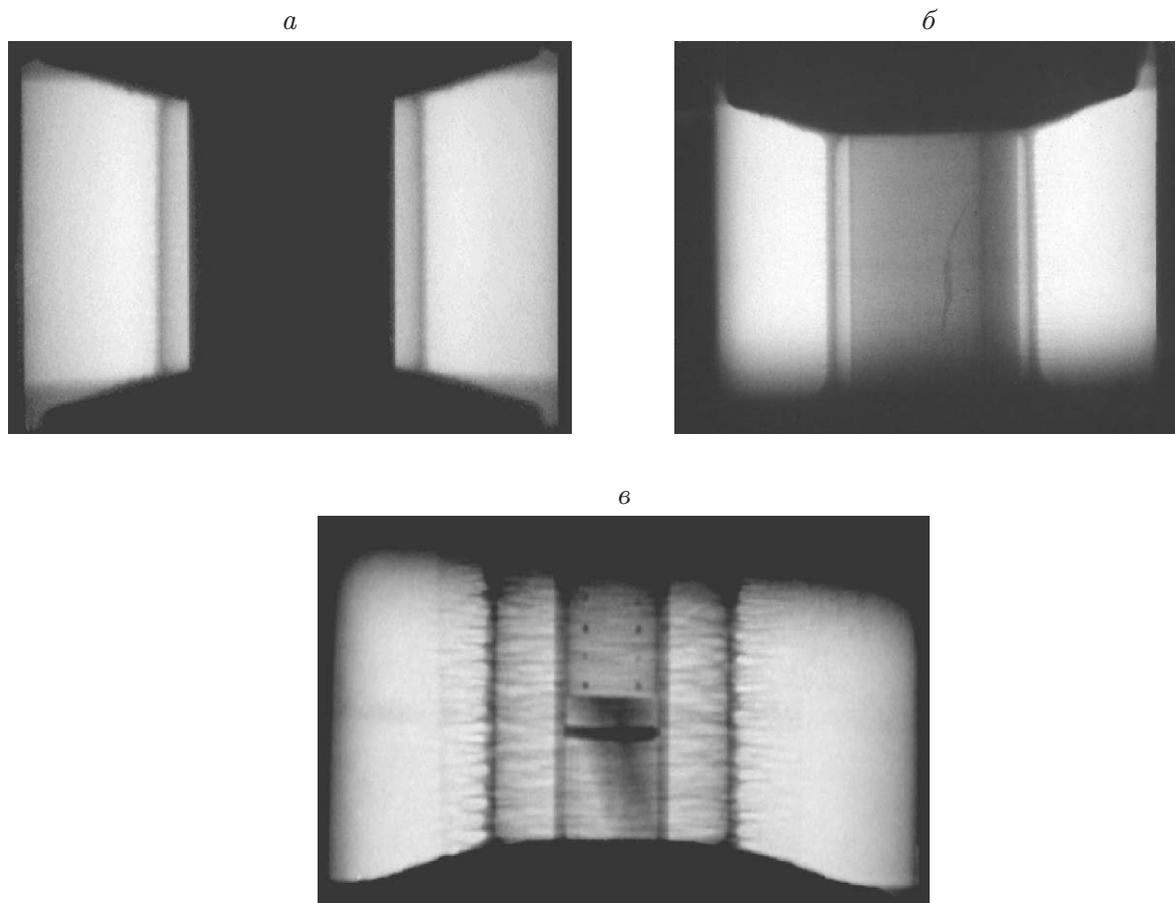


Рис. 5. Результаты рентгенографирования лайнера в экспериментах NTLX (а), HF (б) и LD (в)

Рост возмущений при разгоне лайнера определяется сложной динамикой локальной потери его прочности в зависимости от развития неустойчивости, поскольку в зоне неоднородности выделение джоулева тепла может происходить более интенсивно. В результате сложно предсказать, каким образом будут развиваться неустойчивости при движении лайнера. Даже при близких условиях разгона лайнеров динамика развития неустойчивости Рэля — Тейлора может существенно различаться. Так, в близких по условиям лайнерных экспериментах, проведенных на установке “Shiva-Star” в Военно-воздушной исследовательской лаборатории США (серия экспериментов NTLX) и на установке “Atlas” в Лос-Аламосской национальной лаборатории США (серии экспериментов HF и LD), получены рентгенограммы лайнеров, свидетельствующие о значительном различии развития неустойчивости [1, 34]. В экспериментах серий NTLX и HF на рентгенограммах зафиксировано слабое развитие неустойчивости, а в экспериментах серии LD — существенное развитие неустойчивости (рис. 5).

Исследование устойчивости полета лайнеров в данных экспериментах проводилось с помощью двумерных МГД-расчетов разгона лайнеров с учетом роста возмущений [35].

2.1. *Постановка задачи.* В экспериментах NTLX, HF и LD использовались цилиндрические лайнеры, начальный радиус которых равен 5 см. Толщина лайнера в серии NTLX составляла 0,1 см, в сериях HF и LD — 0,13 см. Лайнеры разгонялись азимутальными магнитными полями, которые создавались зависящими от времени токами генераторов в z-пинч-геометрии (рис. 6).

