



НИИЭФА  
РОСАТОМ

# РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ГЕКСОГЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ УНИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Алексеев Д.И.<sup>1</sup>, Кривошеев С.И.<sup>2</sup>, Манзук М.В.<sup>1</sup>, Паученко А.Н.<sup>1</sup>,

Харченко В.В.<sup>1</sup>.

1. Акционерное Общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия
2. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

ЗНЧ-2023, секция 2. Взрывные и детонационные явления

Харченко Вадим Вальтерович, e-mail: [v.v.harchenko@mail.ru](mailto:v.v.harchenko@mail.ru)

Ведущий исследователь отдела сильноточной  
коммутационной аппаратуры

# Установки управляемого термоядерного синтеза



НИИЭФА  
РОСАТОМ

FusDIS	Tech Data	Country Stats	Org Stats	FEC2020 IDX	FECs IDX
--------	-----------	---------------	-----------	-------------	----------

Search Device Name  
Highlight Device Name



<b>Total</b>	<b>Tokamaks</b>	<b>Stellarators/Heliotro..</b>	<b>Laser/Inertial</b>	<b>Altern. Concepts</b>	<b>Exp</b>	<b>Demo</b>
<b>74</b>	<b>74</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>38</b>	<b>67</b>	<b>7</b>

<b>Tokamaks</b>
-----------------



Country	№
Japan	13
China	8
Russia	7
United States	7
United Kingdo..	5
Pakistan	4
Brazil	3
India	3
Iran	3
Republic of K..	3
Czech Republic	2
France	2
Italy	2
Canada	1
Costa Rica	1
Denmark	1
Egypt	1
European Uni..	1
Germany	1
Kazakhstan	1
Libya	1
Portugal	1
Spain	1
Switzerland	1
Thailand	1

<b>Operating</b>	<b>Under construction</b>	<b>Planned</b>	<b>Public</b>	<b>Private</b>
<b>55</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>69</b>	<b>5</b>

