

УДК 624.074.4:678.067

# **Взрывозащитная камера с несущей способностью до 40 кг ТЭ для протонной радиографии. Расчетно-экспериментальные исследования**

**А. И. Абакумов, М. Ф. Абдуллин,  
Е. Д. Вишневецкий, В. Ю. Мельцас,  
О. В. Орешков, Г. Ф. Портнягина,  
М. А. Сырунин, А. П. Цой,  
В. А. Чернов, Д. В. Ханин**

*Представлены расчетно-экспериментальные данные по разработке взрывозащитной камеры для протонной радиографии. Приведены результаты численного моделирования газодинамических нагрузок при взрыве зарядов с энерговыделением ~40, ~50 и ~60 кг ТЭ и напряженно-деформированного состояния взрывозащитной камеры при динамической реакции на указанные уровни нагрузок. Анализируются данные экспериментов при последовательном нагружении взрывозащитной камеры взрывами зарядов с энерговыделением ~40, ~25 и ~55 кг ТЭ, подтверждающие расчетную несущую способность и полуторакратные запасы прочности разработанной конструкции. Созданная взрывозащитная камера (длина 6,2 м, диаметр 1,42 м, масса ~25 т) предложена в качестве защитного контура, локализирующего взрывное выделение энергии до 40 кг ТЭ, для протонной радиографии.*

Протонная радиография, развиваемая на базе протонного синхротрона У-70 ГНЦ ИФВЭ, с применением для формирования радиографического изображения пучка высокоэнергичных протонов ГэВ-го диапазона, является одним из перспективных методов невозмущающей диагностики быстропротекающих процессов [1]. Взрывчатые вещества (ВВ) в таких исследованиях используются в качестве нагружающих устройств, создающих высокие давления и температуры, или как объект исследования. При этом поражающие факторы взрыва (ударная волна, газообразные продукты взрыва, высокоскоростные осколки), распространяясь с высокой скоростью, воздействуют на окружающую среду. Одним из путей защиты окружающей среды от воздействия взрыва является его локализация в замкнутом объеме взрывозащитной камеры (ВЗК).

В отличие от конструкций ВЗК, ранее применяемых в РФЯЦ-ВНИИЭФ для физических исследований, а также работ с аварийными боеприпасами и террористическими объектами [2], к ВЗК для протонной радиографии предъявляется дополнительное требование о наличии специальных радиографических вводов (окон) для прохождения пучка протонного излучения, формирующего изображение взрывного объекта, находящегося внутри ВЗК. Эти вводы не должны снижать несущей способности ВЗК [3].

На основании проведенных расчетно-экспериментальных исследований разработана новая ВЗК для протонной радиографии. Она представляет собой стальную сварную конструкцию цилиндрической формы с плоскими днищами. ВЗК спроектирована как двухконтурная конструкция, состоящая из внутреннего контура и внешнего корпуса, расположенных соосно, с воздушным зазором между ними. Для обеспечения доступа во внутреннюю полость ВЗК в ее корпусе имеется боковой ввод, который герметично закрывается прочной крышкой. В плоских днищах ВЗК, защищенных демпферной системой, организованы радиографические окна (вводы) с многослойными крышками. На техническое решение, применяемое в конструкции ВЗК, получен патент РФ (заявка на изобретение № 2013116147 от 09.04.2013). Вид ВЗК показан на рис. 1 (см. также цв. вкладку).



Рис. 1. Общий вид ВЗК

При использовании программных комплексов ДИАДА [4] и ДАНКО [5] выполнена серия расчетов ВЗК, включающих численное моделирование газодинамических нагрузок при взрыве зарядов ВВ с энерговыделением до  $\sim 60$  кг ТЭ и напряженно-деформированного состояния ВЗК при динамической реакции на указанные уровни нагрузок. Расчетная схема конструкции приведена на рис. 2 (см. также цв. вкладку). Характер напряженно-деформированного состояния внутреннего корпуса конструкции ВЗК при нагрузках 40 и 60 кг ТЭ представлен на рис. 3, 4 (см. также цв. вкладку). Временные зависимости изменения смещения днища и интенсивности деформации зоны внутреннего корпуса, находящейся над центром взрыва, приведены на рис. 5–7. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по уровню достигнутой деформации на наружном корпусе ВЗК (уровень деформации в эксперименте и расчете не превышает 0,3 %, рис. 3, 10) и по зависимости смещения днищ (см. рис. 5) показывает хорошее согласие. По результатам прочностных расчетов ВЗК было сделано заключение о достаточности ее несущей способности при однократном взрыве в ее полости заряда ВВ до  $\sim 60$  кг ТЭ.

