

Моделирование изэнтропического сжатия алюминия при магнитной имплозии лайнеров в устройствах АЛТ-1-3

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

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» - «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
Саров, Нижегородская обл., Россия

*Презентация доклада на международной конференции
XIV Забабахинские научные чтения, 18-22 марта 2019, г. Снежинск*

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. Получены также требования к точности измерений скорости лайнера до 40 км/с в разработанном устройстве ALT-3.

Постановка и некоторые результаты экспериментов ALT-1-2

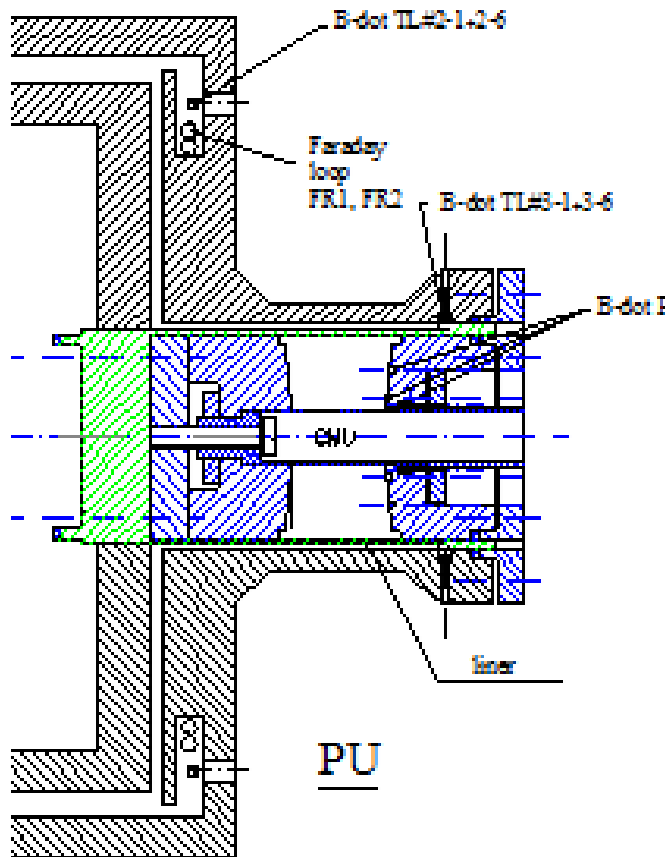
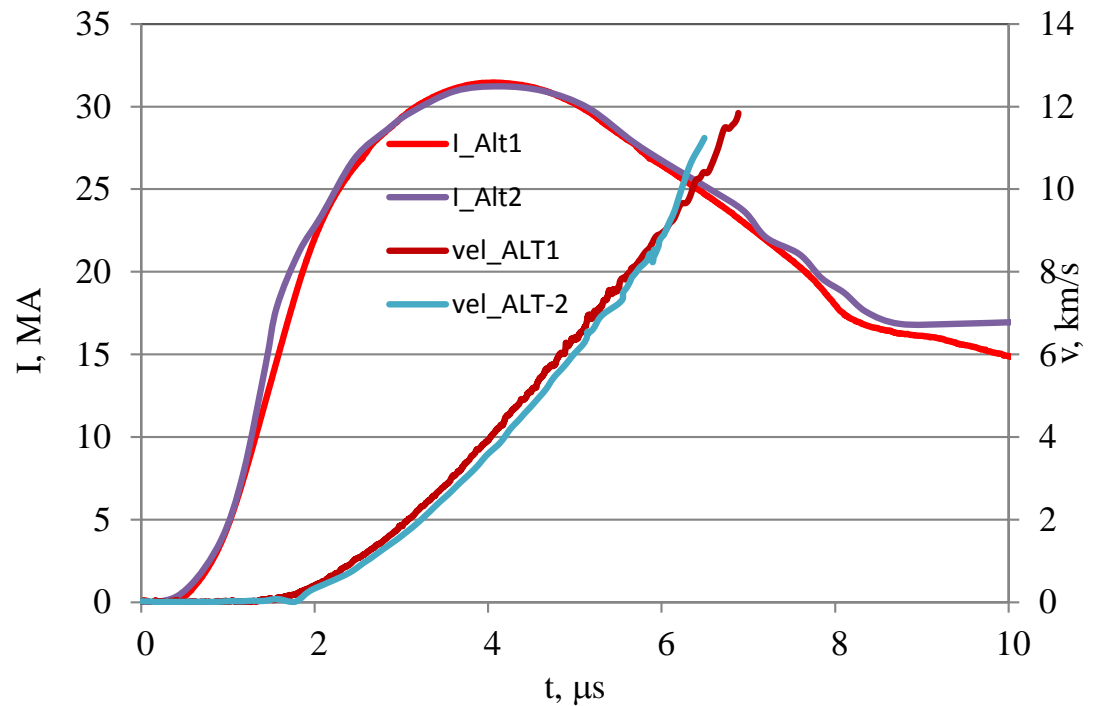
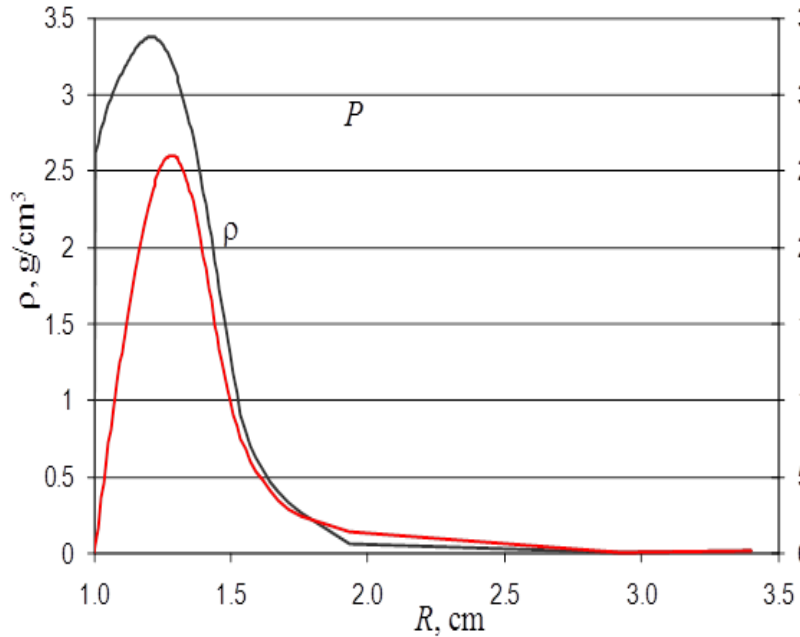


