

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО СЖАТИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ В УСТРОЙСТВАХ ALT-1-3

*С.Д. Кузнецов, А.М. Буйко, С.Ф. Гаранин, М.А. Десятникова,
Г.Г. Иванова, В.А. Каренов, В.Б. Якубов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Аннотация

Прецизионное измерение скорости ускоряемых лайнеров (оптическая велосиметрия методами VISAR, PDV), позволяет получать высокоточные изэнтропы исследуемых материалов - зависимости давления от плотности во всем диапазоне давлений, достигаемых в одном эксперименте [1]. При этом необходимо решать обратную математическую задачу, для чего используют методы типа ILA (Iterative Lagrangian analysis - итерационный лагранжев анализ). Но при магнитной имплозии лайнеров, когда наиболее высокие изэнтропические давления обеспечиваются кумуляцией, применение таких методов затруднительно.

В настоящей работе применяется аналогичный метод решения обратной задачи с использованием оптимизации - небольшое число параметров уравнения состояния варьируются до достижения наилучшего согласия экспериментальной скорости внутренней границы лайнера с расчетной, полученной в одномерном магнитно-гидродинамическом расчете. Для примера рассматривается имплозия алюминиевых лайнеров радиусом 4см и толщиной 2-3мм в устройствах ALT-1-3 [2-3] – под действием токов до 30-75МА (азимутальное магнитное поле до 2-10МГс) - при которой скорости лайнеров и изэнтропические давления в алюминии достигают 12-40км/с и 0.2-8Мбар. В экспериментах ALT-1,2 проводились VISAR-измерения скорости внутренней поверхности лайнеров, до 12 км/с. Полученная изэнтропа алюминия близка к имеющимся экспериментальным данным.

Введение

В 1999 г во ВНИИЭФ был проведен в рамках сотрудничества между ядерными лабораториями России и США первый опыт ALT-1 по демонстрации возможности получения скорости до 12 км/с с использованием ВМГ для проверки возможностей проектировавшейся в то время установки «Атлас». Сотрудничество было успешным и взаимодополняющим: ВНИИЭФ обладал технологией создания мощных ВМГ с хорошо воспроизводимыми токовыми характеристиками, а специалисты ЛАНЛ лучшими на тот момент диагностическими возможностями для измерения скорости лайнера. Основные результаты опыта были воспроизведены с хорошей точностью при повторном опыте ALT-2. Постановка опыта и начальная геометрия использовавшегося лайнера подробно описаны в [4], лайнер представлял собой цилиндр из технически чистого алюминия радиусом и длиной 40 мм и с толщиной стенок 2 мм, показанный на рисунке 1а. В этом опыте использовались целый ряд экспериментальных, согласованных по времени, методик для измерения тока и скорости внутренней поверхности лайнера. Основные результаты измерений полученных в опыте приведены в [4]-[5]. Измерение магнитного поля, создаваемого током в данном опыте, проводилось с помощью петлевых датчиков магнитного поля (B-dot датчиков), а также с помощью измерения фарадеевого вращения плоскости поляризации. Величины тока, измеренные в каждом из опытов разными методиками, хорошо согласуются между собой и между разными опытами в пределах экспериментальной погрешности. Сравнение средних величин тока и скорости из двух опытов, отнесенные к одной временной шкале, показаны на рисунке 1б. Искользовавшиеся в опыте игольчатые датчики показали хорошую однородность схлопывания лайнера, петлевые датчики, расположенные под лайнером, подтвердили отсутствие разрывов контакта лайнера с токоподводящими стенками, получены экспериментальные погрешности измеренных кривых тока и скорости. В опыте проводилось рентгенографирование лайнера.