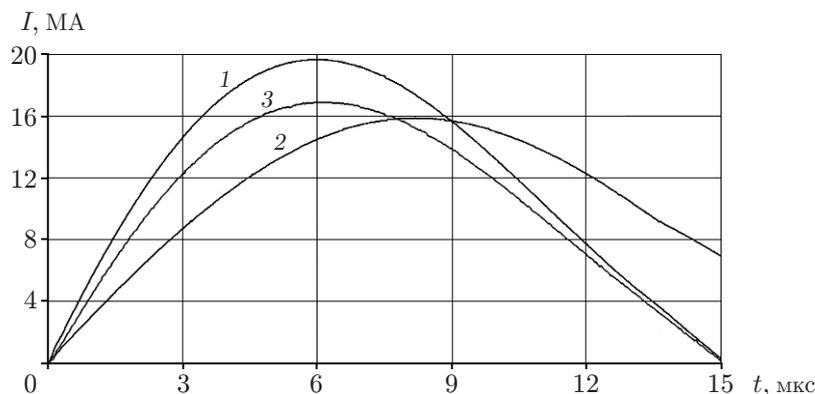


Рис. 6. Формы кривых тока для серий экспериментов LD (1), NTLX (2) и HF (3)

Условия экспериментов LD и HF различались только значениями силы тока, протекающего через лайнеры. Движение лайнеров в эксперименте HF является более устойчивым, что обусловлено меньшей толщиной расплавленной части лайнера и его большей прочностью. Представляет интерес сравнение экспериментов LD и NTLX, в которых различаются значения силы тока (в экспериментах NTLX сила тока меньше) и толщины лайнера (в экспериментах LD толщина лайнера больше). В эксперименте NTLX более устойчивое, чем в эксперименте LD, движение лайнера обусловлено, по-видимому, тем, что в эксперименте NTLX расплавленная часть лайнера меньше.

Расчеты проводились в двумерной (r, z) -геометрии на эйлеровой сетке с использованием программы [36, 37]. В расчетах принималось уравнение состояния алюминия в форме уравнения Ми — Грюнайзена и учитывались резистивная диффузия и выделение джоулева тепла, а также прочность материала, определяемая по упругопластической модели [38]. Несмотря на то что в рассматриваемых экспериментах начальная статическая прочность материала была значительно меньше характерного давления, прочность материала играла значительную роль, так как динамическая прочность материала возрастала с ростом давления и величины деформации и могла превышать статическую прочность более чем на порядок [38, 39].

Поскольку вследствие конечных размеров ячеек расчетной сетки Δ в расчетах отсутствовала возможность исследовать развитие возмущений с длинами волн $\lambda < \Delta$, начальная фаза развития возмущений с амплитудами, меньшими амплитуд $a \sim \lambda \sim \Delta$, не учитывалась и считалось, что в начальный момент $a \sim \lambda \sim \Delta$ (начальные возмущения существенно больше величины шероховатости поверхности лайнеров, возникающей при их изготовлении). Можно предположить, что допускаемая при этом погрешность расчетов является незначительной, так как уровень развития неустойчивости Рэлея — Тейлора в основном определяется величиной смещения лайнера S ($a \sim S$) и, следовательно, начальный уровень возмущений не должен оказывать влияние на величину возмущений на развитой стадии неустойчивости Рэлея — Тейлора. Начальные возмущения в расчетах считались случайными.

2.2. Результаты двумерного МГД-моделирования развития возмущений. На рис. 7 представлены распределения плотности, полученные в двумерных расчетах, в которых используются данные экспериментов NTLX, LD и HF.

Для получения оценки степени развития неустойчивости можно рассмотреть возмущения внутренней поверхности лайнера, которая возмущена значительно меньше внешней поверхности, но степень возмущения которой характеризует возможность использования лайнера в экспериментах. Для рассматриваемых экспериментов амплитуда возмущений