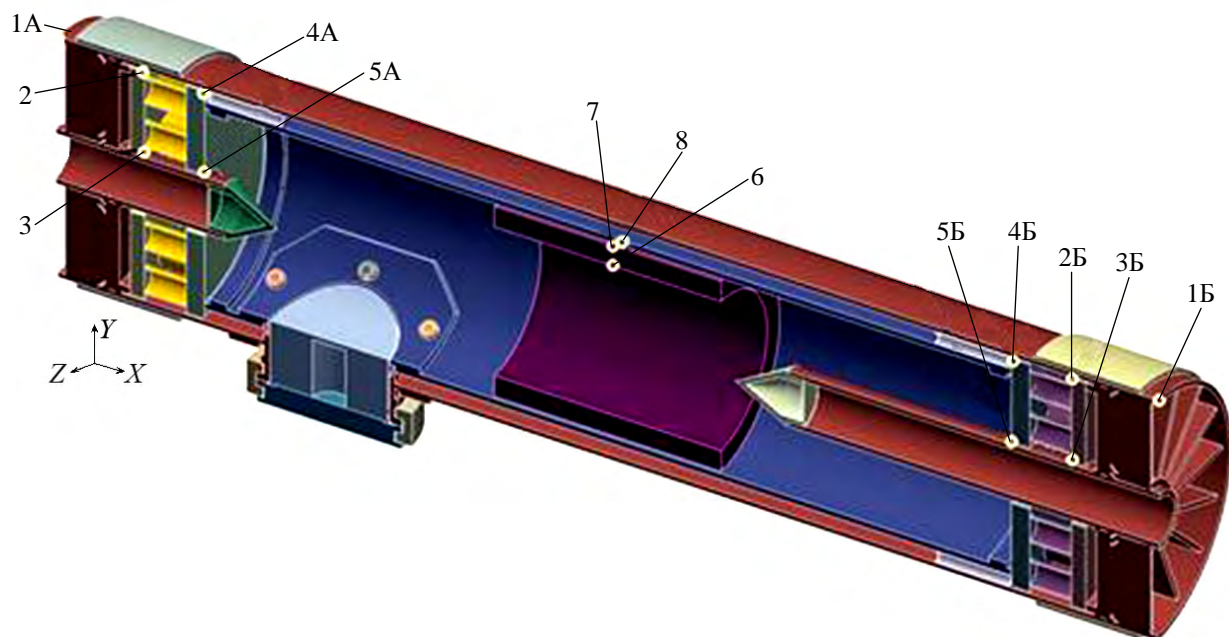


Рис. 2. Расчетная схема ВЗК

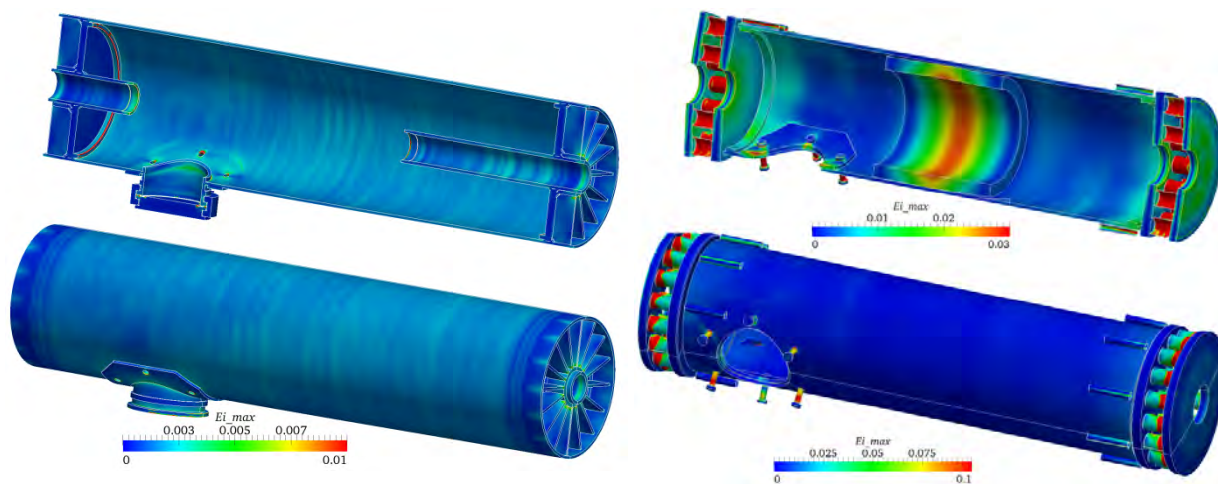


Рис. 3. Распределение максимальной достигнутой интенсивности деформации на элементах конструкции при взрыве заряда ВВ 40 кг ТЭ

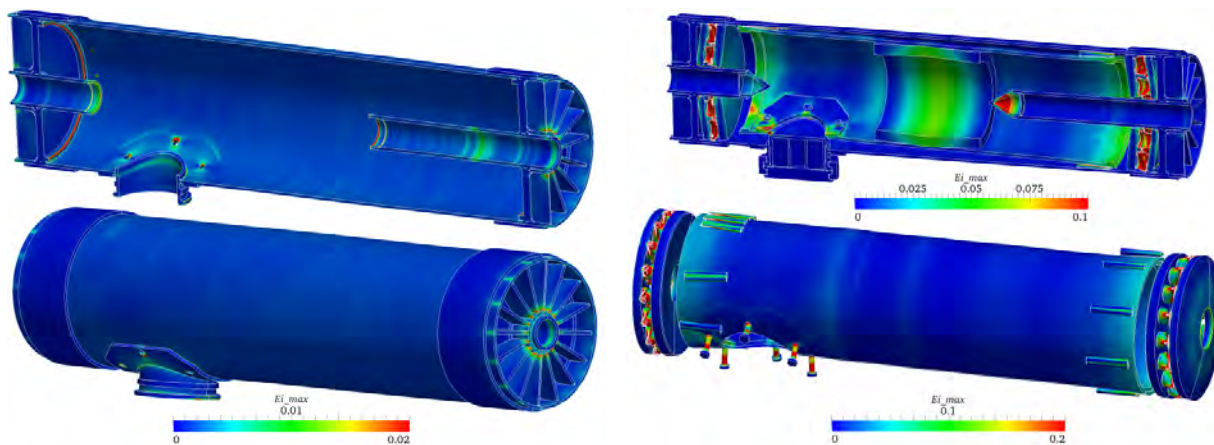


