

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ЛАЙНЕРОВ С ТОКОПОДВОДЯЩИМИ СТЕНКАМИ

А. М. Буйко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Представлен обзор публикаций по численному моделированию одного из основных двумерных эффектов, возникающих при магнитной имплозии цилиндрических конденсированных лайнеров – их взаимодействия с торцевыми стенками. Рассматриваются лайнеры, ускоряемые до 8–20 км/с токами 30–100 МА от дисковых взрывомагнитных генераторов – при индукции азимутальных магнитных полей 1–6 МГс (магнитных давлениях 0,04–1,4 Мбар), – экспериментальные лайнеры HEL-1, ALT-1,2 и лайнеры HEL-2, ALT-3, предложенные для исследований в области физики высоких плотностей энергии.

Введение

Имплозия цилиндрических конденсированных лайнеров – под действием азимутальных магнитных полей – используется со многими целями, например: сжатие аксиального магнитного поля для увеличения его индукции (рис. 1а); сжатие замагниченной плазмы для увеличения ее внутренней энергии; изэнтропическое сжатие веществ; измерение прочности материалов по росту возмущений [2,6,11]; изучение сходящихся ударных волн в слоистых системах, см. рис. 1б; изучение неустойчивости лайнеров и их взаимодействия с торцевыми стенками [2–12, 14–21], см. рис. 1с и рис. 2; получение давлений 5–30 Мбар для измерений ударных адиабат веществ – эксперименты ALT-1,2 и HEL-1 [9,10], проекты экспериментов HEL-2 [3,8,11] и ALT-3 [13];

Магнитная имплозия лайнеров имеет ряд преимуществ по сравнению с имплозией от взрывчатки, – таких как практически мгновенное (со скоростью света) выравнивание магнитного давления на лайнер, плавный разгон лайнеров (без образования ударных волн), более высокие давления и возможности регулировать их величины и времена нарастания. При имплозии рассматриваемых лайнеров – в z -пинч-геометрии – магнитное давление $P_B(z,t)$ и индукция магнитного поля $B(z,t)$, как правило, растут со временем монотонно до величин 1–6 МГс и 0,04–1,4 Мбар, которые удобно оценивать по формулам [см, МА, МГс, Мбар]:

$$P_B(z,t) = B^2(z,t)/8\pi, \quad B(z,t) = I(t)/5R(z,t), \quad (1)$$

где $I(t)$ – ток, протекающий по лайнеру, $R(z,t)$ – наружный радиус лайнера. При одномерном и двумерном (1D и 2D) моделировании имплозии можно использовать гидродинамическое (ГД) приближение – не учитывать магнитную диффузию и полагать давление (1) действующим на поверхность $R(z,t)$, – если толщина лайнера $\Delta_l(z,t)$ намного больше толщины скин-слоя $\Delta_B(z,t)$.

В противном случае следует применять магнитную гидродинамику (МГД): индукция поля $B(z,t)$ действует на границу $R(z,t)$, а давление $P_B(z,t)$ – результат действия объёмных сил, пропорциональных $[jB]$, где j – плотность тока.

Наиболее сильные взрывомагнитные генераторы (ВМГ) ВНИИЭФ – дисковые ВМГ – уникальные устройства для разгона лайнеров, см. табл. 1. В эксперименте HEL-1 [10] такой ВМГ $\varnothing 1$ м обеспечил в Al-лайнере ток ~ 105 МА за время $\tau_{ef} \sim 40$ мкс ($B \sim 1$ МГс, см. рис. 3а) и скорость ~ 8 км/с лайнера массой ~ 1 кг (кинетическая энергия $E_{кин} > 20$ МДж!). В экспериментах ALT-1,2 [9] – с дисковым ВМГ $\varnothing 0,4$ м и электровзрывным открывающим ключом – токи в Al-лайнере достигали 31–32 МА ($\tau_{ef} \sim 2$ мкс, $B \sim 2$ МГс, см. рис. 3б), скорость лайнера – 12 км/с. Был предложен ряд аналогичных устройств с более высокими характеристиками. Так, в устройстве ALT-3 [13], аналогичном ALT-1,2, возможны токи 60–70 МА и магнитная индукция до 6 МГс, при которых Al-лайнер толщиной 3 мм можно разгонять до ~ 20 км/с, см. рис. 3с. Температура вблизи наружной

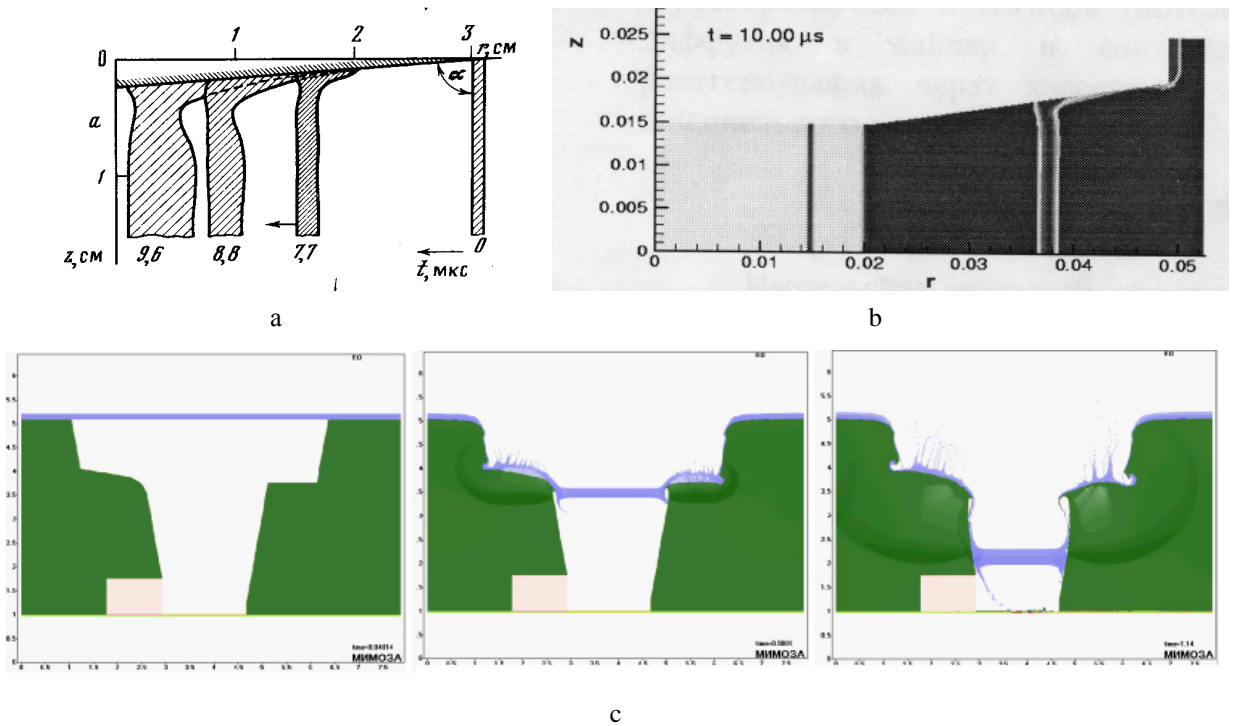


Рис. 1. Импульсия Al-лайнеров на конденсаторных установках. а) 2D ГД расчет сжатия магнитного поля [1]; б) 2D МГД расчет импульсии в эксперименте NTLX на установке Shiva Star [7]; в) 2D МГД расчет макета камеры МАГО, предложенной для сжатия замагниченной плазмы (проект RUS-8 для установки Atlas: $I_{\text{max}} = 22 \text{ MA}$, $\tau_{ef} = 4 \text{ мкс}$; $R_l = 5 \text{ см}$, $\Delta_l = 2 \text{ мм}$) [11]