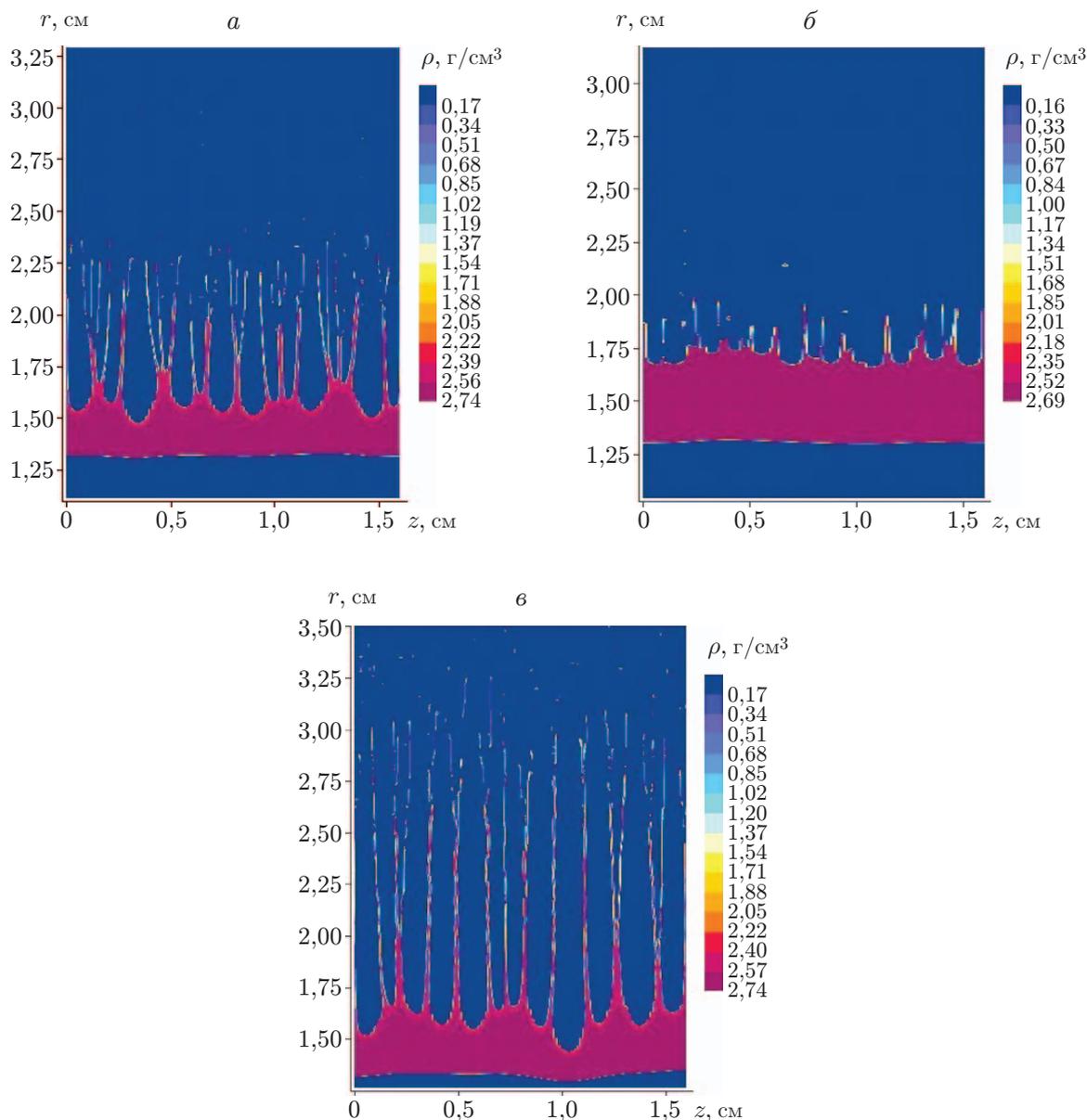


Рис. 7. Распределения плотности лайнера, полученные в расчетах NTLX (*a*), HF (*б*) и LD (*в*) для момента времени, соответствующего положению внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 1,3$ см

внутренней поверхности a определяется как половина разности максимального и минимального радиусов внутренней поверхности. При $R_{in} = 1,3$ см для экспериментов NTLX $a \approx 0,094$ мм, для экспериментов LD $a \approx 0,265$ мм, для экспериментов HF $a \approx 0,09$ мм.

При измельчении расчетной сетки численные решения, в которых используются данные экспериментов LD и HF, сходятся, численные решения, в которых используются данные экспериментов NTLX, не сходятся.

Установлено, что в двумерных МГД-расчетах, выполненных с использованием результатов экспериментов HF и NTLX, рост возмущений является менее существенным, чем в расчетах, выполненных с использованием результатов экспериментов LD, если рост возмущений определялся по развитию возмущения внутренней поверхности. Сравнение

расчетных форм внешней поверхности для экспериментов HF и LD показывает, что в расчетах и экспериментах HF лайнер остается слабозмущенным, а в расчетах и экспериментах LD — сильвозмущенным. Однако в расчетах LD и NTLX формы внешней поверхности лайнеров даже на мелкой сетке качественно подобны и являются сильвозмущенными.

3. Способы стабилизации роста возмущений. Одним из способов ограничения роста возмущений является прецизионное изготовление лайнеров, позволяющее уменьшить начальную амплитуду возмущений. Другим способом стабилизации роста возмущений является уменьшение аспектного отношения лайнера при сохранении его массы и создание на внешней поверхности лайнера периодических возмущений с определенной длиной волны, так чтобы за время разгона возмущения не успевали разрушить лайнер, но могли подавлять рост хаотических возмущений [40]. В ряде случаев можно уменьшить неустойчивость Рэлея — Тейлора, а иногда и подавить ее, используя свойства магнитного поля как источника давления.

Среди возможных способов подавления развития неустойчивости Рэлея — Тейлора следует указать соударение лайнеров, в результате которого внутренний лайнер оказывается менее возмущенным, чем налетающий [41]. Данный способ используется при разгоне проволочных лайнеров в случае применения двухоболочечных проволочных наборов [42].

Существует также возможность уменьшения неустойчивости Рэлея — Тейлора за счет использования вращения лайнера и возникающего при этом центробежного ускорения [43].

Следует также отметить новый способ подавления неустойчивости Рэлея — Тейлора путем покрытия поверхности металлического лайнера слоем пластика [44].

Рассмотрим более подробно некоторые способы стабилизации лайнерной имплозии.