Схема лайнерной сборки экспериментального устройства.

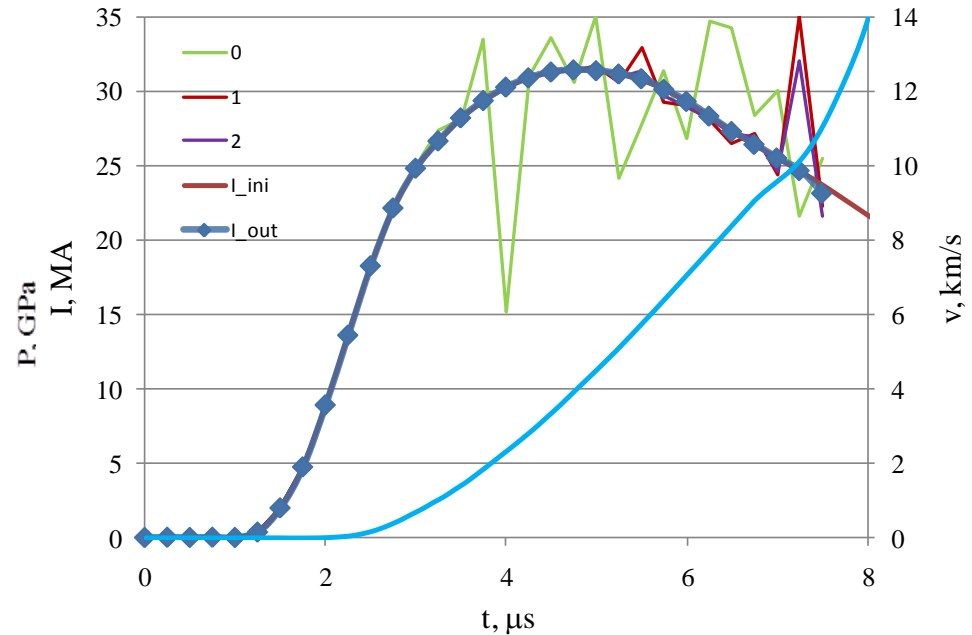


Сравнение токов и скоростей внутренней границы лайнера, приведённых к одной временной шкале, полученных в опытах ALT-1 и ALT-2.

Численный эксперимент по восстановлению тока по заданной скорости границы

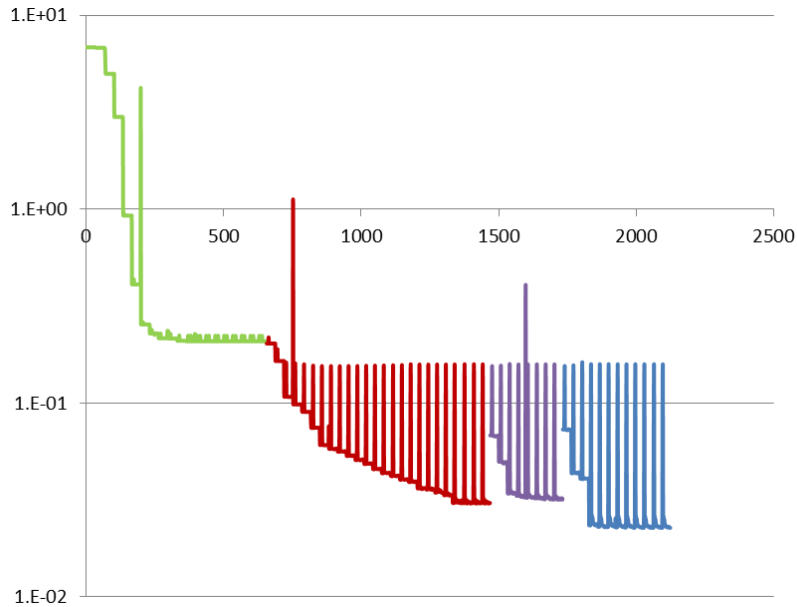


Профили термодинамических величин в лайнере на момент подлёта к центральному блоку или радиусу 1 см.