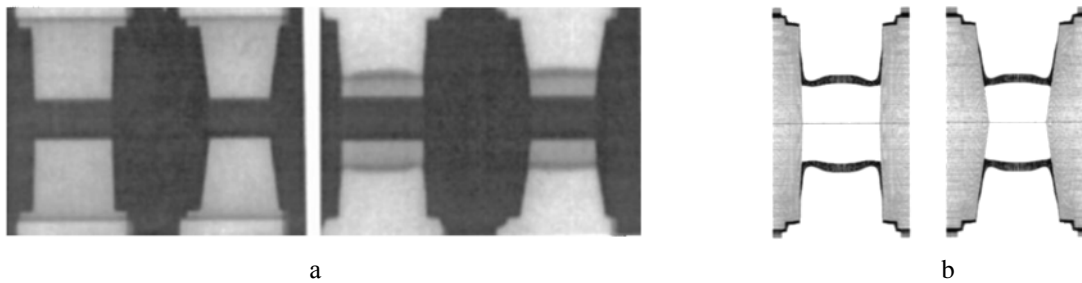


Рис. 2. Рентгенограммы (а) и 2D ГД расчеты импульсии (б) двух лайнеров – с углами наклона стенок $\theta = 2^\circ$ и 8° , – эксперимент LT-1 с ВМГ [4]

поверхности лайнера может достигать в конце импульсии 15 эВ, но его внутренняя зона, ~40 % массы, остается в твердом динамически упрочненном состоянии (рис. 3d): здесь температура $T < T_{\text{пл}} \sim 0,34 \text{ эВ}$ и предел текучести $Y < 4 \text{ ГПа}$ (в нормальных условиях температура плавления $T_{\text{пл}} \sim 0,08 \text{ эВ}$, $Y_0 = 0,27 \text{ ГПа}$). При замене этой зоны лайнера на более плотные материалы близкой массы скорость лайнера сохранится, и можно по-

лучать ударно-волновые давления 10–30 Мбар (Fe-Fe^1 , Mo-Mo , W-W ,...) [5, 9, 11–13].

¹ Особый интерес к железу связан с тем, что ударно-волновые экспериментальные данные для большинства материалов были получены относительно «эталонных данных» для железа, которые – при скоростях соударений ~20 км/с (давлениях ~10 Мбар) – были получены на пределе возможностей лабораторных устройств и нуждаются в уточнении.

Таблица 1

Основные параметры экспериментальных и предложенных (HEL-2р,2, ALT-3) лайнеров

Лайнер	R_l см	Δ_l см	R_{imp} см	H_l см	S_l/Δ_l	S_l/H_l	m_l г/см	$I_{max}(\tau_{ef})$ МА(мкс)	B_{max} МГс	v_{imp} км/с	$\theta(Z)$ град.
Рис. 1а	2.9	0.1	0.15	8.5	26.5	0.3	4.8	9.5(5)	1.5	-	6
NTLX	5.0	0.1	2.0	4.0	29	0.7	8.4	16 (5)	0.8	6	10
LT-1	3.0	0.1	0.6	2.4	23	1	5.0	5 (40)	1	5	2-8(Cu)*
Pegas [2]	2.4	0.04	>0.6	2.0	<44	<0.9	1.6	>4 (4.5)	>1	>4.2	8*
HEL-1	24	0.4	5.5	10	45	1.8	160	105 (40)	1	8	6 (Fe)
ALT-1,2	4.0	0.2	1.0	4.0	14	0.7	13	31 (2)	2	12	8 (Cu)*
HEL-2р	10	1.0	1.0	8.0	8	1	160	90(40)	5	14	0(Cu)*
HEL-2 ALT-3	7.0	0.42	1.0	6.0	13	0.9	70	80(12)	4	14	2(Fe)*
	4.0	0.3	1.0	4.0	9	0.7	19	66(2)	6	20	0(Cu)*

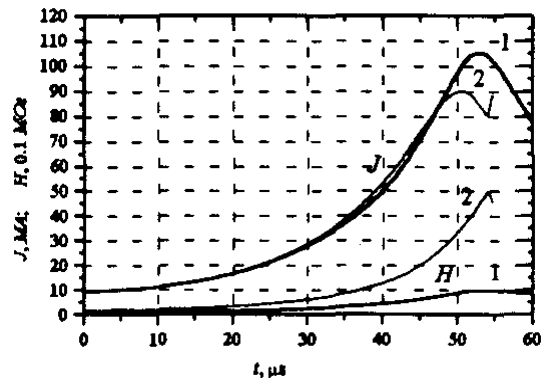
Обозначения в табл. 1: R_l и R_{imp} (v_{imp}) – наружный и приемный радиусы (скорость соударения); H_l и Δ_l – высота и толщина Al-лайнеров (исключение – двухслойный лайнер HEL-2: $\Delta_l = 3,5$ мм (Al) + 0,7 мм (Mo)); $S_l = R_l - \Delta_l - R_{imp}$; m_l – погонная масса лайнера; $I_{max}(\tau_{ef})$ – максимальный ток (время нарастания от 0,1 до 0,9 его величины); B_{max} – максимальная индукция поля на лайнере; $\theta(Z)$ – угол наклона (материал) стенок, * – наличие на стенках «ступенек» ($\theta = 90^\circ - \alpha$, см. рис. 1а).

По основным параметрам лайнеров (см. табл. 1) можно оценивать условия, необходимые для слабого влияния стенок на имплозию и для устойчивости имплозии лайнеров, – например, используя формулы (2) и (3)². Условие (2) нарушается лишь для лайнеров HEL-1, HEL-2р, LT-1, при имплозии которых влияние стенок охватывает лайнеры целиком, см. рис. 2 и раздел 1.

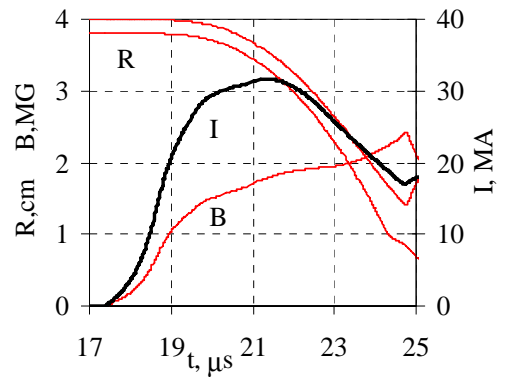
$$S_l = (R_l - \Delta_l - R_{imp}) < H_l \quad (2)$$

$$S_l = (R_l - \Delta_l - R_{imp}) < 30\Delta_l \quad (3)$$

² В условии (3) коэффициент 30 соответствует эксперименту NTLX, см. табл. 1. Он втрое превышает аналогичный коэффициент в известной оценке для жидкостей: в лайнерах обычно остается нерасплавленная твердотельная зона, которая может сдерживать развитие неустойчивости тем сильнее, чем больше эта зона. Поэтому коэффициент в (3) может и превышать 30 (как в лайнере Pegas при токе 4МА, см. табл. 1), и быть существенно меньше (тот же лайнер Pegas при токе 12МА неустойчив [2]).