3.1. Влияние аспектного отношения на развитие неустойчивости лайнера. В п. 2 показано, что в экспериментах серии LD на установке “Atlas” наблюдалась сильная неустойчивость. Возникает вопрос: какое влияние оказывает аспектное отношение лайнера на развитие его неустойчивости и можно ли при одних и тех же скоростях лайнера добиться более устойчивого его движения, изменяя аспектное отношение? В частности, что произойдет, если, не меняя массу лайнера, уменьшить его начальный радиус R по сравнению с начальным радиусом в экспериментах серии LD, в которых наблюдалось неустойчивое движение лайнеров? Расчеты показывают, что при этом возможно получение таких же скоростей лайнера, как и в экспериментах LD на том же радиусе измерительного узла, равном 1 см. Однако, поскольку в этом случае аспектное отношение R/d (d — толщина лайнера) значительно уменьшается (уменьшается количество толщин, проходимых лайнером), можно ожидать более устойчивого движения лайнера.

В эксперименте LDR предлагается уменьшить (по сравнению с экспериментами LD) начальный радиус лайнера с 5 до 3 см. Тогда при сохранении массы лайнера его толщина должна быть равна $d = 0,23$ см (в экспериментах LD $d = 0,13$ см).

В расчете LDR ток в установке “Atlas” менялся в соответствии с ее электротехнической схемой. Параметры схемы близки к параметрам в экспериментах LD. Форма полученной кривой тока несколько отличается от формы кривой в экспериментах LD (кривая 1 на рис. 6), что в основном обусловлено большей индуктивностью, вводимой в процессе имплозии лайнера. Максимальная сила тока в этом расчете LDR составила 18,2 МА.

Как показали одномерные расчеты, при уменьшении начального радиуса лайнера с сохранением его массы скорость движения его внутренней границы на приемном радиусе 1 см не меняется. Это объясняется тем, что разгон лайнера в расчетах LD в основном происходит в интервале времени, соответствующем уменьшению силы тока, а в расчете LDR сила тока на значительной части участка разгона лайнера близка к максимальной (в экспериментах LD и LDR при радиусах лайнеров, равных 2 см, $I \approx 8, 18$ МА).

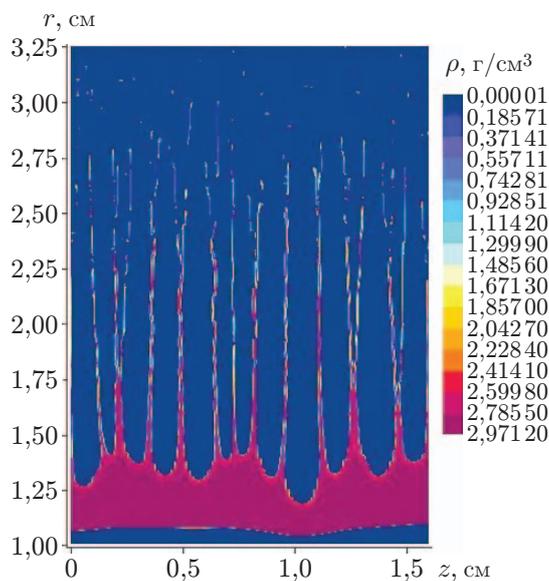


Рис. 8. Распределение плотности лайнера, полученное в расчете LDR для момента времени $t = 7,83$ мкс, соответствующего положению внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 1,3$ см

Несмотря на то что в расчетах LDR джоулев нагрев внешней поверхности существенно больше, чем в расчете LD (при радиусах лайнеров, равных 2 см, температура поверхности в расчете LDR составляет 0,46 эВ, в расчете LD — 0,26 эВ), зона, в которой температура превышает 0,1 эВ, что соответствует плавлению, в расчетах LDR 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 и количества проходимых лайнером толщин его состояние представляется менее подверженным развитию неустойчивости.

Для исследования устойчивости движения лайнеров проведены численные расчеты разгона лайнеров с учетом роста возмущений. В расчетах начальные возмущения с характерной величиной, определяемой разрешением расчетной сетки Δ , считались случайными. Теоретические аргументы, приведенные в п. 2, показывают, что возникающая при этом погрешность является незначительной. Фактически погрешность 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 несущественно.

На рис. 8 представлено распределение плотности, полученное в двумерном расчете LDR. Видно, что в расчете LDR лайнер является менее деформированным, чем в расчете LD (см. рис. 7, в).

Расчеты показали существенное различие степени развития возмущений, амплитуда a которых составляет: в расчете LD $a \approx 0,265$ мм, в расчете LDR $a \approx 0,026$ мм, т. е. на порядок меньше.

3.2. Развитие неустойчивости лайнера при наличии периодических возмущений. Исследуем возможность подавления роста неустойчивости путем создания на лайнере периодических возмущений с определенной длиной волны, так чтобы за время разгона возмущения не успевали разрушить лайнер, но могли подавлять рост хаотических возмущений.