Рис. 4. Распределение максимальной достигнутой интенсивности деформации на элементах конструкции при взрыве заряда ВВ 60 кг ТЭ

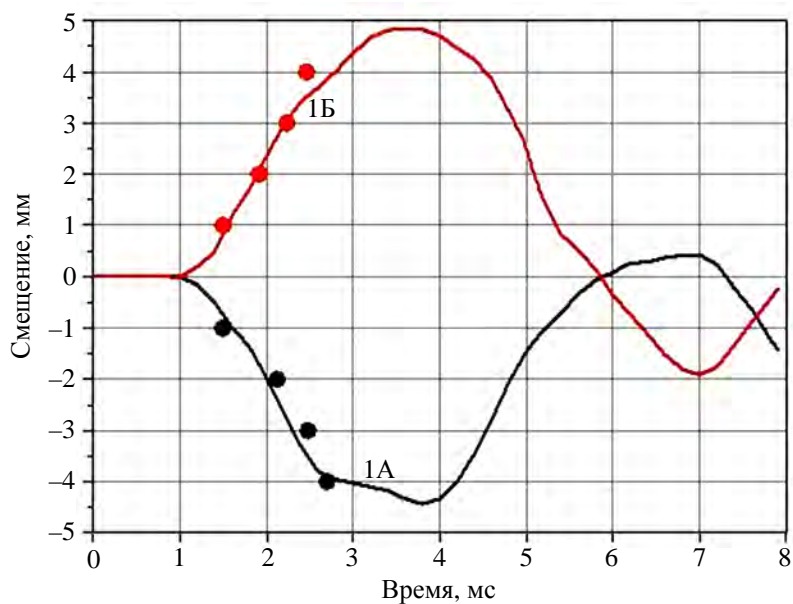


Рис. 5. Расчетная (сплошная кривая) и экспериментальная (маркеры) временные зависимости смещения в точках 1А и 1Б конструкции ВЗК (см. рис. 2) при взрыве заряда ВВ 40 кг ТЭ



