

Особенности высокоскоростной деформации и разрушения стальных шаров при осесимметричном инициировании слоя ВВ. Взрывные эксперименты и расчетные прогнозы по двумерной программе МЕЧ

Д.А. Краснослабодцев, М.Е. Васильев, В.П. Елсуков,
П.Е. Кискин, Е.А. Козлов, В.Н. Ногин

Снежинск, ЗНЧ-2017

Эксперименты

Сплошные шаровые образцы из стали 30ХГСА и 12Х18Н10Т диаметром 60 мм, окружались слоем октоген-содержащего ВВ толщиной 10 мм. Для обеспечения сохранности образцов вся система помещалась в массивный корпус из стали или чугуна. Толщина стенок массивного корпуса составляла 43 мм и 60 мм соответственно.



48 точек



1 точка

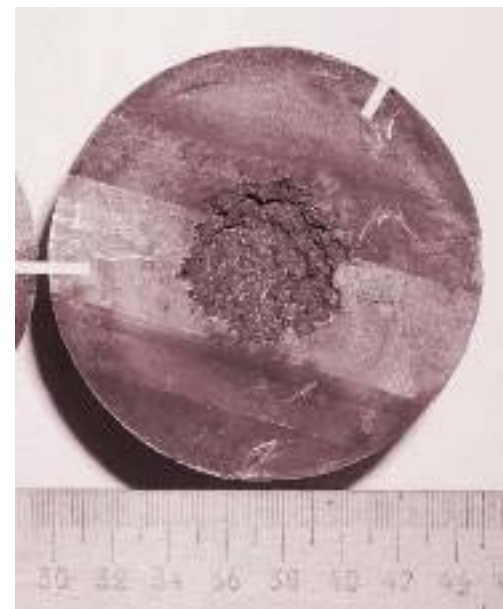
Диаметральное сечение образцов



48 точек



1 точка



96 точек

Программа МЕС предназначена для расчета двумерных (плоских и осесимметричных) нестационарных течений веществ с большими деформациями контактных границ с учетом различных свойств материалов. В программе счета шага заложен эйлеровый комбинированный метод частиц в ячейке, в котором частицы используются только для описания движения контактных границ. В расчетах обычно применяется квадратная сетка.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathit{div}(\rho W) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \mathit{div}(\rho WW) + \mathit{div}(\sigma) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \mathit{div}(\rho EW) + \mathit{div}(\sigma W) = 0$$

О программе МЕЧ

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} + \nu \frac{\sigma_{12}}{y} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial y} + \nu \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{y} \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_{11} u + \sigma_{12} v) + \frac{1}{y'} \frac{\partial}{\partial y} ((\sigma_{12} u + \sigma_{22} v) y') \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{y'} \frac{\partial(y' \rho v)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{1}{y'} \frac{\partial(y' \rho u v)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{1}{y'} \frac{\partial(y' \rho v v)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho E u)}{\partial x} + \frac{1}{y'} \frac{\partial(y' \rho E v)}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right.$$

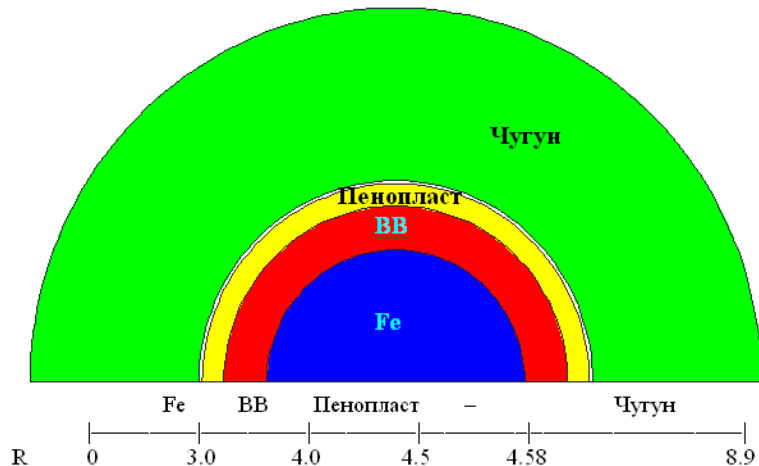
В программе реализована упругопластическая модель, основанная на решении уравнения Прандтля-Рейса методом Уилкинса с критерием текучести Мизеса:

$$\bar{S}_{ij}^{n+1} = S_{ij} + 2\mu \dot{e}_{ij} \tau - (S_{ik} \omega_{kj} + S_{jk} \omega_{ki}) \tau$$