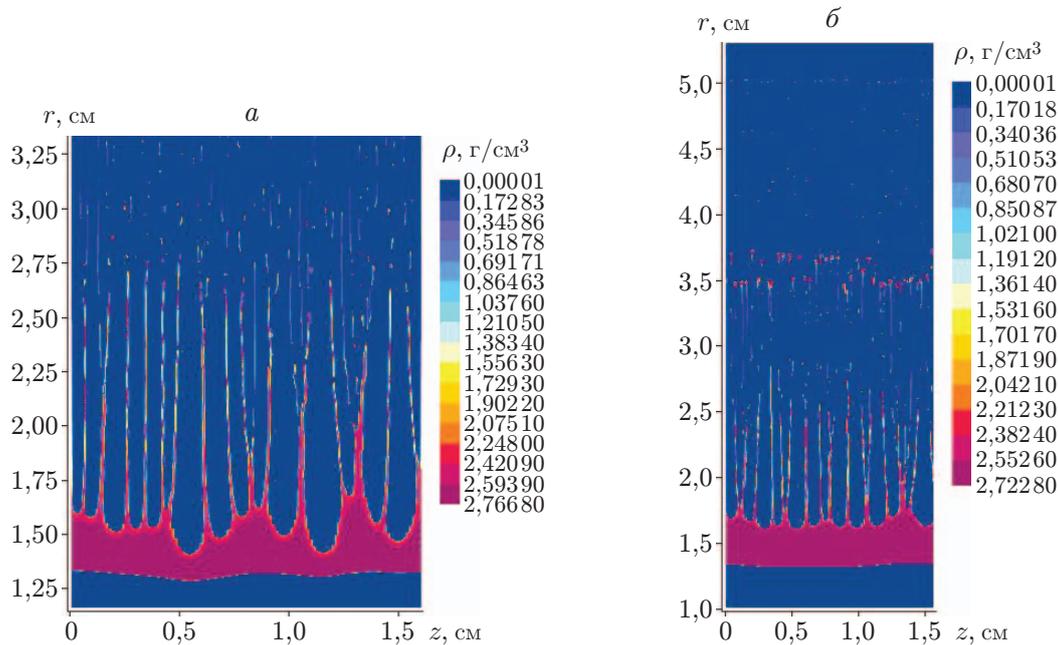


Рис. 9. Распределения плотности лайнера, полученные в расчетах LDP и LDP1 для моментов времени, соответствующих положению внутренней поверхности лайнера $R_{in} = 1,3$ см:

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

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 возмущений, создаваемых резцом в процессе изготовления лайнера. По результатам приближенных нуль-мерных расчетов начальные параметры периодического (синусоидального) возмущения были выбраны следующими: $\lambda^* = 0,4$ мм, $a_0 = 0,13$ мм.

Для моделирования полета лайнера с периодическими возмущениями (расчет LDP) использовалась та же кривая тока, что и в эксперименте LD (кривая 1 на рис. 6). Начальные возмущения представляли собой сумму синусоидальных возмущений с указанными выше параметрами и случайных возмущений, задаваемых в ячейках внешней поверхности.

На рис. 9, *a* представлены результаты, полученные в двумерном расчете LDP. Из результатов сравнения рис. 7, *б* и рис. 9, *a* 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 приблизительно одинакова (в расчете LDP $a \approx 0,27$ мм).

В расчете LDP внутренняя поверхность лайнера вследствие уменьшения его массы в результате развития периодических возмущений приобретает существенно бóльшую скорость (приблизленно равную 8,8 км/с), чем в расчете LD (7,4 км/с). Таким образом, в расчетах LD и LDP свойства лайнеров не эквивалентны. 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. Результаты расчета LDP1 представлены на рис. 9,б. Степень возмущения внешней поверхности лайнера на конечном радиусе в расчете LDP1 оказалась несколько меньше, чем в расчете LDP, а возмущение внутренней границы в расчете LDP1 приблизительно в два раза меньше ($a = 0,14$ мм), чем в расчетах LD ($a = 0,265$ мм) и LDP ($a = 0,27$ мм). Таким образом, создавая на поверхности лайнера периодические возмущения и одновременно увеличивая его толщину, можно несколько стабилизировать рост хаотических возмущений при сохранении свойств лайнера.

3.3. *Магнитная стабилизация неустойчивости Рэлея — Тейлора.* В работе [8] аналитически решена задача о неустойчивости Рэлея — Тейлора в случае, когда ускорение лайнера создается магнитным давлением. Показано, что для случая, когда магнитное поле имеет постоянное (по времени) направление, происходит анизотропная стабилизация роста возмущений, обусловленная натяжением магнитных силовых линий. Для возмущений, волновой вектор которых параллелен направлению магнитного поля, согласно [8] должно происходить уменьшение инкремента роста малых возмущений γ по сравнению с величиной классического инкремента ($\gamma_{RT} = \sqrt{kg}$). Как и следовало ожидать, стабилизирующее действие натяжения магнитных силовых линий оказывается тем сильнее, чем меньше длина волны. При этом рост коротковолновых возмущений ($\lambda < 4\pi d$) полностью подавляется ($\gamma = 0$). Однако если волновой вектор возмущений направлен под некоторым углом θ к магнитному полю, то при увеличении этого угла до значения $\theta = \pi/2$ магнитная стабилизация уменьшается и исчезает ($\gamma = \gamma_{RT}$). Указанные особенности обусловлены тем, что магнитные силовые линии, граничащие с возмущенной (волнистой) поверхностью хорошо проводящего лайнера, должны повторять форму поверхности, изгибаясь вместе с ней. При этом чем меньше длина волны синусоидального возмущения (при фиксированной амплитуде), тем больше сопротивление изгибу силовых линий.