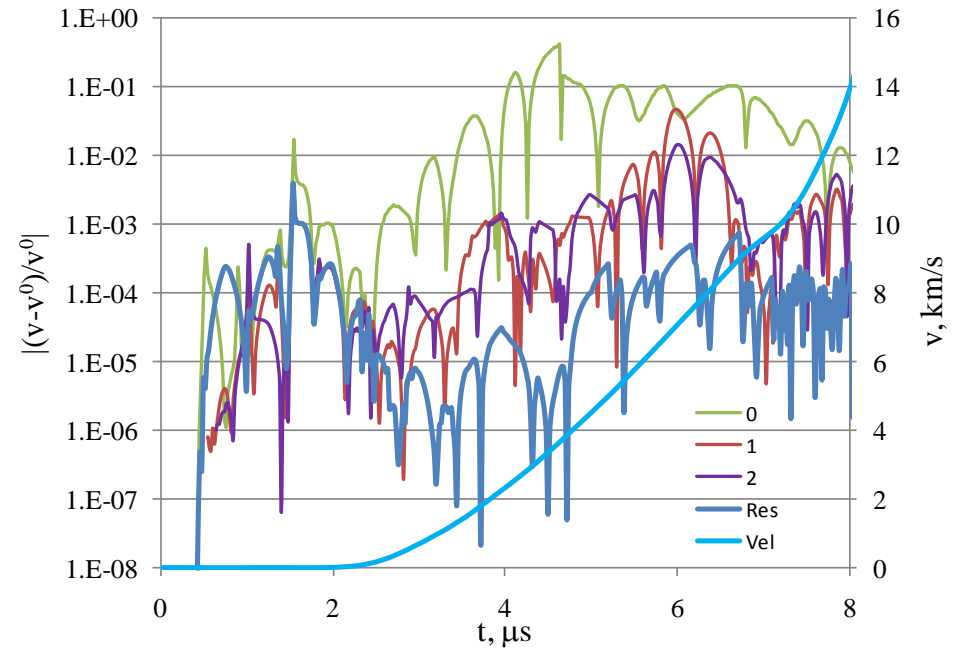


Несколько последовательных приближений токовой кривой построенных по кривой скорости расчётно полученной по токовой кривой начального тока I_{ini} . Окончательная токовая кривая отмечена маркерами в точках, в которых находилось значение тока.

Численный эксперимент по восстановлению тока по заданной скорости границы

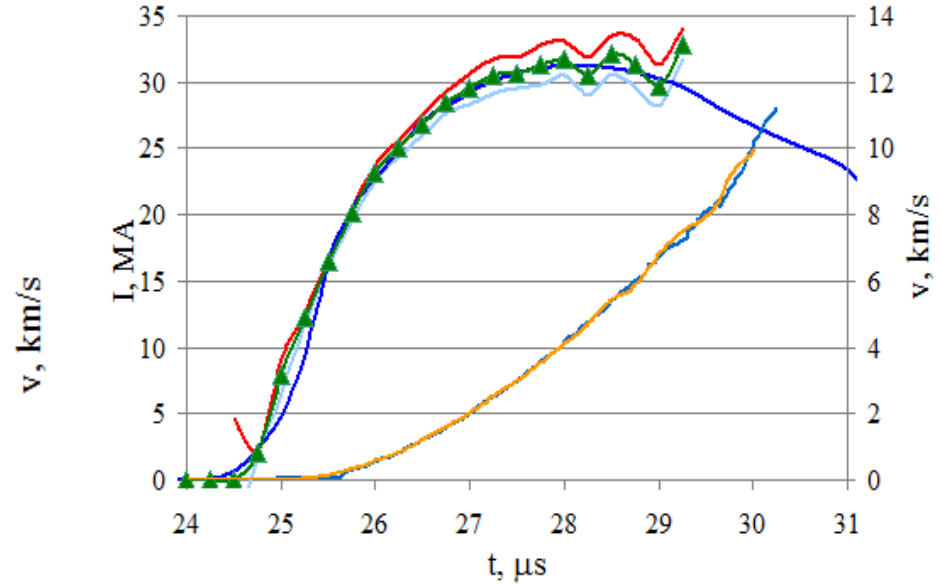
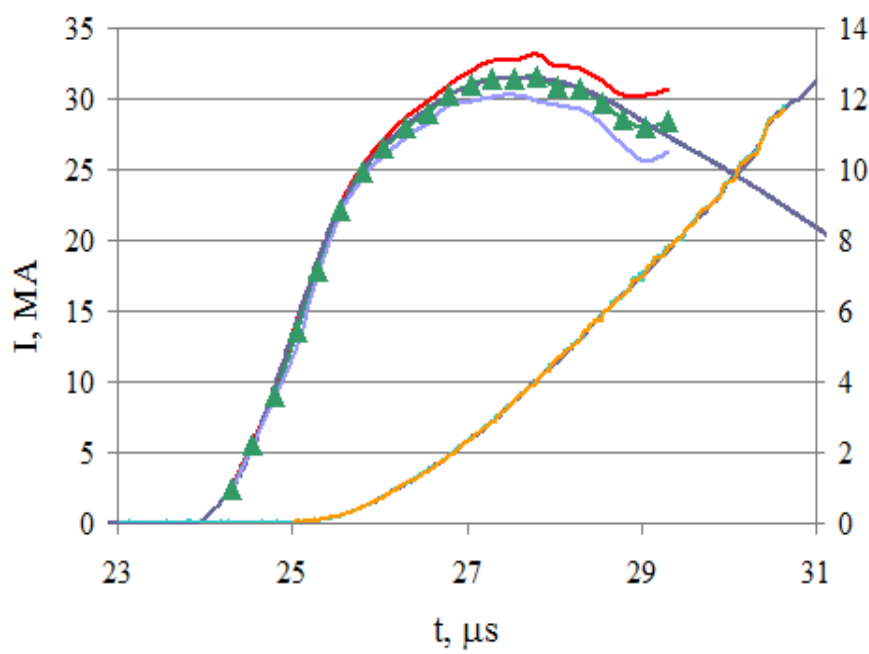