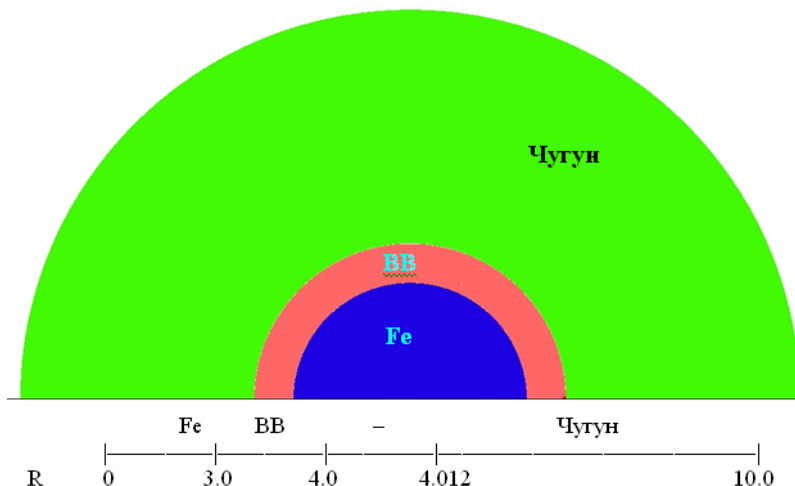
$$J^{n+1} = \sqrt{\frac{3}{2} \bar{S}_{ij}^{n+1} \bar{S}_{ij}^{n+1}}$$

$$S_{ij}^{n+1} = \begin{cases} \bar{S}_{ij}^{n+1}, & J^{n+1} \leq Y \\ \bar{S}_{ij}^{n+1} \frac{Y}{J^{n+1}}, & J^{n+1} > Y \end{cases}$$