а)



б)

Рис. 3. 1D МГД расчеты имплозии Al-лайнеров. а) ток и индукция магнитного поля на лайнерах HEL-1 и HEL-2р (кривые 1 и 2) [3,10]; б,с) ток и магнитная индукция на лайнерах ALT-1,2 и ALT-3, (R-t) диаграммы границ этих лайнеров [9,12,13]; д) профили плотности ρ , магнитной индукции B , температуры T и предела текучести Y в лайнере ALT-3 перед соударением ($R_{imp} = 1$ см, $v_{imp} \sim 20$ км/с) [13]

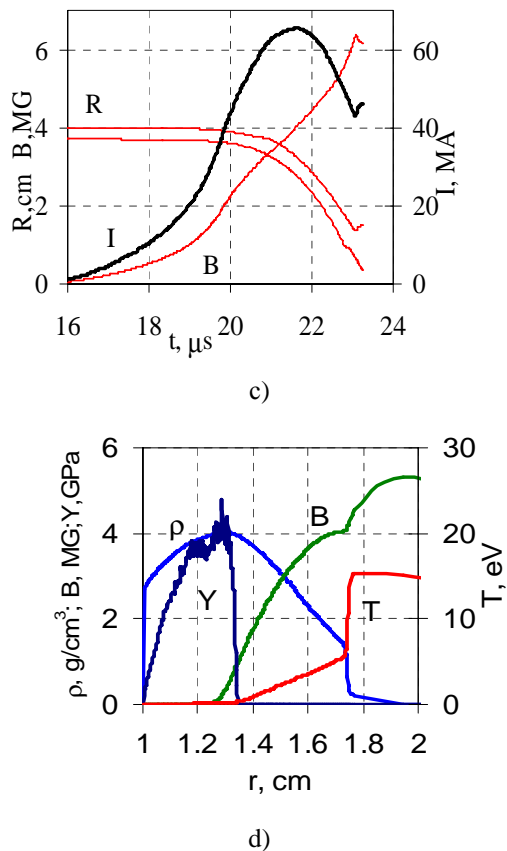


Рис. 3. (окончание)

Но желательная одномерная картина имплозии лайнера нарушается такими двумерными явлениями, как развитие неустойчивости типа Рэлея-Тейлора (моделируемое начальными возмущениями) и взаимодействие с торцевыми стенками, которое лучше моделировать без начальных возмущений, чтобы выявить влияние на имплозию именно стенок [2–12, 14–21]. Так, для лайнера ALT-3 были найдены две тестовые формы стенок – с углом наклона $\theta = 0^\circ$ или со «ступенькой» или с «зубом», – по предварительным (рис. 4а) или по уточненным (рис. 4б) двумерным расчетам имплозии этого лайнера (с тестовым током I_4 , близким к рис. 3д).

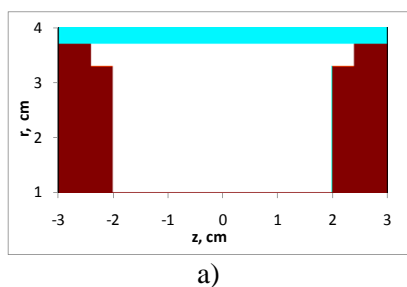
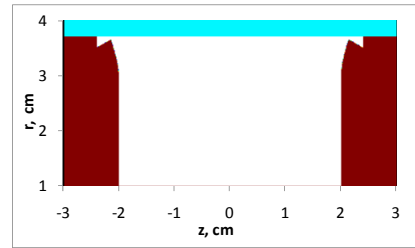


Рис. 4. Схемы лайнера ALT-3 с различными стенками: тест 1 [14,16] (а) и тест 2 [16,18] (б).



b)

Рис. 4. (окончание)

Предварительные (упрощенные) 2D расчеты лайнерной имплозии проводились в ГД и в МГД приближениях – по лагранжево-эйлеровой методике МИМОЗА [22,6] и по лагранжевым кодам ДРАКОН [23] и ТИМ-2D [24], – с использованием уравнений состояния (УРС) Ми – Грюнайзена, линейной зависимости удельного сопротивления от внутренней энергии, упруго-пластических моделей сдвиговой прочности [25] или [26]. Уточненные 2D МГД расчеты имплозии проводились по методике МИМОЗА – с описанием алюминия широкодиапазонным комплексом «УРС-проводимость» [27], согласованным с моделью прочности [26]. На начальной стадии таких расчетов использовалась лагранжева сетка, затем – эйлерова [12]. Аналогичный подход применялся в расчетах по коду ARES [17,20]. Проводились также расчеты на эйлеровых сетках [5,12,19].

В настоящей работе представлены и обсуждаются двумерные расчеты имплозии, моделирующие взаимодействие лайнеров с торцевыми стенками (без учета начальных возмущений). Рассматриваются экспериментальные и предложенные «высокоэнергетические лайнеры» HEL-1 и HEL-2p,2, ускоряемые токами дисковых ВМГ $\varnothing 1$ м и 0,4 м ($\tau_{ef} \sim 40$ и ~ 12 мкс), и лайнеры ALT-1,2,3 («передовые лайнерные технологии») – в устройствах с дисковым ВМГ $\varnothing 0,4$ м и открывающим ключом ($\tau_{ef} \sim 2$ мкс).

Имплозия лайнеров HEL-1 и HEL-2p,2

Эксперимент HEL-1. Параметры лайнера из сплава АМг-6 и стенок (см. табл. 1) выбирались с учетом двумерных ГД расчетов имплозии, – под действием магнитного давления (1) при токе амплитудой 135МА, аналогичном кривой 1 на рис. 3а. Результаты таких расчетов ВНИИЭФ – по различным методикам, с различными материалами и формами стенок (аналогичные расчетам импло-

зии лайнера LT-1, см. рис 2) – были качественно близки к рис. 5а. Расчеты дают хороший контакт лайнера со стенкой в процессе имплозии, но влияние стенок охватывает весь лайнер и приводит в конце имплозии к существенному опережению приторцевых зон лайнера – из-за роста приторцевых возмущений и развития неустойчивости (условия (2) и (3) здесь не выполняются, см. табл. 1). Результаты двумерных МГД расчетов имплозии лайнера с близким к эксперименту током (рис. 3а, кривая 1) приведены на рис. 5б-е. В уточненном расчете ВНИИЭФ (рис. 5б) величина продольной асинхронности соударения лайнера с приемником $\tau_{imp} \sim 2$ мкс (продольная асимметрия $\Delta R_{imp} \sim \tau_{imp} v_{imp} \sim 0,3 R_{imp}$), что близко к эксперименту. Расчет с несколько меньшими проводимостью и пределом текучести ($Y_0 = 1,0$ вместо 1,5 кбар) [6] дает заметно большее влияние стенок, близкое к расчету ЛАНЛ, ср. рис. 5с и рис. 5d. Расчет ЛЛНЛ (рис. 5е), вероятно, занижает влияние стенок на имплозию.