В работах [4]-[5] было проведено более подробное сравнение измерений тока и скорости, которые используются для определения свойств вещества. Экспериментально подтверждённая погрешность измерения тока с помощью петлевых датчиков составляет $< 5\%$, для измерений с помощью фарадеева вращения заявленная погрешность $\sim 1\%$, погрешность измерения скорости с помощью VISAR $\sim 1-2\%$, временная привязка экспериментальных кривых составляет < 100 нс. Обнаруженное на стадии обработки экспериментальных данных различие во временах начала токовых кривых от измерений петлевыми и фарадеевыми датчиками было устранено отнесением к неучтенной задержке в запуске регистрирующей аппаратуры.

Близкий к одномерному процесс схлопывания лайнера в этих опытах позволил с достаточной точностью предсказать и описать экспериментальные результаты с использованием одномерной методики [6]. Дальнейшее развитие этой методики позволило включить одномерный расчётный модуль в программы оптимизаторы [7], что позволяет осуществлять поиск оптимальных параметров задачи, в частности параметров УРС, находить решение обратной задачи по определению неизвестных граничных условий, вычислять погрешности полученных решений. В следующих разделах иллюстрируются возможности данной методики по нахождению тока и получению параметров УРС, осуществляющих наилучшее приближение.

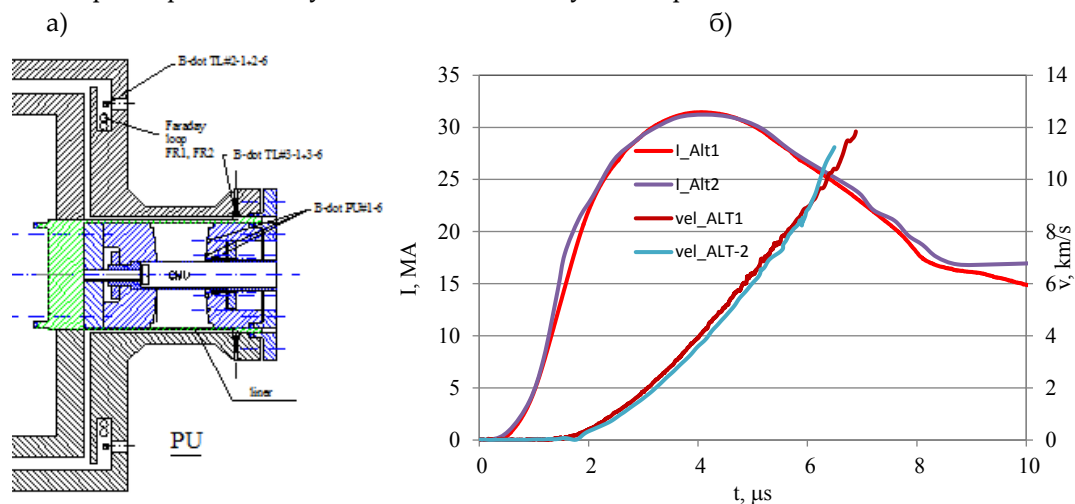


Рисунок 1. а) Схема лайнерной сборки экспериментального устройства. б) Сравнение токов и скоростей внутренней границы лайнера, приведённых к одной временной шкале, полученных в опытах ALT-1 и ALT-2

Численный эксперимент по восстановлению тока по заданной скорости границы

В геометрии задачи, представленной на рисунке 1, с током из опыта ALT-1, показанном на рисунке 2, проведен расчёт скорости внутренней границы лайнера. В начальный момент лайнер можно считать тонким (отношение толщины к радиусу ~ 20). Приложение сравнительно медленно растущего магнитного поля к внешней границе лайнера производит близкое к адиабатическому сжатию вещества лайнера. На рисунке 2 приведены профили распределения характерных величин в лайнере на момент подлёта к центральному измерительному блоку, видно, что максимально достижимое адиабатическое давление в этом опыте составляет 25 ГПа, плотности $1.35 \rho_0$, что определяет диапазон уравнения состояния, доступный для исследования в этом эксперименте.