Постановки расчетов



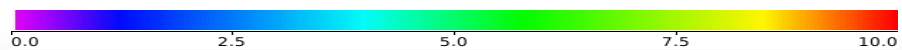
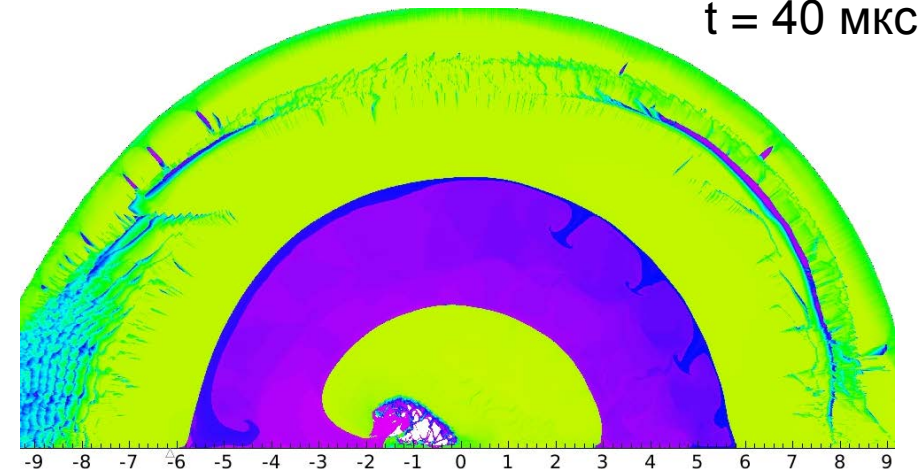
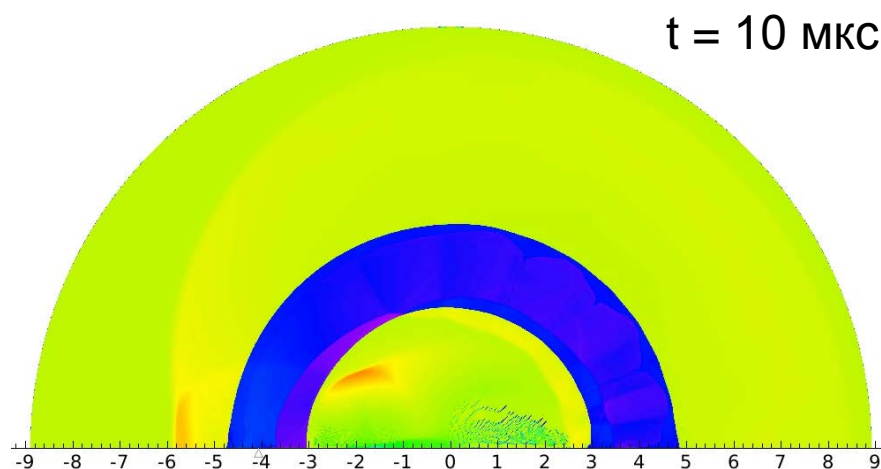
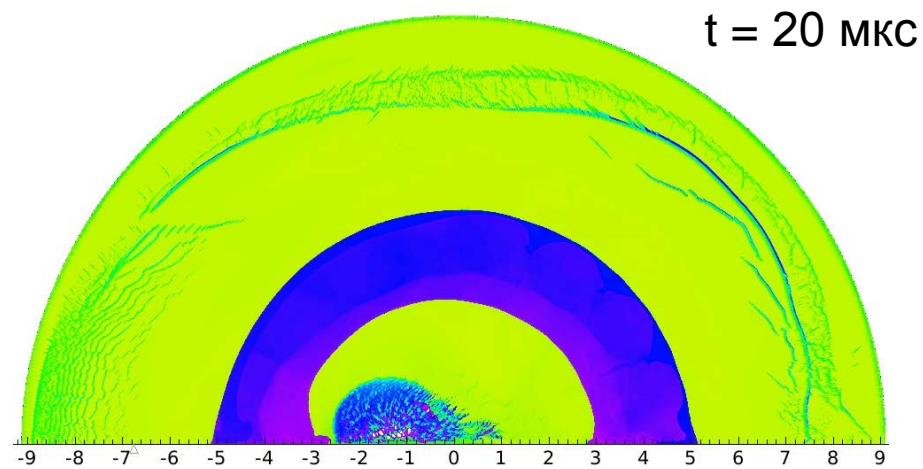
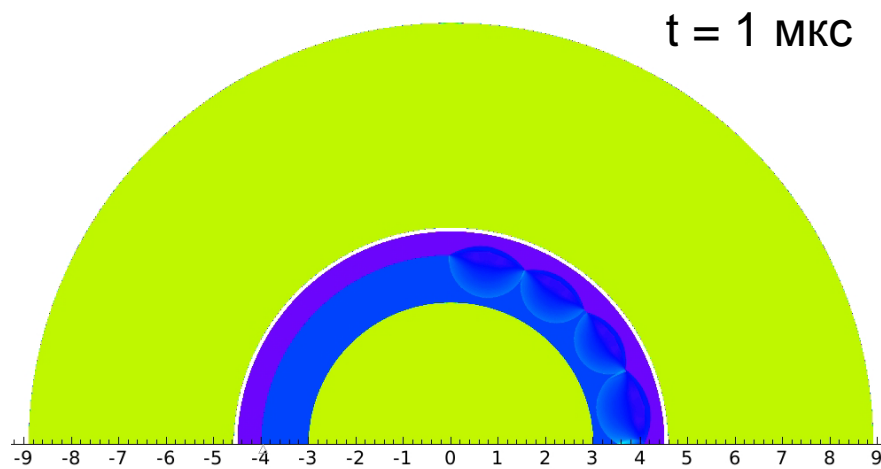
Геометрия для расчета 1 и 2