Применительно к магнитной имплозии цилиндрических лайнеров полученные в [8] результаты означают следующее. Если цилиндрические лайнеры разгоняются под действием азимутального магнитного поля (z-пинч-геометрия), то магнитное поле подавляет рост коротковолновых возмущений с волновым вектором $\mathbf{k} = \mathbf{k}_\varphi$ (или уменьшает инкремент для длин волн, превышающих критическую длину волны), но возмущения с волновым вектором $\mathbf{k} = \mathbf{k}_z$ (азимутально-симметричные возмущения) растут так же, как в случае классической неустойчивости Рэлея — Тейлора. Если лайнер разгоняется под действием B_z -компоненты магнитного поля (θ -пинч-геометрия), то подавляются возмущения с волновым вектором $\mathbf{k} = \mathbf{k}_z$ и не подавляются возмущения с волновым вектором $\mathbf{k} = \mathbf{k}_\varphi$.

Как отмечено выше, рост возмущений в соответствии с классическим законом в отсутствие стабилизации (в случае тонких лайнеров ($R/d \geq 10$)) может приводить к разрушению лайнера при сжатии его до относительно малых радиусов. Поэтому представляет интерес выяснить, каким образом можно обеспечить магнитную стабилизацию роста возмущений при произвольном направлении волнового вектора \mathbf{k} . Для этого необходимо осуществить имплозию лайнера под действием магнитного поля, поворачивающегося на угол $\theta \approx 90^\circ$ [45]. Этот случай можно реализовать, поместив лайнер внутрь соленоида и пропуская через соленоид тот же ток, который проходит через лайнер вдоль оси системы. В результате лайнер будет ускоряться под действием двух взаимно перпендикулярных магнитных полей. Такая система отличается от обычно используемых систем с z-пинч-геометрией тем, что в ней обратный токопровод в окрестности лайнера заменяется на соленоид.

Плотность витков соленоида можно подобрать таким образом, чтобы аксиальная компонента магнитного поля B_z вблизи поверхности лайнера была больше азимутальной компоненты B_φ . На заключительной стадии имплозии при уменьшении радиуса лайнера R отношение B_φ/B_z вблизи лайнера возрастает вследствие увеличения значения $B_\varphi \sim 1/R$

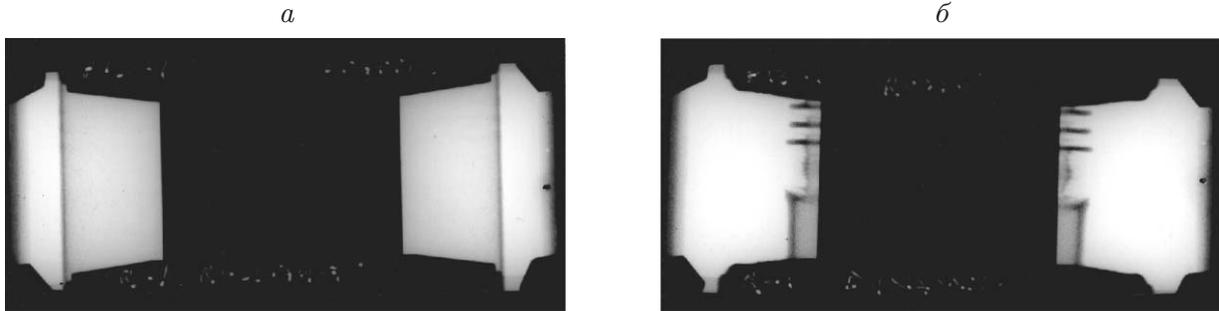


Рис. 10. Рентгенограммы лайнера в начальный момент (а) и в момент уменьшения радиуса в 1,5 раза (б)

и уменьшения значения B_z (при фиксированной силе тока). Уменьшение B_z обусловлено вхождением лайнера в пространство между токопроводящими электродами. Таким образом, если в начальном положении лайнера преобладающим было поле B_z , то на завершающей стадии имплозии преобладающим должно стать поле B_φ . При таком изменении направления магнитного поля на начальной стадии имплозии должен подавляться рост возмущений, волновой вектор которых направлен преимущественно вдоль оси z . На заключительной стадии имплозии должен подавляться рост возмущений, волновой вектор которых направлен преимущественно вдоль азимутального угла φ . Расчеты показывают, что в рассмотренном режиме имплозии лайнера при любом направлении волнового вектора возмущений \mathbf{k} возмущения растут менее существенно.

Для исследования магнитной стабилизации неустойчивости Рэля — Тейлора в 1999 г. в Лос-Аламосе был проведен эксперимент на установке “Pegasus-2” [46]. Эксперимент ставился следующим образом. Разгоняемый азимутальным магнитным полем (в z -пинч-геометрии) алюминиевый лайнер имел форму прямого кругового цилиндра с начальным радиусом 24 мм и начальной толщиной 0,5 мм. На верхней половине лайнера (рис. 10) на внешней поверхности были созданы азимутально-симметричные синусоидальные возмущения (в плоскости $r-z$) с амплитудой 0,05 мм и длиной волны $\lambda = 2$ мм. На нижней половине лайнера (см. рис. 10) возмущения имели те же длину волны и амплитуду, но угол между волновым вектором возмущений и магнитным полем составлял $\theta = 45^\circ$ (винтовые возмущения), в то время как на верхней половине $\theta = 90^\circ$. В указанных условиях азимутально-симметричные возмущения должны расти в соответствии с классической теорией Рэля — Тейлора с инкрементом $\gamma = \sqrt{k g}$ [8], поскольку эти возмущения не искривляют магнитные силовые линии и магнитная стабилизация не оказывает на них существенного влияния. При этом винтовые возмущения с указанными значениями λ и θ не будут расти, поскольку критерий подавления роста возмущений

$$\lambda < \lambda_{cr} = 4\pi d \cos^2 \theta,$$

полученный в [8], выполняется с двойным запасом ($\lambda \approx 2$ мм, $\lambda_{cr} \approx 4$ мм).