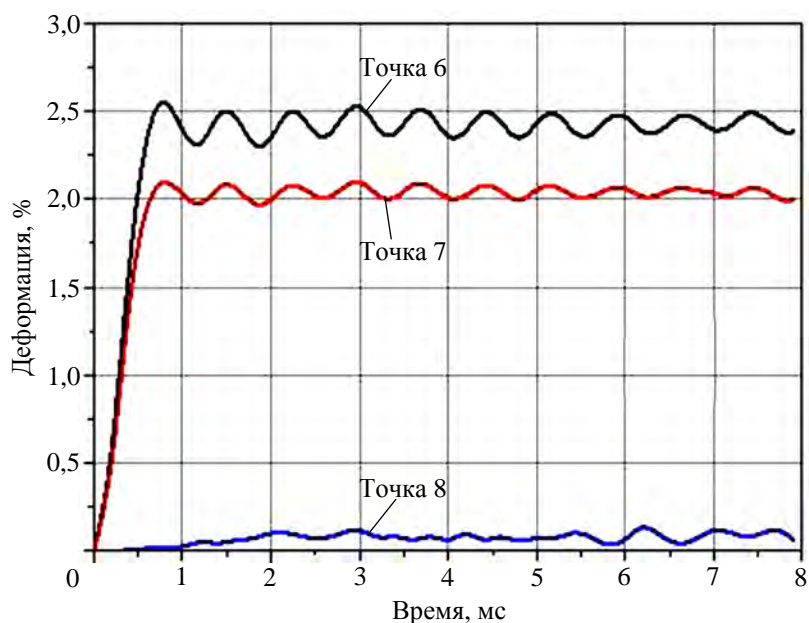


Рис. 6. Временные зависимости интенсивности деформации в точках 6, 7 и 8 конструкции ВЗК (см. рис. 2) при взрыве заряда ВВ 40 кг ТЭ

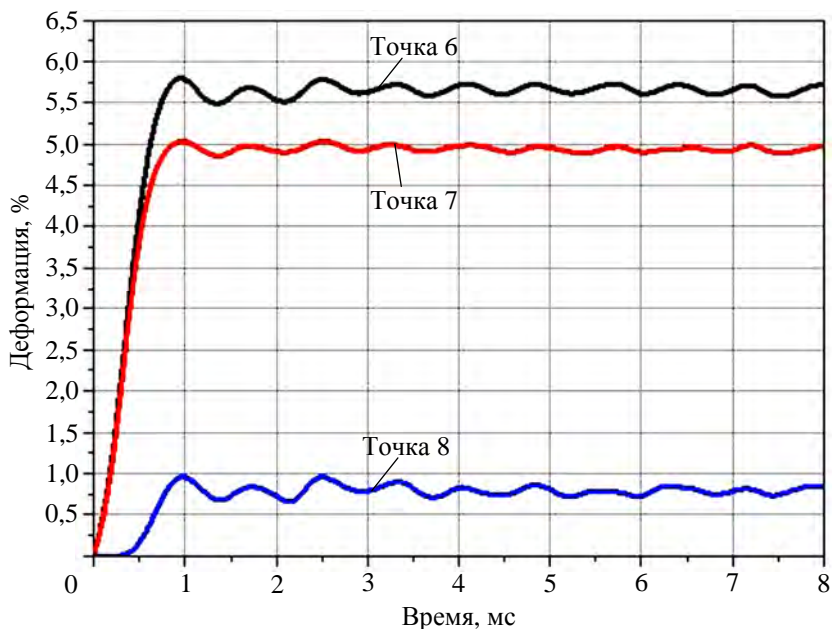


Рис. 7. Временные зависимости интенсивности деформации в точках 6, 7 и 8 конструкции ВЗК (см. рис. 2) при взрыве заряда ВВ 60 кг ТЭ