Геометрия для расчета 3

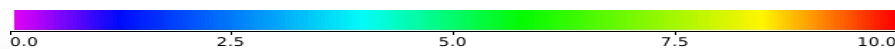
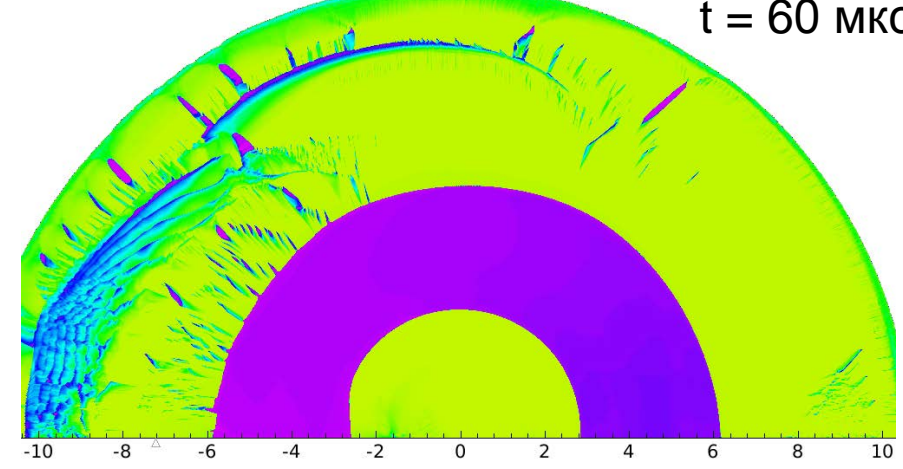
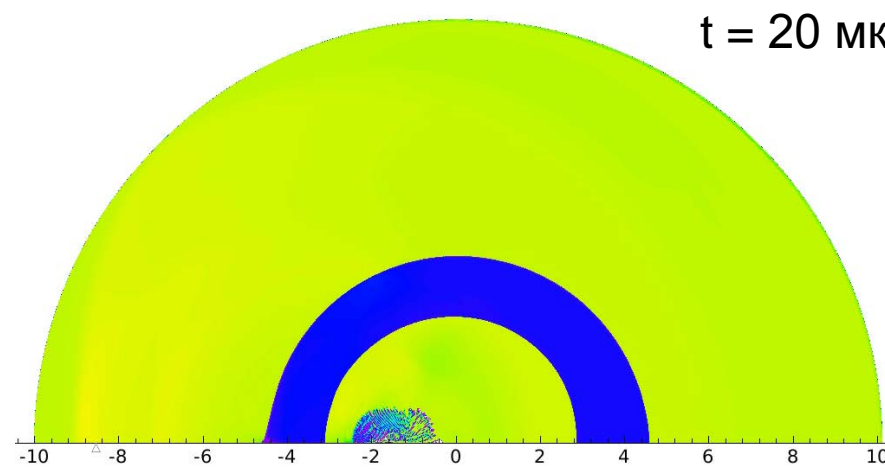
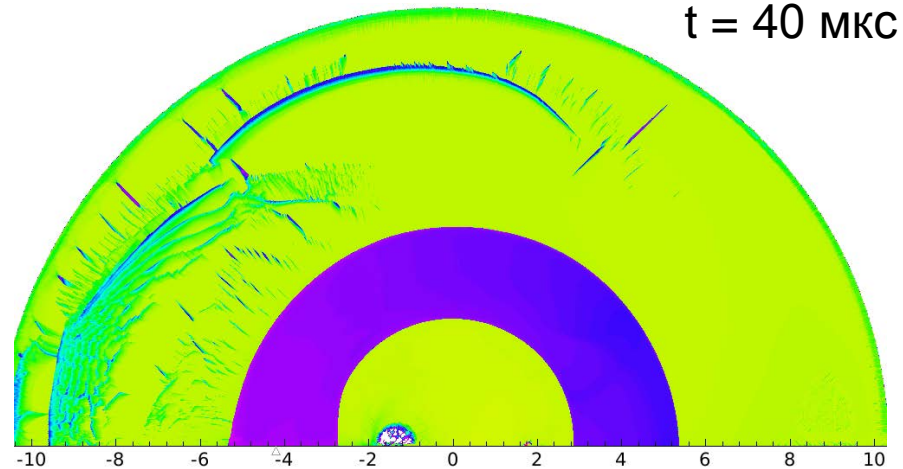
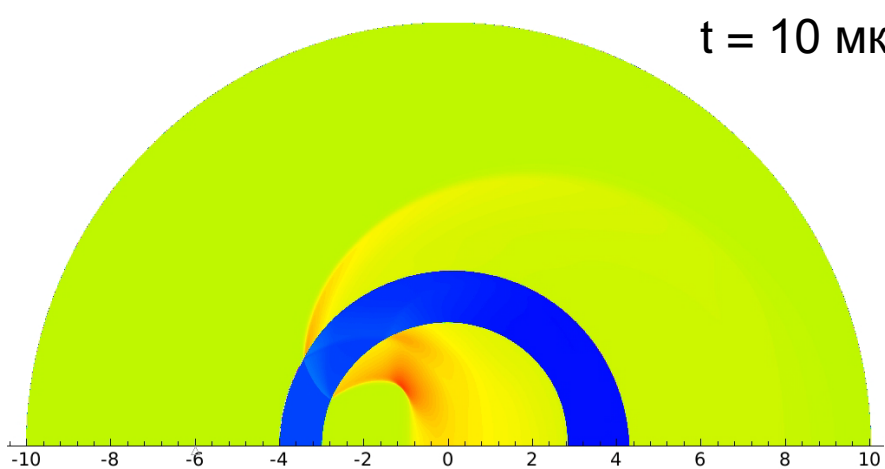
В расчете 1 инициирование ВВ осуществлялось в четырех точках правой полусферической поверхности (то есть по четырем кольцам – моделирование наличия многоточечной системы инициирования в двумерном расчете), в расчете 2 – одновременно по всей правой полусферической поверхности, в расчете 3 – в одной точке на оси симметрии.