Устройство HEL-2 проектировалось для разгона лайнера до 14км/с и получения давлений ~ 10 Мбар при соударениях молибден-молибден [8]. Но после эксперимента HEL-1 оставался вопрос: можно ли непосредственно от дискового ВМГ $\varnothing 1$ м получить синхронное соударение лайнера с приемником? 2D ГД расчеты по коду ДРАКОН (с учетом джоулева нагрева лайнера из 1D МГД расчетов) дали положительный ответ на этот вопрос, – например, для Al-лайнера HEL-2р с параметрами имплозии, приведенными в табл. 1. Этот лайнер под действием тока 90 МА ($B \sim 5$ МГс, см. рис. 3а, кривые 2) имеет практически синхронное соударение со скоростью ~ 14 км/с (условие (2) выполнено, $S_i/H_i = 1,0$), – в отличие от такого же лайнера высотой $H_i = 4$ см, ср. рис. 6а и рис. 6б. Требуемое ударно-волновое давление ~ 10 Мбар можно получить, заменив лайнер HEL-2р на двухслойный (Al+Mo)-лайнер с близкой массой, и вновь подобрав форму стенок по двумерным МГД расчетам имплозии.

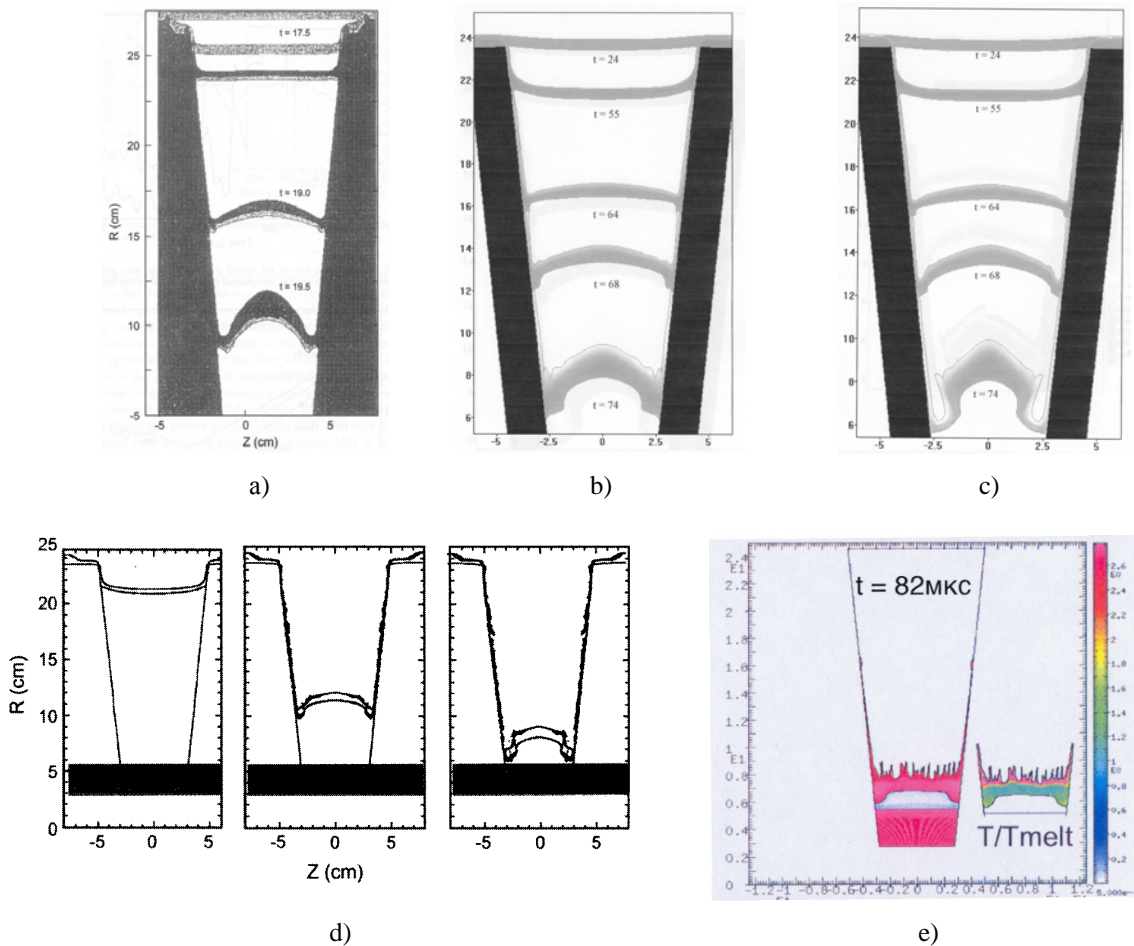


Рис. 5. Результаты 2D расчетов имплозии лайнера HEL-1: ГД расчет [10] (а) и МГД расчеты по методике МИМОЗА (б,с); МГД расчеты на эйлеровых сетках из работ [10] (d) и [17] (е)

Для эксперимента HEL-2 – с дисковым ВМГ $\varnothing 0,4$ м, обеспечивающим ток ~ 80 МА за время $\tau_{ef} \sim 12$ мкс ($B \sim 4$ МГс) – были подобраны параметры, приведенные в табл. 1. Двухслойный Al+Mo лайнер, в отличие от других лайнеров, размещался между стенками (Al-слой – вплотную, Mo-слой – с зазором 1 мм). 2D МГД расчеты имплозии этого лайнера по методике МИМОЗА (рис. 6с) дают хороший его контакт со стенкой в процессе имплозии и малую продольную асинхронность соударения при скорости ~ 14 км/с ($E_{кин} = 24$ МДж). Влияние стенок на имплозию мало – условие (2) выполнено: $S_l/H_l = 0,9$ (условие (3) тоже выполнено, $S_l/\Delta_l = 13$).

Имплозия лайнеров ALT-1,2 и ALT-3

Эксперименты ALT-1,2 [9] выполнили основные цели: получены токи 31–32 МА (рис. 3б), близкие к току установки ATLAS [5], и практически синхронное соударение Al-лайнера с приемником при скорости ~ 12 км/с. Параметры лайнера и стенок указаны в табл. 1 (на стенках – «ступенька» 4 мм \times 4 мм, см. рис. 7а, 8а). Результаты предварительных МГД расчетов имплозии этого лайнера (рис. 7а-с): в процессе имплозии – хороший контакт со стенками; в конце имплозии – скорость ~ 12 км/с и практически синхронное соударение, что близко к эксперименту (условия (2) и (3) вы-