На рис. 10 представлены рентгенограммы, полученные в эксперименте. На рис. 10,а показаны лайнер в начальном положении и геометрия лайнерного узла. Возмущения лайнера не видны вследствие их малой амплитуды. Рентгенограмма на рис. 10,б соответствует моменту времени, когда радиус лайнера уменьшается в 1,5 раза. Видно, что амплитуда азимутально-симметричных возмущений увеличилась от значения, в 10 раз меньшего толщины лайнера, до значения, в несколько раз превышающего ее, при этом существенного роста винтовых возмущений не наблюдается. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов, выполненных с использованием теории [8],

и подтверждают наличие анизотропной магнитной стабилизации неустойчивости Рэлея — Тейлора.

3.4. *Подавление неустойчивости Рэлея — Тейлора путем покрытия поверхности металлического лайнера слоем пластика.* Лайнерные эксперименты, проведенные на установке Z в Сандийских национальных лабораториях (США), показали, что развитие магнитной неустойчивости Рэлея — Тейлора можно подавить [44], если на внешнюю поверхность лайнера нанести слой диэлектрика достаточно большой толщины ($\delta = 70$ мкм).

Заключение. В работе приведен обзор экспериментальных и теоретических исследований неустойчивости Рэлея — Тейлора, возникающей при имплозии лайнеров. Рассмотрены следующие способы подавления этой неустойчивости:

- уменьшение аспектного отношения R/d лайнера при сохранении его массы;
- создание на поверхности лайнера периодических возмущений с определенной длиной волны, так чтобы за время разгона возмущения не успевали разрушить лайнер, но могли подавлять рост хаотических возмущений;
- использование магнитной стабилизации;
- использование соударения лайнеров, в результате которого внутренний лайнер оказывается менее возмущенным, чем налетающий;
- использование вращения лайнера и возникающего при этом центробежного ускорения;
- покрытие поверхности металлического лайнера слоем пластика.

Авторы выражают благодарность С. Д. Кузнецову за помощь в подготовке рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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. megagauss magnetic field generation and related topics, Moscow — St.-Petersburg, 2002. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2004. P. 696–705.
2. **Reinovsky R. E., Atchison W. L., Rousculp C., Kaul A.** Pulsed high magnetic fields for exploring the dynamic properties of materials // Proc. of the 13th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Suzhou (China), 6–9 July 2010. Chángsha: Nat. Univ. Defense Technol., 2012. P. 44–45.
3. **Boffetta G., Mazzino A.** Incompressible Rayleigh — Taylor turbulence // Annual Rev. Fluid Mech. 2017. V. 49. P. 119–143.
4. **Velikovich A. L.** Mitigation of Rayleigh — Taylor instability in high-energy density plasmas. A personal perspective // Abstr. book of the 42nd IEEE Intern. conf. on plasma science, Belek, Antalya (Turkey), 24–28 May 2015. S. l.: IEEE, 2015. P. 621.
5. **Taylor G. I.** The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. 1 // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1950. V. 201, N 1065. P. 192–196.
6. **Lewis D. J.** The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. 2 // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1950. V. 202, N 1068. P. 81–96.
7. **Ландау Л. Д.** Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1986.
8. **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.
9. **Гаранин С. Ф.** Физические процессы в системах МАГО-МТФ. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2012.
10. **Ott E.** Nonlinear evolution of the Rayleigh — Taylor of thin layers // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 29, N 21. P. 1429–1432.

11. **Garabedian P. B.** On steady-state bubbles generated by Taylor instability // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1957. V. 241, N 1226. P. 423–431.
12. **Birkhoff G., Carter D.** Rising plane bubbles // J. Math. Mech. 1957. V. 6, N 6. P. 769–779.
13. **Baker G. R., Meiron D. I., Orszag S. A.** Vortex simulations of the Rayleigh — Taylor instability // Phys. Fluids. 1980. V. 23. P. 1485–1490.
14. **Gardner C. L., Glimm J., McBryan O., et al.** The dynamics of bubble growth for Rayleigh — Taylor unstable interfaces // Phys. Fluids. 1988. V. 31, N 3. P. 447–465.
15. **Haan S. W.** Onset of nonlinear saturation for Rayleigh — Taylor growth in the presence of a full spectrum of modes // Phys. Rev. A. 1989. V. 39, N 11. P. 5812–5825.
16. **Reinovsky R. E., Anderson W. E., Atchison W. L., et al.** Instability growth in magnetically imploded high-conductivity cylindrical liners with material strength // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30, N 5. P. 1764–1776.
17. **Sinars D. B., Slutz S. A., Herrmann M. C., et al.** Measurements of magneto-Rayleigh — Taylor instability growth during the implosion of initially solid metal liners // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. 056301.
18. **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.
19. **Гаранин С. Ф., Старцев А. И.** Численное моделирование нелинейного роста локализованных возмущений с углами при неустойчивости Рэлея — Тейлора // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1992. № 3. С. 6–9.
20. **Garanin S. F.** Self-similar evolution of Rayleigh — Taylor instability in the corner-point regions // Proc. of the 5th Intern. workshop on compressible turbulent mixing, Stony Brook, N. Y., 1995. Singapore; New Jersey; L.; Hong Kong: World Sci., 1995. P. 33–39.
21. **Дьяченко В. Ф., Имшенник В. С.** Двумерная магнитогиродинамическая модель плазменного фокуса Z-пинча // Вопросы теории плазмы: Сб. ст. М.: Атомиздат, 1974. Вып. 8. С. 164–246.
22. **Вихрев В. В., Брагинский С. И.** Динамика Z-пинча // Вопросы теории плазмы: Сб. ст. М.: Атомиздат, 1980. Вып. 10. С. 243–318.
23. **Гаранин С. Ф., Амеличева О. А., Буренков О. М. и др.** Релаксация двумерного магнитогиродинамического течения поперек магнитного поля (двумерного гидродинамического течения) в ограниченной области // Журн. эксперим. и теорет. физики. 2003. Т. 124, № 1. С. 70–79.
24. **Гаранин С. Ф., Кравец Е. М., Пронина О. М., Стадник А. Л.** Неустойчивость Рэлея — Тейлора в двумерном случае // Проблемы физики высоких плотностей энергии: Тр. междунар. конф. “12-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 2010 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010. С. 235–239.
25. **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. № 4. С. 42–50.
26. **Буйко А. М., Zmushko V. V., Mokhov V. 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 (USA), June 27–30, 1999. S. 1., 1999. P. 1145–1148.
27. **Reinovsky R. E.** Pulsed power experiments in hydrodynamics and material properties // Digest of tech. papers 12th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey (USA), June 27–30, 1999. S. 1., 1999. P. 38–43.