© 2021 Mapbox © OpenStreetMap

# Назначение и особенности конструкции быстродействующих защитных коммутационных аппаратов.



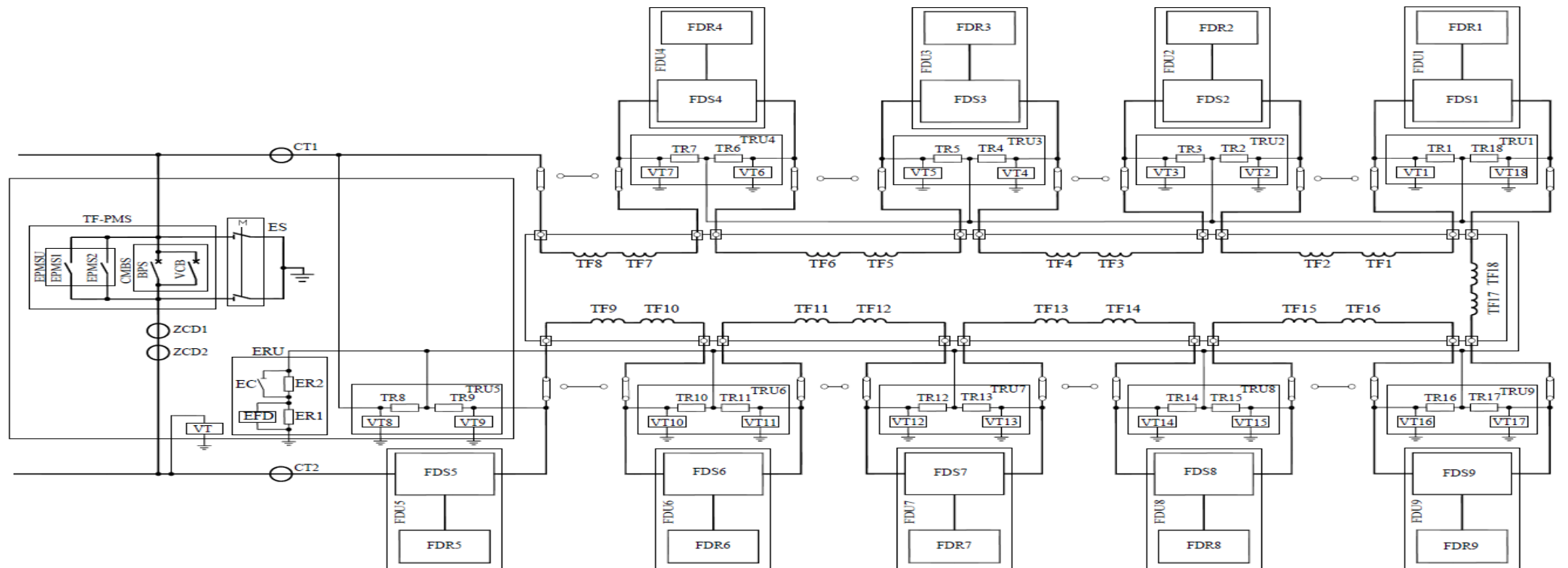
НИИЭФА  
РОСАТОМ

Быстродействующие защитные коммутационные аппараты входят в принципиальную электрическую схему обмоток тороидального магнитного поля (TF).

Принципиальная электрическая схема обмоток тороидального магнитного поля выполнена высоконадёжной, с элементами дублирования.

Работоспособность обмоток тороидального магнитного поля сохраняется:

Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема обмоток тороидального магнитного поля



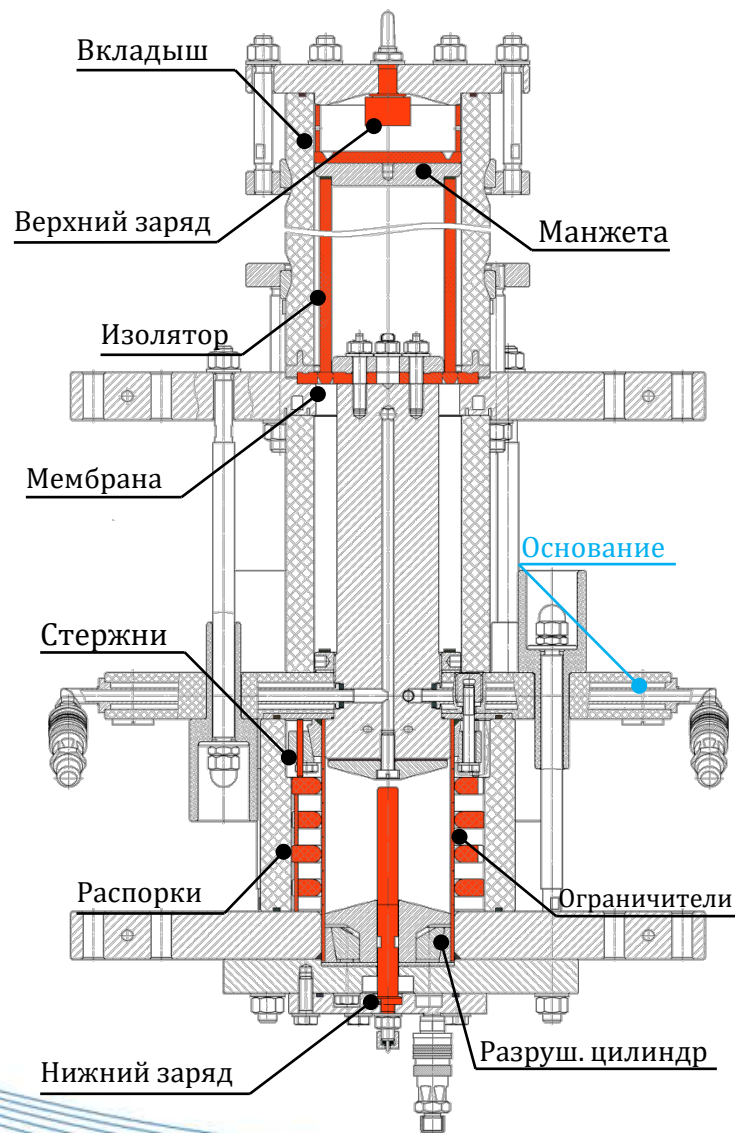


# Устройство и работа детонационного размыкателя.

Рис.2 Элементы конструкции размыкателя представлены ниже.