Считая УРС вещества известным, проведено нахождение величин тока в 30 точках, методом минимизации суммы среднеквадратических отклонений скорости в заданных точках. Число точек выбрано таким, чтобы обеспечить точность восстановления тока с погрешностью порядка 1%. В качестве стартового значения параметров тока выбрана кривая ALT-1 на рисунке 3а. Начальный интервал, определяющий минимальное и максимальное значение тока в каждой точке был задан равным (0, 35) МА. На рисунке 3а показаны величины тока при достижении локального минимума функционала среднеквадратических отклонений скорости в заданных точках. Для продолжения

решения использовалась ожидаемое отсутствие резких изменений производной тока или гладкость токовой кривой, вводились ограничения на диапазон возможных значений величины тока в первой выпадающей точке, и расчёт продолжался до следующего локального минимума. Относительные модули отклонений величин скорости от точных стартовых значений скорости показаны на рисунке 3б. Эти результаты показывают, что в среднем результирующее отклонение полученных скоростей меньше 0.01%.

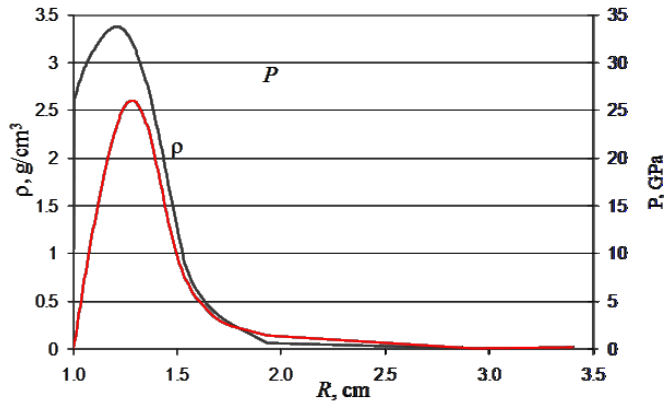


Рисунок 2. Профили термодинамических величин в лайнере на момент подлёта к центральному блоку или радиусу 1 см

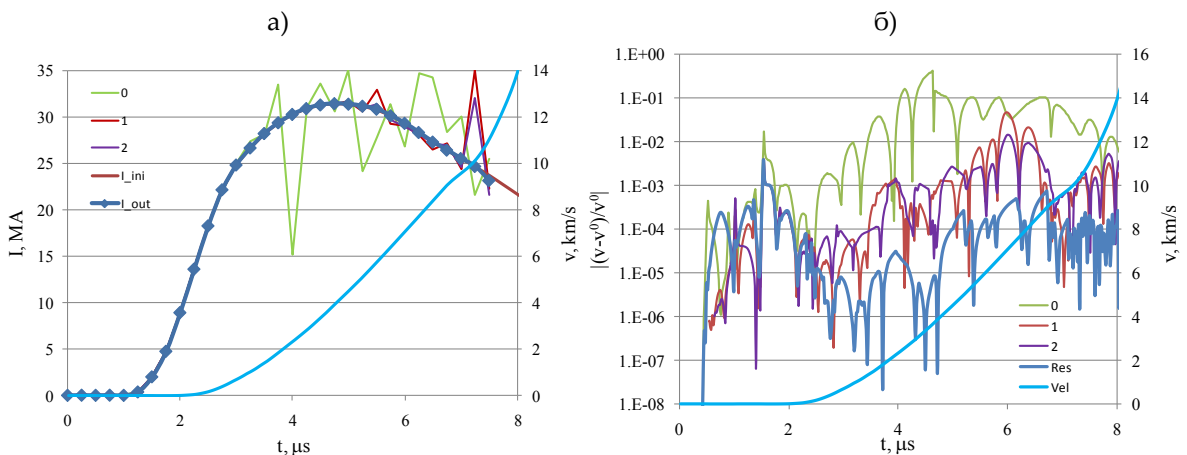


Рисунок 3. а) Несколько последовательных приближений токовой кривой построенных по кривой скорости расчётно полученной по токовой кривой начального тока I_{ini} . Окончательная токовая кривая отмечена маркерами в точка, в которых находилось значение тока. б) Элементы вектора невязки на несколько последовательных приближений токовой кривой. Окончательная токовая кривая отмечена маркерами в точка, в которых находилось значение тока.