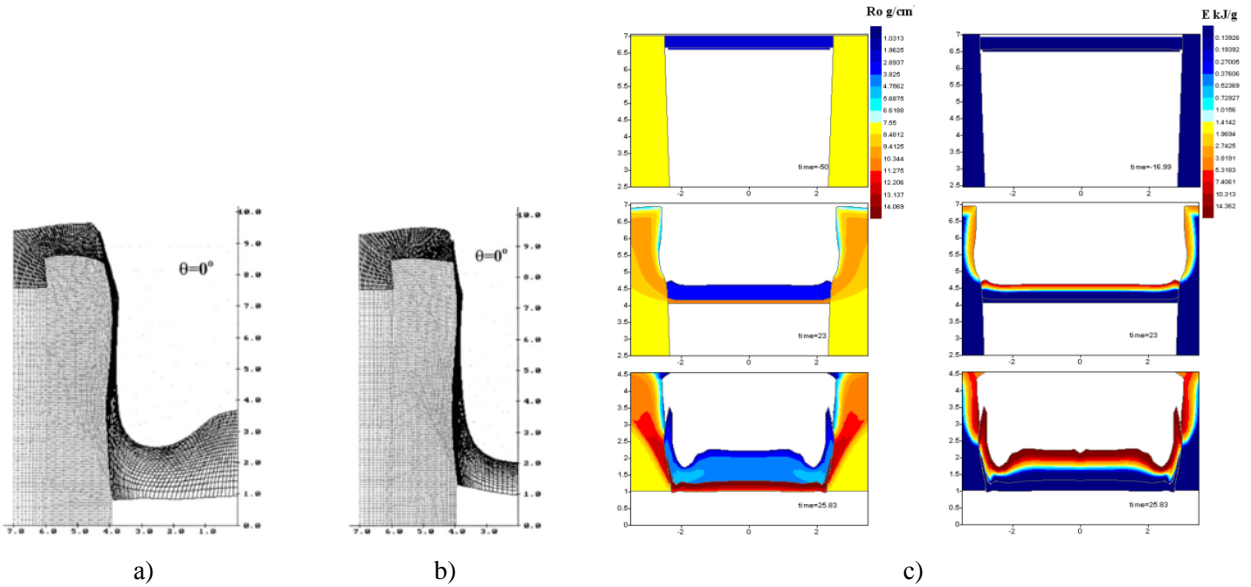


Рис. 6. а,б) 2D ГД расчеты лайнера HEL-2р и такого же лайнера высотой $H_l = 4$ см [3]; в) 2D МГД расчет лайнера HEL-2 [8, 11] – изокарты плотности и джоулева нагрева (слева и справа) в процессе имплозии (сверху вниз)

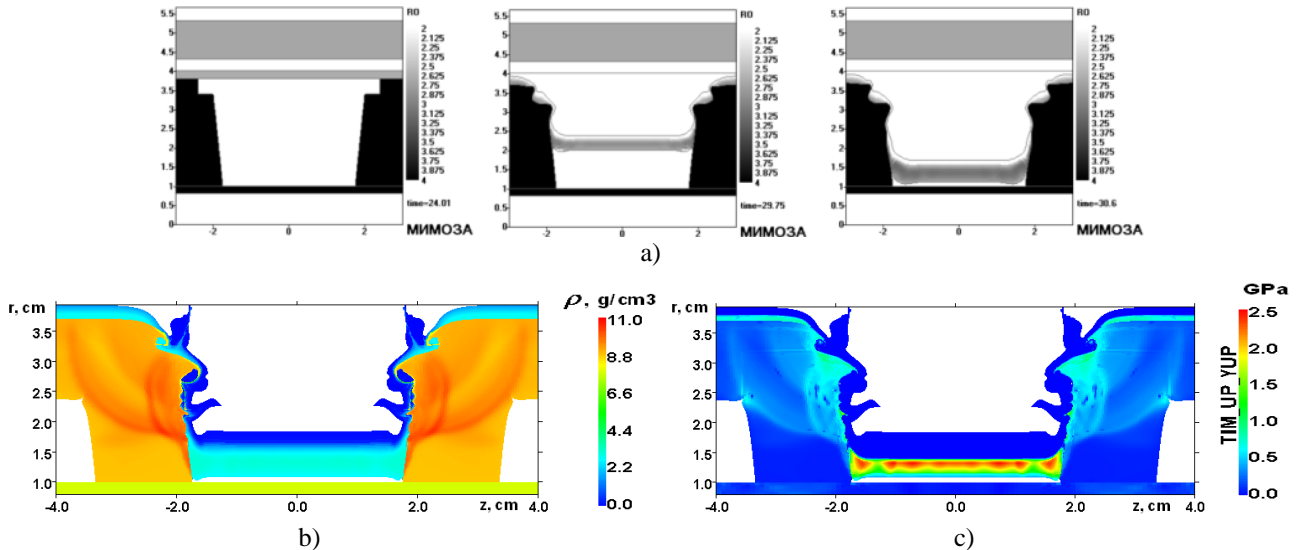


Рис. 7. Двумерные МГД расчеты имплозии лайнера ALT-1,2 на лагранжевых сетках: а) изокарты плотности в процессе имплозии (слева направо), методика МИМОЗА [8, 11]; б, в) изокарты плотности и предела текучести в конце имплозии, код ТИМ-2D

полнены); ~40 % массы лайнера остается в твердом состоянии, см. рис. 7с.

Уточненные 2D МГД расчеты имплозии лайнера ALT-1,2 – с близким к эксперименту током (рис. 3b) – подтвердили основные результаты предварительных расчетов, но также выявили (рис. 8a,b) небольшую задержку контакта всего лайнера со стенкой (из-за образования полости между ними) и возмущения наружной поверхности лайнера (из-за взаимодействия лайнера со стенками и погрешностей расчетов). Возмущения растут со временем из-за развития неустойчивости тем сильнее, чем ближе стенка и меньше h , см. рис. 8b. Они слабо проявляются на основной длине лайнера, но заметно – вблизи торцов: здесь они могут усиливать эффекты взаимодействия лайнера со стенкой, включая опережение пристеночной зоны внутренней поверхности лайнера (сходимость результатов по h отсутствует, что указывает на погрешности расчетов). Расчеты ЛАНЛ имплозии близкого лайнера, проектировавшегося для установки ATLAS ($I_{max} = 27,5$ МА, $\tau_{ef} = 2,3$ мкс; $R_l = 3,9$ см, $\Delta_l = 2$ мм; $\theta = 8^\circ$ (W)), дают более сильный рост приторцевых возмущений, включая струеобразование, см. рис. 8с.

Устройство ALT-3 [13] – аналог ALT-1,2 – разрабатывается для проверки эффективности магнитной имплозии лайнера при токах 60–70 МА ($B \sim 6$ МГс, рис. 3с) и возможности высокоточных ударно-волновых измерений при скорости ~20 км/с и давлениях до 10 Мбар. Лайнер отличается от Al-лайнера ALT-1,2 увеличенной до 3мм толщиной. Влияние стенок на имплозию мало – условие (2) выполнено, $S_l/H_l = 0,7$ (условие (3) тоже выполнено, $S_l/\Delta_l = 9$). Предварительно выбранные формы Cu-стенок с углом наклона $\theta = 0^\circ$ (рис. 4) обеспечивают к концу имплозии приемлемую форму внутренней поверхности лайнера, без опасного струеобразования (рис. 9а), – в отличие от стенок без «ступенек» или «зуба», при постоянных или переменных углах наклона стенок (θ или $\theta(r)$) [14–16], см. рис. 9б.