Изменение нормы вектора невязки относительной скорости в зависимости от номера итерации. Изменение цвета кривой отмечает корректировку значения тока в выпадающих точках.



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



Восстановление расчётной кривой тока в опытах ALT-1 (слева) и ALT-2 (справа) по скорости внутренней поверхности без учёта пластичности материала лайнера. Показан удвоенный доверительный интервал для тока и зависимость скорости на внутренней поверхности от времени.

Восстановление тока и определение УРС по экспериментальной кривой скорости внутренней границы.

УРС в в экспериментах ALT-1,2

$$P_c = \frac{\rho_0 c_0^2}{n - m} (\delta^n - \delta^m) \quad \delta = \rho / \rho_0$$

$$c_0 = 4.89 \pm 0.036 \text{ км/с}, n = 2.99 \pm 0.021, m = 2.24 \pm 0.094.$$

Найденные значения близки к тем, что использовались в расчётах.

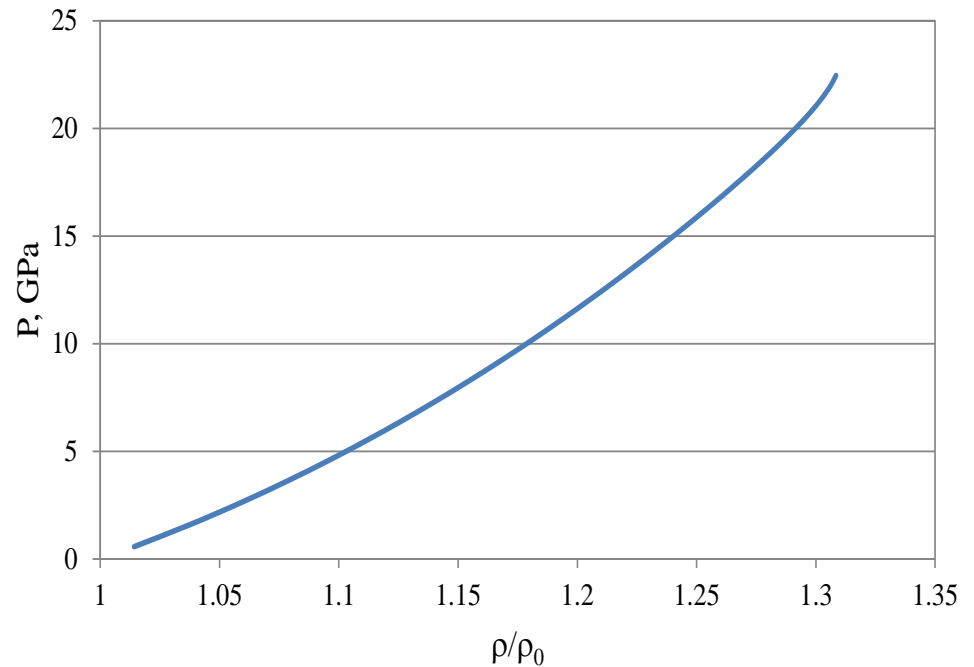
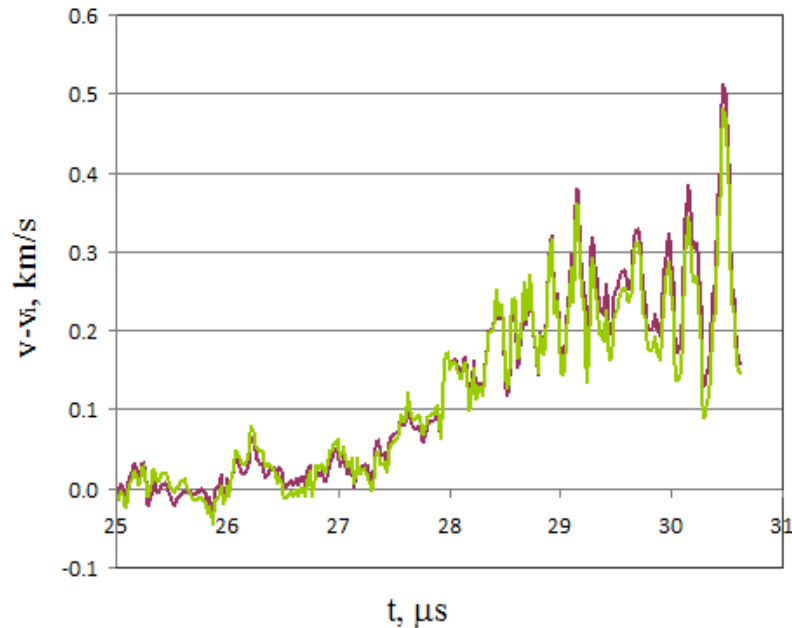
$$c_0 = 5.07 \text{ км/с}, n = 3, m = 2.25.$$