Проведены три эксперимента, в которых ВЗК последовательно нагружалась взрывами зарядов с энерговыделением ~40, ~25 и ~55 кг ТЭ. В первом эксперименте при нагружении взрывом номинального заряда ВВ с энерговыделением ~40 кг ТЭ камера сохранила конструкционную це-

лостность и условную герметичность. Во втором эксперименте при нагрузке на 38 % ниже номинала ВЗК сохранила герметичность на уровне  $10^{-4}$  л/с. Третье испытание конструкции при нагрузке, превышающей номинальную в 1,4 раза, подтвердило ее герметичность на том же уровне, что и во втором испытании, и соответствующий запас прочности по отношению к первому испытанию. Эксперименты позволили аттестовать ВЗК как бронеканеру однократного применения при нагрузках до 40 кг ТЭ и показать принципиальную возможность ее многократного использования. На рис. 8, 9 (см. также цв. вкладку) приведены фотографии камеры после испытания и нагружающего устройства для третьего испытания. Зависимости продольной деформации от времени, характеризующие динамическую реакцию корпуса ВЗК, и зависимости изменения избыточного давления в полости ВЗК, полученные в испытаниях при нагрузках ~40 и ~55 кг ТЭ, приведены на рис. 10, 11. Уровни окружных и продольных деформаций корпуса ВЗК в этих экспериментах не превышали 0,4 %, максимальное квазистатическое давление, зарегистрированное в третьем опыте, составило 55 ат. Экспериментальные исследования подтвердили расчетные оценки несущей способности и примерно полуторакратный запас прочности разработанной конструкции.



Рис. 8. Нагружающее устройство ~55 кг ТЭ, установленное в ВЗК



Рис. 9. ВЗК после нагружения взрывом заряда ВВ 55 кг ТЭ

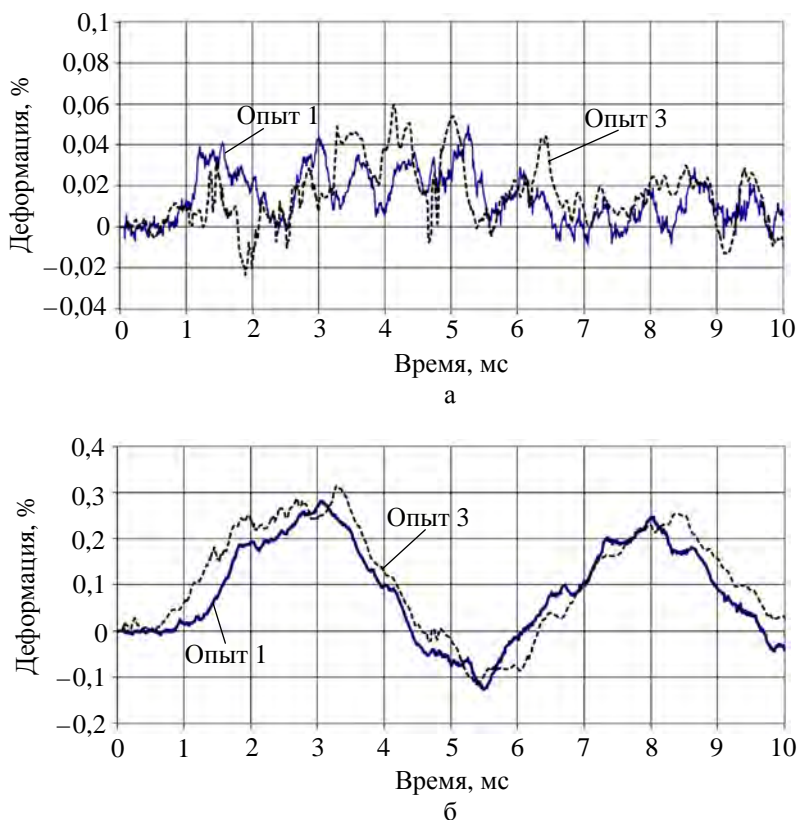


Рис. 10. Окружная (а) и продольная (б) деформация наружного корпуса ВЗК в сечении на расстоянии 730 мм от торца в опытах № 1 и 3