28. **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. Las Vegas (Nevada): Inst. of Electric. and Electron. Engrs, Inc., 2001. P. 516–519.
29. **Keinigs R. K., Atchison W. L., Anderson W. E., et al.** Material science experiments on the Atlas facility // Digest of tech. papers: Pulsed power plasma science — 2001. Las Vegas (Nevada): Inst. of Electric. and Electron. Engrs, Inc., 2001. P. 356–360.
30. **Garanin S. F., Mamyshev V. I., Yakubov V. B.** The MAGO system: current status // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34, N 5, pt 3. P. 2273–2278.
31. **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. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2004. P. 730–737.
32. **Sinars D. B.** Magneto-inertial fusion research in the United States: A promising prospect // Abstr. book of the 42nd IEEE Intern. conf. on plasma science, Belek, Antalya (Turkey), 24–28 May 2015. S. 1.: IEEE, 2015. P. 245.
33. **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.
34. **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 related topics, Moscow — St.-Petersburg, 2002. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2004. P. 710–717.
35. **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.
36. **Софронов И. Д., Винокуров О. А., Змушко В. В. и др.** Комплекс программ МИМОЗА. Решение многомерных задач гидродинамики // Вопросы математического моделирования, вычислительной математики и информатики: Сб. науч. тр. М.; Арзамас-16: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1994. С. 94–96.
37. **Buyko A. M., Garanin S. F., Zmushko V. V., et al.** 2D computations for perturbation growth of magnetically driven cylindrical aluminum and aluminum alloy liners // Proc. of the 7th Intern. workshop phys. compressible turbulent mixing, St.-Petersburg (Russia), 1999. Sarov: Inst. of Exp. Phys., 2001. P. 237–243.
38. **Раевский В. А., Лебедев А. И., Низовцев П. Н. и др.** Исследования неустойчивости Рэля — Тейлора в меди и алюминии при давлениях до 45 ГПа и при скоростях деформирования $105\text{--}108\text{ с}^{-1}$ // Тез. докл. Междунар. конф. “5-е Харитоновские тематические чтения: Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях”. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2003. С. 180–181.
39. **Батьков Ю. В., Князев В. Н., Новиков С. А. и др.** Сдвиговая прочность алюминия при безударном сжатии // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 115–118.
40. **Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В. и др.** Анализ возможностей стабилизации имплозии конденсированных лайнеров // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 3. С. 3–14.
41. **Павловский А. И., Быков А. И., Долотенко М. И. и др.** Кумуляция сверхсильных магнитных полей // Высокие плотности энергии: Сб. науч. тр. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 446–468.
42. **Davis J., Gondarenko N. A., Velikovich A. L.** Fast commutator of high current in double wire array Z-pinch loads // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 170–172.
43. **Book D. L., Turchi P. J.** Dynamics of rotationally stabilized implosions of compressible liquid shells // Phys. Fluids. 1979. V. 22. P. 68–78.

-
44. **Peterson K. J., Awe T. J., Yu E. P., et al.** Electrothermal instability mitigation by using thick dielectric coatings on magnetically imploded conductors // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. 135002(5).
 45. **Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Mokhov V. N., 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 (USA), 1998. Singapore: World Sci., 2004. P. 563–567.
 46. **Anderson B. G., Anderson W. E., Atchison W. L., et al.** Liner experiment on verification of Rayleigh — Taylor instability magnetic stabilization effect (joint LANL/VNIIEF experiment Pegasus-2) // Digest tech. papers: Pulsed power plasma science — 2001. Las Vegas (Nevada): Inst. of Electric. and Electron. Engrs, Inc., 2001. P. 354–355.

*Поступила в редакцию 15/XI 2016 г.,
в окончательном варианте — 11/I 2017 г.*