Предела текучести и коэффициента Пуассона

$$\sigma = (3.33 \pm 0.17) \cdot 10^{-2} \text{ ГПа}, \nu = 0.39 \pm 0.19.$$

Найденные значения близки к значениям для алюминия в статическом пределе

Liner Current and Eos Reconstruction with the Experimental Curves of the Inner Liner Surface Velocity



The relative error of the current recovered with account for plasticity and without for ALT-1 experiment.

Isentropic curve of liner Aluminum compression

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведено рассмотрение имплозии алюминиевых лайнеров радиусом 4см и толщиной 2-3мм в устройствах ALT-1-2 [2-3] – под действием токов до 35МА (азимутальное магнитное поле до 20МГс) - 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lemke R.W., Dolan D.H., Dalton D.G., et al. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000GPa compression with magnetically driven liner implosions // Journal of Applied Physics 119, 015904 (2016).
2. Buyko A.M., Gorbachev Y.N., Zmushko V.V., 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. Буйко А.М. , Г. Г. Иванова, И. В. Морозова, «Расчеты взрывомагнитных устройств типа ALT для безударного сжатия материалов при магнитной имплозии лайнеров» // Доклад на международной конференции XIV Забабахинские научные чтения г.Снежинск, Челябинская область, 2019 (будет опубликован в Трудах конференции).
4. Experimental simulation of the energy parameters of the “Atlas. Capacitor” bank using a disk explosive-magnetic generator, 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 13th IEEE International Pulsed Power Conference Las Vegas, Nevada, June 17-22, 2001
5. Liner velocity, current, and symmetry measurements on the 32 megamp flux compression generator experiment ALT-1* D. A. Clark, B. G. Anderson, G. Rodriguez, J. L. Stokes, L. J. Tabaka PP. 747-751 13th IEEE International Pulsed Power Conference Las Vegas, Nevada, June 17-22, 2001
6. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н., «Программа UP-Ок для решения одномерных программ механики сплошной среды в одномерном комплексе», ВАИТ, 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>