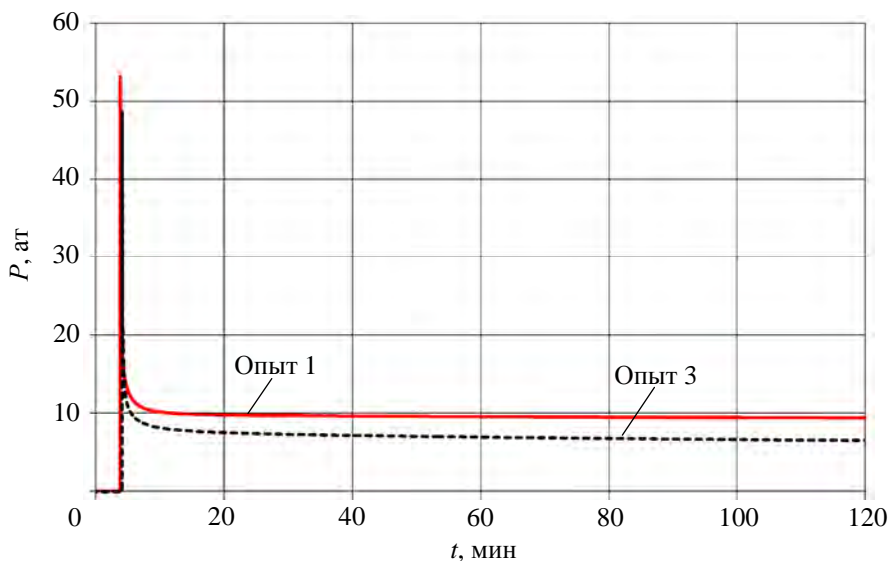


Рис. 11. Зависимости давления от времени во внутренней полости ВЗК в опытах № 1 и 3. За условное начало отсчета времени на графике принято время за 3 мин до подрыва заряда. Давление в полости ВЗК перед подрывом ~0,1 ат. В опыте № 1 максимальное давление составило 53,2 ат, в опыте № 2 – 48,86 ат

Созданная ВЗК длиной 6,2 м, диаметром 1,42 м и массой ~25 т будет применяться в качестве защитного контура, локализирующего взрывное выделение энергии до 40 кг ТЭ, при проведении динамических экспериментов с использованием протонной радиографии [1].

## Список литературы

1. Бурцев В. В., Лебедев А. И., Михайлов А. Л. и др. Многокадровая протонография – метод исследования быстропротекающих гидродинамических процессов // ФГВ. 2011. Т. 47, № 6. С. 16–28.
2. Рыжанский В. А., Федоренко А. Г., Сырунин М. А. и др. Монография. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
3. Пат. РФ № 2367899, МПК F42D5/04. Локализирующее устройство для радиографических исследований взрывных процессов / М. А. Сырунин, Е. Д. Вишневецкий, А. Л. Михайлов, О. В. Орешков, А. Г. Федоренко, А. П. Цой, В. А. Чернов и др. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 26.
4. Величко О. М., Губкова Г. Н., Дерюгин Ю. Н. и др. Пакеты программ для решения многомерных задач газовой динамики разностным методом Годунова // Сб. докл. науч. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000.
5. Аттестационный паспорт программного средства ДАНКО № 332 от 12.09.13.

## **Explosion-Proof Camera of Loading Capacity up to 40 kg TNT for Proton Radiography. Experiment-Calculated Investigation**

A. I. Abakumov, M. F. Abdulin, E. D. Vishnevetsky, V. Yu. Meltsas, O. V. Oreshkov, G. F. Portnyagina, M. A. Syrunin, A. P. Tsoy, V. A. Chernov, D. V. Khanin

*Experiment-calculated data of explosion-proof camera (EPC) development for proton radiography are presented. Given the results of numerical simulation of EPC gas-dynamic loading with high-explosive charges of ~40, ~50 and ~60 kg T.E. and stressedly-deformed state of EPC dynamic reaction to indicated above loading levels. Experimental data of consecutive EPC loading with HE charges of ~40, ~25 and ~55 kg T.E. are analyzed that confirm calculation loading capacity and one-and-a-half safety factors of developed construction. Designed EPC with dimensions: length – 6.2 m, diameter – 1.42 m and total mass ~ 25 t has been proposed as a container housing that localizes explosive energy release up to 40 kg T.E. for proton radiography.*