НИИЭФА  
РОСАТОМ



# Параметры защитных коммутационных аппаратов



НИИЭФА  
РОСАТОМ

Параметр	Ед.	JT-60SA	KSTAR	ITER
Номинальный постоянный ток	кА	30	40	70
Максимальный коммутируемый ток	кА	40	60	110
Ток электродинамической стойкости (t = 100 мс)	кА	70	200	420
Время срабатывания	мкс	150	175	200
Номинальное напряжение	кВ	5	6	10
Допустимое напряжение	кВ	-	-	20
Испытательное напряжение (1 мин., 50 Гц)	кВ АС	7,1	20	28
Импульсное испытательное напряжение	кВ	-	-	60
Сопротивление	мкОм	<8	<10	<10
Испытательное давление в гидр. сист.	МПа	1,2	1,2	1,2
Кол-во каналов охлаждения		4	4	4
Номинальный расход воды	м <sup>3</sup> /ч	2,4	3,0	3,4

# Прочностной расчёт мембраны с учётом динамической нагрузки.



НИИЭФА  
РОСАТОМ

- Давления ПВ, развивающиеся внутри вкладыша чертёж 1А.518.002 составляет величину менее 50 МПа (вкладыш при этом не разрушается). Тогда без большой погрешности расчётов [3] можно пользоваться уравнением Менделеева-Клапейрона для идеальных газов.
- При взрыве ВВ тепло преобразуется в механическую работу, которую совершают ПВ в процессе своего расширения.
- Отметим, что при давлениях  $P=50\dots 100$  МПа (давление внутри зарядной капсулы), закон расширения ПВ описывается политропой вида  $P \cdot V^n = \text{const}$ , при меньших давлениях – адиабатой  $P \cdot V^\gamma = \text{const}$ ,
- где  $\gamma = C_p / C_v$ , т.е. соотношение теплоёмкостей ПВ при постоянном давлении и объёме, как для идеальных газов.
- Если элементарный состав газов ВВ отвечает формуле  $C_a H_b N_c O_d$  и ВВ имеет отрицательный кислородный баланс (КБ гексогена  $C_3 H_6 N_6 O_6$  составляет -21,6%), то ПВ могут содержать следующие газы:
- $CO_2$ ,  $CO$ ,  $C$  в виде сажи, графита или алмаза,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ .
- Реакцию разложения можно записать в виде:
- $m \cdot CO_2 + n \cdot CO + p \cdot C + r \cdot H_2O + q \cdot H_2 + c/2 \cdot N_2$ .
- Для решения задачи воспользуемся результатами расчётного моделирования по термодинамической программе ВКВ-Т (Вирченко В.А., 2014):



## Результаты численного моделирования.



Развиваемое давление	$T_k$ , К	$R \cdot T_{пр}$ , МДж/кг	$R \cdot T_{газ}$ , МДж/к, г	Z газ, %	$\mu_{газ}/\mu_{пв}$	$\gamma = C_p/C_v$	$\alpha$ , дм <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/дм <sup>3</sup>
20 МПа	3769	1,316	1,316	100%	23,81/ 23,81	1,2369	1,17	1,8

Определена температура взрыва, при детонации RDX в замкнутом объёме, По расчётным оценкам получаем, что при давлении 20МПа и  $T=3769\text{К}$ , молярная масса газов составляет величину 23,81 г/моль.