Восстановление тока и определение УРС по экспериментальной кривой скорости внутренней границы

В целом восстановление тока произведено по точной кривой скорости с доверительным интервалом меньше 1%. При реальных случайных отклонениях скорости от точного значения в эксперименте точность такого восстановления может оказаться значительно хуже, но доверительный интервал может быть получен численно из расчётов по описанной методике.

Если УРС вещества считается известным, то восстановление тока можно провести по полученной в эксперименте зависимости скорости. Экспериментальная кривая скорости для эксперимента ALT-1 аппроксимировалась ~ 200 значений, взятыми через равные интервалы времени, которая показана вместе с экспериментальной кривой на рисунке 4а, ток находился в ~ 25

равноотстоящих точках. Постановка задачи аналогична рассмотренной в предыдущем разделе, дополнительную погрешность вносят случайные погрешности скорости. На рисунке 4а показаны результаты расчётов по восстановлению тока для экспериментов ALT1, а также указаны границы доверительного интервала для тока. На рисунке 4а представлен половинный доверительный интервал, отнесённый к значению тока, который определяет относительную погрешность восстановления тока по взятым значениям скорости. Погрешность значений тока не выходит за $\pm 15\%$, а на большей части токовой кривой не превышает $\pm 5\%$.

На рисунке 4б приведены аналогичные кривые для восстановления тока по результатам эксперимента ALT-2. Таблица скорости была взята из оцифровки графика скорости в 125 точках. Видно, что расчётная погрешность восстановления скорости при этом оказывается несколько хуже, чем для опыта ALT-1, что связано с меньшим числом точек скорости использовавшемся в расчёте, также кривая скорости была записана до меньших значений скорости и визуально является не такой гладкой и монотонной как кривая скорости, полученная в опыте ALT-1.

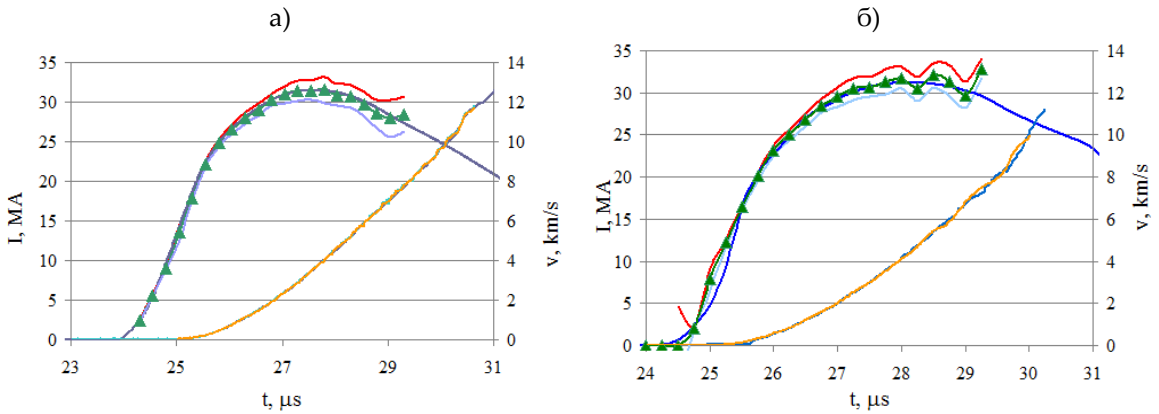


Рисунок 4. Восстановление расчётной кривой тока в опыте ALT-1 (а) и ALT-2 без учёта пластичности материала лайнера. Показан удвоенный доверительный интервал для тока и зависимость скорости на внутренней поверхности от времени.