Стенки со «ступенькой» 4 мм×4 мм (тест-1) приводят к нежелательным эффектам в процессе имплозии, см. рис. 9а,с [14–20]. «Срезание» лайнера происходит после высокоскоростного соударения (6 км/с) с нижней «ступенькой», при котором в лайнере и стенке возникают ударные волны и волны разрежения. Их взаимодействие приводит к образованию полости между лайнером и стенкой, которая задерживает образование скользящего

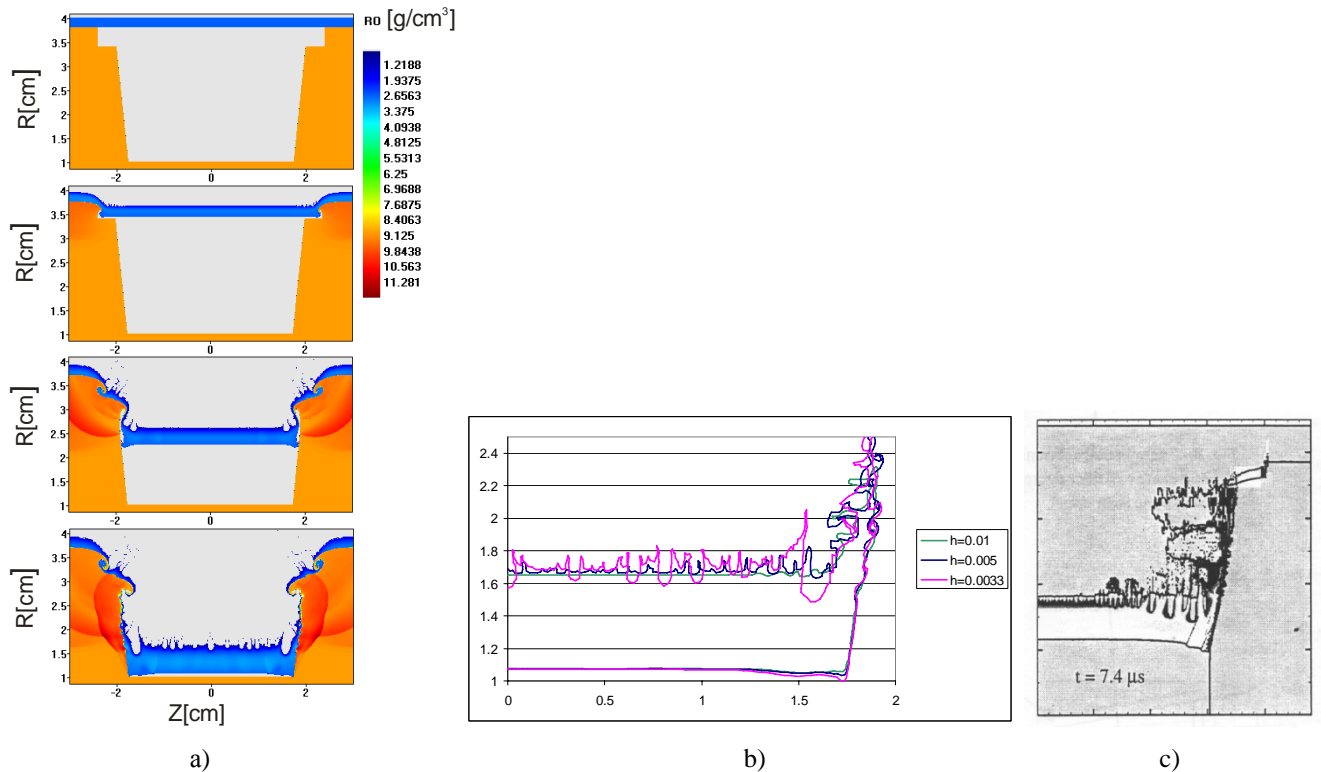


Рис. 8. Двумерные МГД расчеты имплозии лайнеров на эйлеровых сетках. а) процесс имплозии лайнера ALT-1,2 (методика МИМОЗА, $h = 33$ мкм); б,с) формы лайнеров к концу имплозии – лайнер ALT-1,2 (б, методика МИМОЗА, $h = 100, 50$ и 33 мкм) и лайнер, близкий к ALT-1,2 (с) [5]

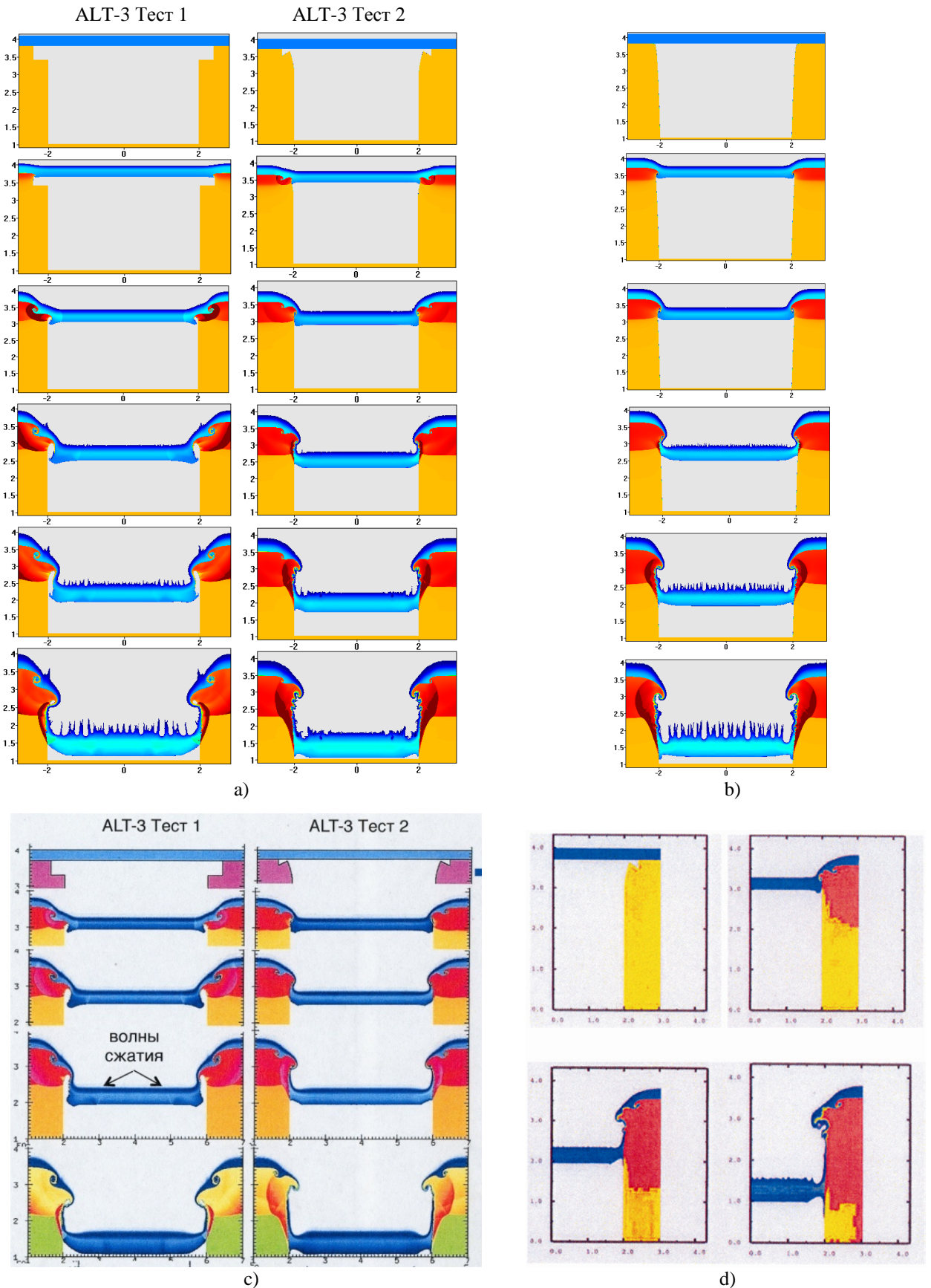


Рис. 9. 2D МГД расчеты имплозии лайнера ALT-3 с различными формами стенок: а,б) тесты 1 и 2 [18] и стенки с переменным углом наклона $\theta(r)$ [16] – код МИМОЗА, $h = 33$ $\mu\text{м}$; с) тесты 1 и 2 – код ARES, $h = 80$ $\mu\text{м}$ [20]; д) тест 2 – код AMR, $h = 50$ $\mu\text{м}$ [19]