Расчет 1 (4 точки иницирования)



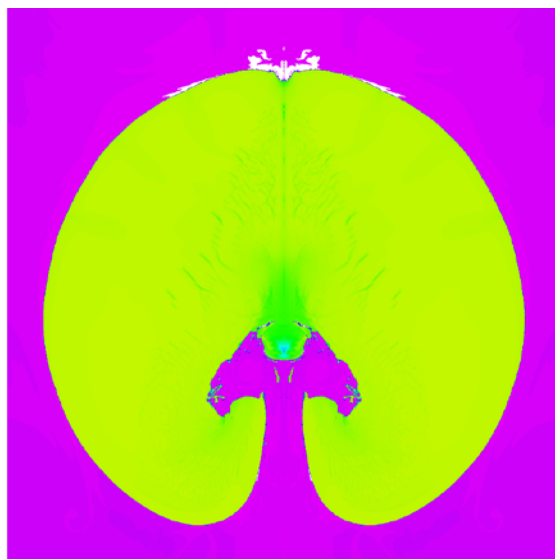
Поля плотностей

Расчет 3 (1 точка иницирования)

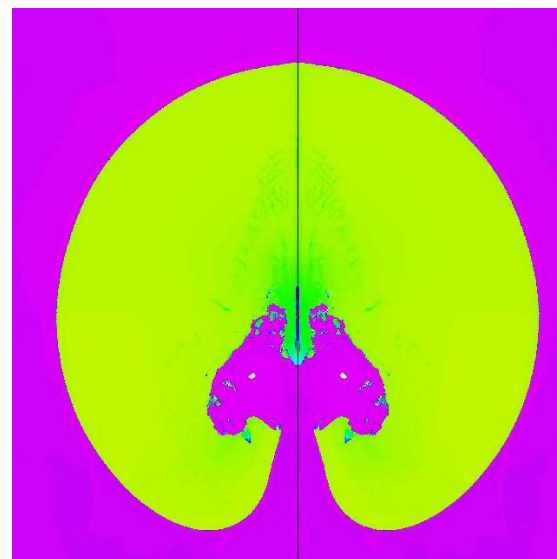


Поля плотностей

Сравнение с экспериментом



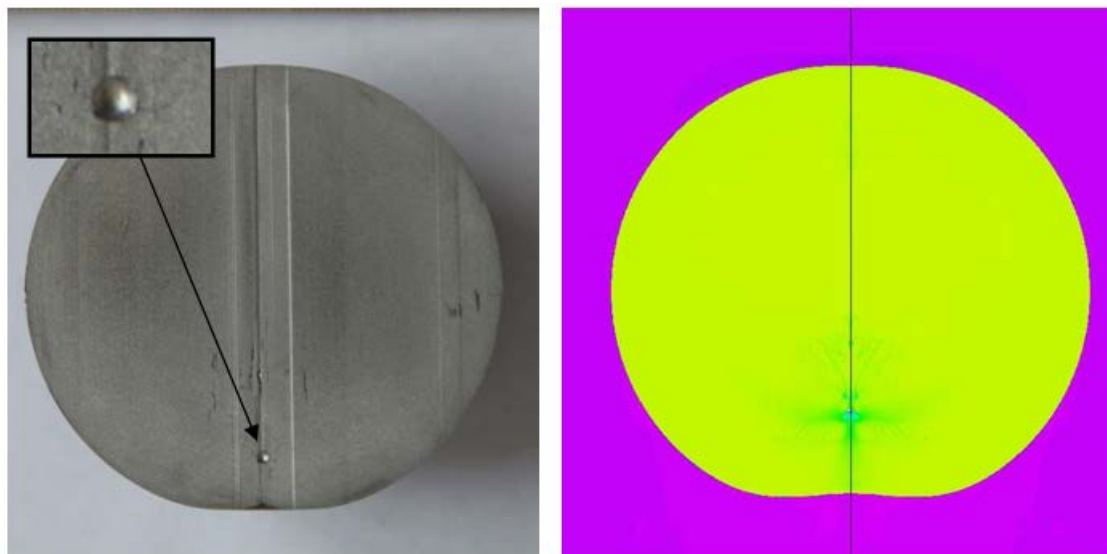
в 4 точках



по правой полусфере

Шар и в опыте, и в расчетах приобрел форму "яблока". В расчете с детонацией по кольцам размер внутренней полости шара хорошо согласуется с экспериментом, но расстояние между "загнутыми" краями больше. В расчете с детонацией от полусферического слоя это расстояние несколько меньше, но внутренняя полость занимает гораздо больший объем, чем в эксперименте.

Сравнение с экспериментом



в 1 точке

В расчете шар приобрел "приплюснутую" форму и имеет некоторые трещиноватости в нижней части, как и в эксперименте. Но полость в виде маленькой (радиусом около 0.8 мм) сферы (показана на врезке) в расчете не образовалась.

Выводы и ссылки

По программе МЕЧ получено неплохое согласие формы и размеров расчетно прогнозируемых и экспериментально наблюдаемых зон повреждений в шарах из стали 30ХГСА и 12Х18Н10Т при различных видах детонации.

1. E.A.Kozlov. Experimental verification of E.I.Zababakhin hypothesis concerning limitation of energy cymulation in the spherically converging shock wave front in medium with phase transitions. First Zababakhin's Scientific Readings, 1990.