Может быть поставлена и решена задача по определению оптимальных параметров УРС по полученным в эксперименте кривым тока и скорости, при этом важным может оказаться вопрос о точности временной привязки кривой тока и кривой скорости. Для примера, были проведены расчёты коэффициентов в используемой нами параметризации УРС в области малых сжатий, которые были реализованы в экспериментах ALT-1,2. Для

$$P_c = \frac{\rho_0 c_0^2}{n-m} (\delta^n - \delta^m), \text{ где } \delta = \rho / \rho_0, \text{ получено}$$

$c_0 = 4.89 \pm 0.036$ км/с, $n = 2.51 \pm 0.021$, $m = 2.24 \pm 0.094$.

Найденные значения близки к тем, что использовались в расчётах.

Может быть поставлена и решена задача по другим параметрам УРС, например оптимизация параметров отвечающих за зависящую от температуры часть УРС по полученным в эксперименте кривым тока и скорости. Были проведены расчёты по определению предела текучести и коэффициента Пуассона для материала лайнера, хотя по оценкам влияние прочности на движение лайнера незначительно. Найденные значения равны $\sigma = (3.33 \pm 0.17) \cdot 10^{-7}$ ГПа. $\nu = 0.39 \pm 0.19$, что примерно соответствует с учётом погрешности нагружению алюминия в статических условиях. На рисунке 5 представлена оптимизированная изэнтропия вещества лайнера, полученная в расчётах. Кривая получена в интервале давлений и плотностей достижимых в данном опыте.

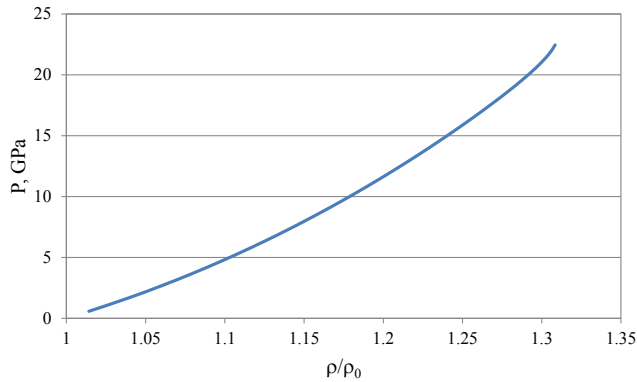


Рисунок 5. Изэнтропа материала лайнера, полученная в расчётах

Заключение

Произведено рассмотрение имплозии алюминиевых лайнеров радиусом 4 см и толщиной 2–3 мм в устройствах ALT-1-2 [2-3] – под действием токов до 35 МА (азимутальное магнитное поле до 20 МГс) – при которой скорости лайнеров и изэнтропические давления в алюминии достигают 12 км/с и 0.25 Мбар. Применен метод решения обратной задачи для восстановления кривой тока в модельной задаче, а также на основе экспериментальных данных полученных в опытах ALT-1 и ALT-2. Произведена оценка доверительных интервалов для получаемых результатов восстановления тока. Восстановлены параметры холодной кривой давления для получения изэнтропы сжатия материала лайнера. На примере предела текучести и коэффициента Пуассона показана возможность восстановления параметров уравнения состояния. Оценено влияние этих параметров на результаты восстановления тока.