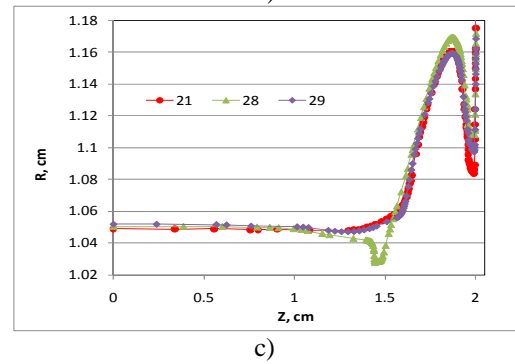
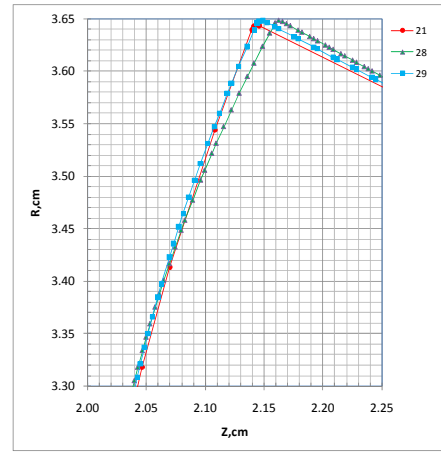
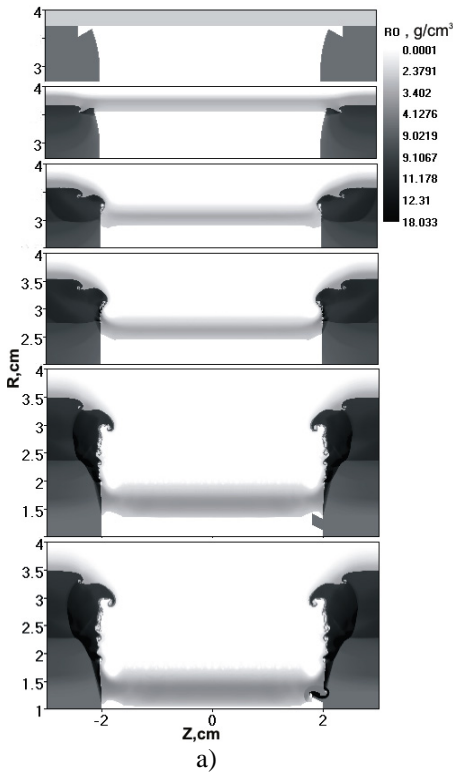


Рис. 10. а) Расчеты имплозии лайнера АЛТ-3 в выбранных стенках – с противоструйным барьером ($Z > 0$) и без него ($Z < 0$), методика МИМОЗА, $h = 20$ мкм [21]; б) формы «зуба» 21 (тест 2), 28, 29 с малыми отличиями поверхности скольжения, в) формы внутренней поверхности лайнера к концу имплозии из соответствующих расчетов имплозии 21, 28, 29 ($h = 33$ мкм) [18]

контакта всего лайнера со стенкой. Волны сжатия, распространяясь по лайнеру от стенок к плоскости его симметрии, вносят продольные возмущения, которые растут со временем из-за развития неустойчивости и приводят к асинхронности соударения лайнера с приемником. Уточненные МГД расчеты имплозии по методике МИМОЗА и расчеты коду АRES дают близкие величины асинхронности лайнера на его рабочей высоте $H_{imp} \approx 24$ мм (ударника): $\tau_{imp} \sim 8$ нс и бнс.

Стенки с «зубом» (тест 2) обеспечивают в расчетах «срезание» лайнера на «зубе» при малых скоростях, поэтому вышеуказанные нежелательные эффекты существенно уменьшаются, что приводит к улучшению характеристик лайнера-ударника. Расчеты по методике МИМОЗА и коду АRES дают близкие результаты (рис. 9а,с): хороший скользящий контакт всего лайнера со стенкой в процессе имплозии и существенно меньшую продольную асинхронность ударника: $\tau_{imp} \approx 1$ нс ($H_{imp} \approx 24$ мм). Но возникает небольшая струя у стенки, отстающая от ударника на $\sim 0,1$ нс. Нельзя

исключить, что в реальности она могла бы опередить ударник (как в несколько более грубом расчете, см. рис. 9d) и помешать выводу информации о результатах измерений. Для устранения этой опасности выбранная форма стенки с «зубом» была дополнена противоструйным «барьером», достаточно эффективным по расчетам, см. рис. 10а, $Z > 0$.

Существенно, что малые отличия формы «зуба» (рис. 10b) могут сильно влиять на характеристики лайнера-ударника. Так, форма 28 приводит к появлению струи при $Z \sim 1,5$ см (рис. 10b,с). Близкие формы 21 и 29 приводят к заметным отличиям асинхронности ударника ($H_{imp} \approx 26$ мм): $\tau_{imp} \approx 1,7-1,2-0,9$ нс и $1,2-0,6-0,6$ нс³, расчеты при

³ Это заведомо нижние оценки асинхронности ударника, поскольку в расчетах не учитывается развитие неустойчивости лайнера. Такой учет [21] – путем задания начальных возмущений лайнера с амплитудой $\sim 0,5$ мкм, возможных при его прецизионной обработке – дает на высоте ударника $H_{imp} \approx 26$ мм асинхронно-

$h = 50\text{--}33\text{--}20$ мкм, соответственно (эти результаты сходятся по h , что указывает на их методическую достоверность). Поэтому для эксперимента была выбрана форма «зуба» 29 и рекомендована прецизионная обработка его поверхности скольжения [18, 21].

Заключение

Приводятся и обсуждаются двумерные расчеты имплозии цилиндрических лайнеров, моделирующие эффекты взаимодействия лайнеров с торцевыми стенками (без учета начальных возмущений). Эксперименты и расчеты показали, что влияние стенок на имплозию мало, когда высота лайнера H_l больше проходимого им пути S_l .

В экспериментах стенки имели углы наклона $\theta = 6^\circ$ и 8° – для обеспечения хорошего контакта лайнера с ними в процессе имплозии. Лайнер HEL-1 ($S_l = 1,8H_l$) имел большую продольную асинхронность $\tau_{imp} \sim 2$ мкс (продольную асимметрию $\Delta R_{imp} \sim \tau_{imp} v_{imp} \sim 0,3R_{imp}$) соударения с приемником – приторцевые зоны летели быстрее. Лайнер ALT-1,2 ($S_l = 0,7H_l$) подлетал к приемнику практически синхронно – за исключением малых приторцевых зон, имевших небольшое опережение. Эти результаты согласуются с расчетами.