2. E.A.Kozlov, A.V.Petrovtsev, G.V.Kovalenko et. al. SCCM-2007
3. Б.В.Литвинов, В.И.Зельдович, Н.Ю.Фролова и др. Эффекты кумуляции в стальных шарах при различных условиях фокусировки сходящихся ударных волн. Труды международной конференции «X Забабахинские научные чтения», РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010.
4. Е.А.Козлов, А.В.Т.Сапожников, Н.С.Жиляева, Л.В.Хардина, Л.П.Брезгина, А.А.Дегтярев, О.А.Никитин, Е.О.Ковалев, Н.С.Базаров. Взрывные эксперименты в осесимметричной постановке в интересах верификации моделей сдвиговой и откольной прочности металлов и сплавов. XI Забабахинские научные чтения, 2012.
5. Е.А.Козлов, С.А.Бричиков, Д.П.Кучко и др. Особенности динамики схождения стальных оболочек при их взрывном нагружении по результатам лазерно-интерферометрических измерений. ФММ, т.112, №4, 2011.
6. М.Ю.Сахаров, А.Ю.Ададунов, Д.М.Шалковский. Расчет эволюции сходящихся ударных волн в стальном шаре при несимметричном инициировании. ЗНЧ-XIII, 2017.
7. Е.Н.Аврорин, Н.Н.Анучина, В.В.Гаджиева, В.П.Елсуков, Б.П.Мордвинов. Численное моделирование взаимодействия частиц кометы Галлея с космическим аппаратом. // Препринт ИПМ имени Келдыша, № 177, 1985.
8. Физика взрыва / Под ред. Л.П.Орленко. Т.2. – М.: Физматлит, 2002, 656 с.

Спасибо за внимание!