Список литературы

1. R.W. Lemke, D.H. Dolan, D.G. Dalton, et al. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // *Journal of Applied Physics* 119, 015904 (2016).
2. A.M. Buyko, Y.N. Gorbachev, V.V. Zmushko, et al. Simulation of ATLAS parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // *Proc. of IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, M. – St.-Pet., July 7-14, 2002. Edited by V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich. Sarov, VNIIEF, 2004. PP. 747-751.
3. А.М. Буйко. Некоторые возможности магнитной имплозии высокоскоростных конденсированных лайнеров в устройстве ALT-3 // Доклад на международной конференции XXI Харитоновские тематические научные чтения, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, 2019 (будет опубликован в Трудах конференции).
4. A.M. Buyko, G.I. Volkov, Yu.N. Gorbachev, B.T. Yegorychev, V.V. Zmushko, V.A. Ivanov, G.G. Ivanova, A.I. Kuzyaev, A.A. Kulagin, V.N. Mokhov, V.V. Pavlii, S.V. Pak, A.A. Petrukhin, A.N. Skobelev, V.N. Sofronov, V.K. Chernyshev, V.B. Yakubov, B.G. Anderson, W.L. Atchison, D.A. Clark, R.J. Faehl, I.R. Lindemuth, R.E. Reinovsky, G. Rodrigues, J.L. Stokes, L.J. Tabaka. Experimental simulation of the energy parameters of the “Atlas. Capacitor” bank using a disk explosive-magnetic generator // *13th IEEE International Pulsed Power Conference Las Vegas, Nevada, June 17-22, 2001*
5. D. A. Clark, B. G. Anderson, G. Rodriguez, J. L. Stokes, L. J. Tabaka. Liner velocity, current, and symmetry measurements on the 32 megamp flux compression generator experiment ALT-1 // *13th IEEE International Pulsed Power Conference Las Vegas, Nevada, pp. 747-751, June 17-22, 2001*

6. Н.Ф. Гаврилов, Г.Г. Иванова, В.И. Селин, В.Н. Софронов. Программа UP-Ok для решения одномерных программ механики сплошной среды в одномерном комплексе //ВАНТ, Серия: Методики и программы, № 3(4), стр. 11-14, 1982
7. B. M. Adams, W. J. Bohnhoff, K. R. Dalbey, J. P. Eddy, M. S. Ebeida, M. S. Eldred, J. R. Frye, G Gerarci, P. D. Hough, K. T. Hu, J. D. Jakeman, M. Khalil, K. A. Maupin, J. A. Monschke, E. M. Ridgway, Ahmad Rushdi, L. P. Swiler, J. A. Stephens, D. M. Vigil, and T. M. Wildey. Dakota, a multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification, and sensitivity analysis: Version 6.6 developers manual. Technical Report SAND2014-5014, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Updated May 2017. Available online from <http://dakota.sandia.gov/documentation.html>

РАСЧЕТЫ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ ТИПА АЛТ ДЛЯ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ

А.М. Буйко, Г.Г. Иванова, И.В. Морозова

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Устройство АЛТ-3 (рисунок 1) было разработано [1-4] для проверки эффективности магнитной имплозии цилиндрического Al-лайнера как ударника, разгоняемого до 20км/с под действием азимутального магнитного поля $B \sim 6\text{МГс}$ (ток $\sim 70\text{МА}$, см. рисунок 2а). В экспериментах АЛТ-1,2 [5] (“Advanced Liner Technology”) с аналогичным устройством и 10-модульным ДВМГ такой же Al-лайнер толщиной 2мм был разогнан до 12км/с ($R_{imp}=1\text{см}$, поле $B \sim 2\text{МГс}$, ток $\sim 30\text{МА}$).

Магнитная имплозия лайнеров по сравнению с имплозией от взрывчатки имеет такие преимущества, как практически мгновенное (со скоростью света) выравнивание магнитных полей, действующих на лайнеры, разгон и сжатие лайнеров без образования ударных волн, получение более высоких давлений и регулировка времен их нарастания. Используются [1-9] однослойные (Al,Cu) и двухслойные лайнеры. Последние состоят из внутреннего слоя (ударник или исследуемый материал) и прилегающего к нему снаружи хорошо проводящего слоя (Al,Cu), по которому течет ток $I(t)$. На внешнюю поверхность лайнера $R_{out}(t)$ действует магнитное поле (1), которое диффундирует в скин-слой и формирует в нем магнитное давление (2) – результат действия объёмных сил, пропорциональных $[jB]$ ($j(r,t)$ и $B(r,t)$ - плотность тока и магнитное поле в скин-слое, рисунок 2b).

$$B(t) = I(t)/5R_{out}(t), \quad [\text{см}, \text{МА}, \text{МГс}] \quad (1)$$

$$P_B = B^2/8\pi, \quad [\text{МГс}, \text{Мбар}] \quad (2)$$