Приведенные 2D МГД расчеты лайнерной имплозии показали, что выбранные параметры предложенных лайнеров HEL-2 ($S_l = 0,9H_l$, $\theta = 2^\circ$) и ALT-3 ($S_l = 0,7H_l$, $\theta = 0^\circ$) могут обеспечить хороший контакт лайнера со стенками в процессе имплозии и практически синхронное соударение лайнера-ударника с приемником.

Автор выражает благодарность С. Ф. Гаринову за полезные обсуждения данной работы, В. В. Змушко и В. Б. Якубову – за обсуждения отдельных ее материалов.

Список литературы

1. Алиханов С. Г., Бахтин В. П., Топорков Д. А. Некоторые особенности получения сверхсильных импульсных магнитных полей с помощью зет-пинч-лайнера / Тр. III междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 1983.

Редакторы В. М. Титов, Г. А. Швецов: М.: Наука, 1984. С. 213–217,

2. Reinovsky R. E., Anderson W. E., Atchison W. L. et al. “Stability of magnetically imploded liners for high energy density experiments”. Proc. VIII Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (1998), Ed. H. J. Schneider-Muntau, Singapore: World Scientific, 2004. P. 473–478.

3. 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 Technical Papers 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Eds. C. Stalligs and H. Kirbie, pp. 1145–1148, 1999.

4. Arinin V. A., Buzin V. N., Buyko A. M. et al. “Near-wall effects influence on longitudinal symmetry of a solid liner compressed by slowly increasing EMG current”. Ibid. pp. 880–883, 1999.

5. Keinigs R. K., Atchison W. A., Faehl R. J. et al. “One- and two-dimensional simulations of liner performance at ATLAS parameters”. J. Appl. Phys., vol. 85, pp. 7626–7634, 1999.

6. 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. 7th Intern. Workshop on The Physics of Compressible Turbulent Mixing, St. Petersburg, 1999, Eds. E. Meshkov, Yu. Yanilkin & V. Zhmailo, Sarov, Russia, pp. 237–243, 2001.

7. Turchi P. J. et al. “Design and operation of high energy liner implosions at 16 MA for studies of converging shocks”. Digest of Technical Papers, PPS-2001, Eds. R. Reinovsky and M. Newton, Las Vegas, Nevada, pp. 361–364, 2001.

8. Buyko A. M., Burenkov O. M., Zmushko V. V. et al. “On the feasibility to achieve high pressures with disk EMG driven impacting liners”. Ibid. pp. 516–519, 2001.

9. Buyko A. M., Gorbachev Yu. N., Zmushko V. V. et al., Anderson B. G., Atchison W. L., Clark D. A. et al., “Simulation of Atlas parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2”. Proc. IX Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, M.–St. Petersburg, 2002. Eds. V. D. Selemir and L. N. Plyashkevich, VNIIEF, Sarov, 2004. pp. 747–751.

10. Faehl R. J., Anderson B. G., Clark D. A. et al., Chernyshev V. K., Mokhov V. N., Buzin V. N., et al., “Results of a 100-megaampere liner implosion experiment”. IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 32, No. 5, pp. 1972–1985, 2004.

11. Buyko A. M., Garanin S. F., Ivanovsky A. V. et al., Reinovsky R. E., Atchison W. L., “Basis direc-

сти $\tau_{imp} \approx 5\text{--}10\text{--}20$ нс при $h = 80\text{--}40\text{--}20$ мкм, соответственно (без сходимости результатов по h , что указывает на погрешности расчетов).

tions of EMG-assisted research”. Proc. X Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Berlin, 2004. Ed. by M.von Ortenberg, Berlin, pp. 126-134, 2005.

12. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В. и др., «Расчеты имплозии конденсированных лайнеров для экспериментов с дисковыми взрывомагнитными генераторами». Труды XII Междунар. конф. по генерации мегагауссных магн. полей и родств. экспериментам, Новосибирск, 2008. Ред. Г. А. Швецов, сс. 465–474, 2010.

13. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Глыбин А. И. и др., Атчисон У. Л., Рейновский Р. Е., Холткэмп Д. Б. «Система с дисковым ВМГ для ускорения лайнеров-ударников до скоростей ~20 км/с». Труды Междунар. конф. XIII Харитон. тематич. научн. чтения, ред. А. Л. Михайлов, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, сс. 488–495, 2011.

14. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В. и др. «Расчеты магнитной имплозии лайнеров-ударников, ускоряемых до скоростей ~20 км/с». Там же, сс. 549–556, 2011.

15. Sgro A.G., Atchison W.L. “Simulation of Magnetically Driven Experiments”. Ibid., pp. 211-221, 2011.

16. Buyko A.M., Garanin S.F., Zmushko V.V. “Magnetic Liner Implosion Simulations for the ALT-3 Experiment”. Megagauss-XIV, Maui, HI, USA, 2012. Eds. G.F.Kiuttu, K.W.Struve, J.H.Degnan, IEEE, Inc., pp. 172–177, 2012.

17. Miles A. R., Reisman D.B. “Numerical modeling of EMG-driven loads”. LLNL-PRES-536231. През. на XIV Харитоновских чтениях, 2012. Сб. тезисов докл., ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров. 2012. С. 5–6,

18. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В. «К выбору геометрии лайнерного ПУ для эксперимента ALT-3». Сб. докл. Междунар. конф. XV Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 2013. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2013. С. 779–789,

19. Sgro A. G., Rousculp C. L., Reinovsky R. E. “ALT-3 implosion analysis”. LA-UR-13-24131. Ibid., pp. 571–578.

20. Miles A. R. “Simulation of liner uniformity in the ALT-3 liner test problem”. LLNL-PRES-626436. Там же, сб. тезисов докл., с. 118.

21. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Глыбин А. М. и др. «Уточнение параметров устройства для разгона лайнера до 20 км/с». ПМТФ, т. 56, № 1, С. 116–124, 2015.

22. Софронов И. Д., Винокуров О. А., Змушко В. В. и др. «Комплекс программ МИМОЗА. Решение многомерных задач гидродинамики». Сб. науч. тр. Вопросы математического моделирования, вычислительной математики и информатики. М. - Арзамас-16, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1994. сс. 94–96,

23. Абакумов А. И., Низовцев П. Н., Певницкий А. В., Соловьев В. П. Программный комплекс ДРАКОН для расчета упругопластических течений при ударноволновом нагружении в двумерном и трехмерном приближении / Сб. докл. Междунар. конф. IV Забабахин. научн. чтения. Снежинск, 1995. С. 227–228.

24. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г., и др. «Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных лагранжевых сетках с произвольным количеством связей в узлах». ВАНТ, Сер. Математическое моделирование физических процессов, вып. 4, 2006. С. 29–44.

25. Steinberg D., Cochran S., Guinan M. “A constitutive model for metals applicable at high-strain rate”. J. of Appl Phys. 1980. vol. 51, № 3, pp. 1498–1504,

26. Раевский В. А., Лебедев А. И., Низовцев П. Н. и др. «Исследования неустойчивости Рэлея-Тейлора в меди и алюминии при давлениях до 45 ГПа и при скоростях деформирования $10^5 - 10^8 \text{ c}^{-1}$ ». Сб. тезисов докл. Междунар. конф. V Харитоновские тематич. научные чтения. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2003. С. 180–181.

27. Buyko 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-V, Novosibirsk, 1989. Eds. V. M. Titov and G. A. Shvetsov, New York: Nova Science Publishers, 1990. pp. 743–748,