Таким образом, получили расчётную величину давления горячих газов  **$P= 24,86$  МПа.**

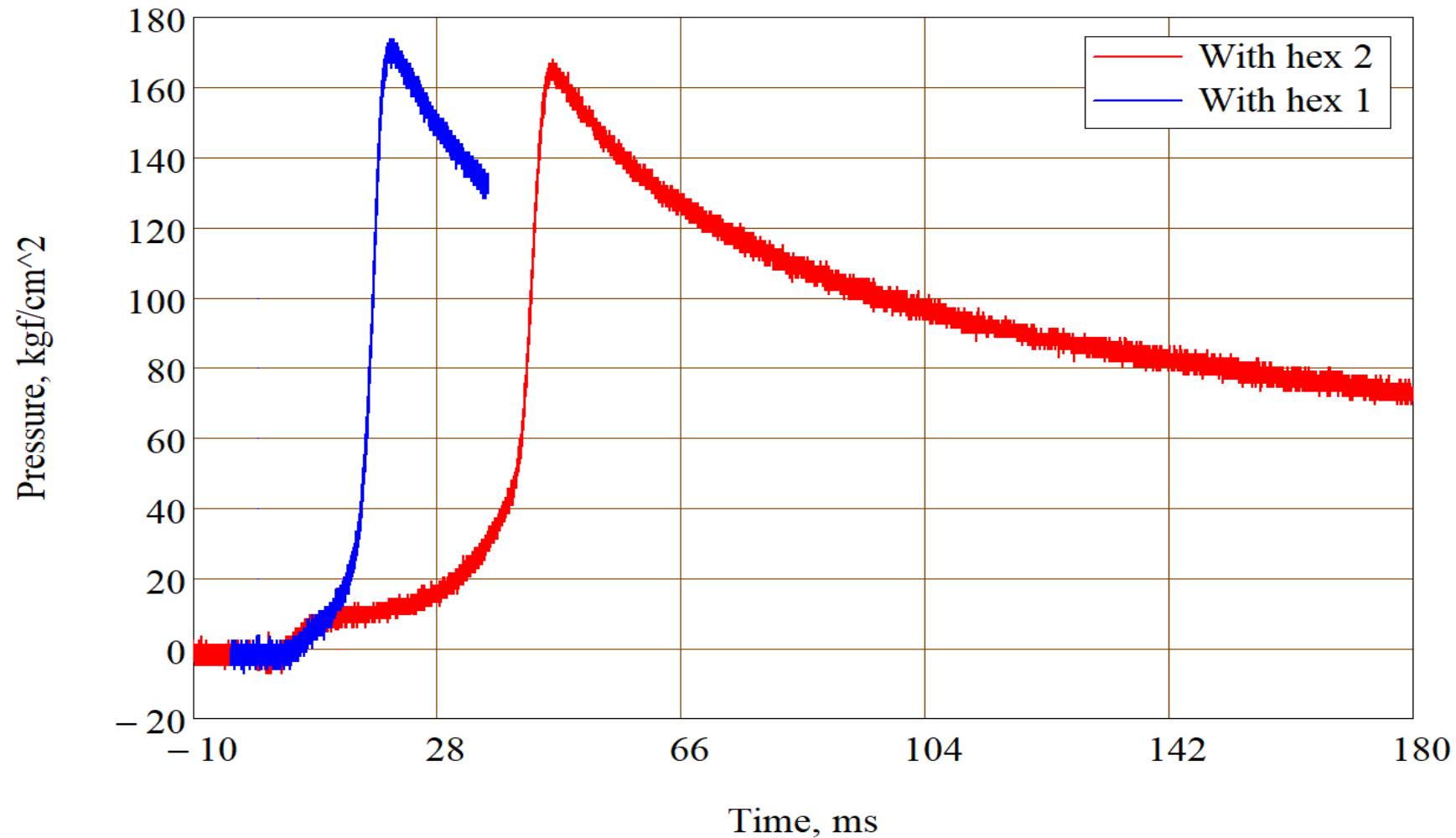
Усилие среза по площади контакта  **$F= 257737$  Н.**

# Экспериментальное подтверждение величины молярных газов при сжигании 1 грамма гексогена насыпной плотности в манометрической бомбе объёмом 73 куб. см.



НИИЭФА  
РОСАТОМ

Рис.3 Типовые результаты экспериментов с поджигом 1 грамма гексогена насыпной плотности от электровоспламенителя.



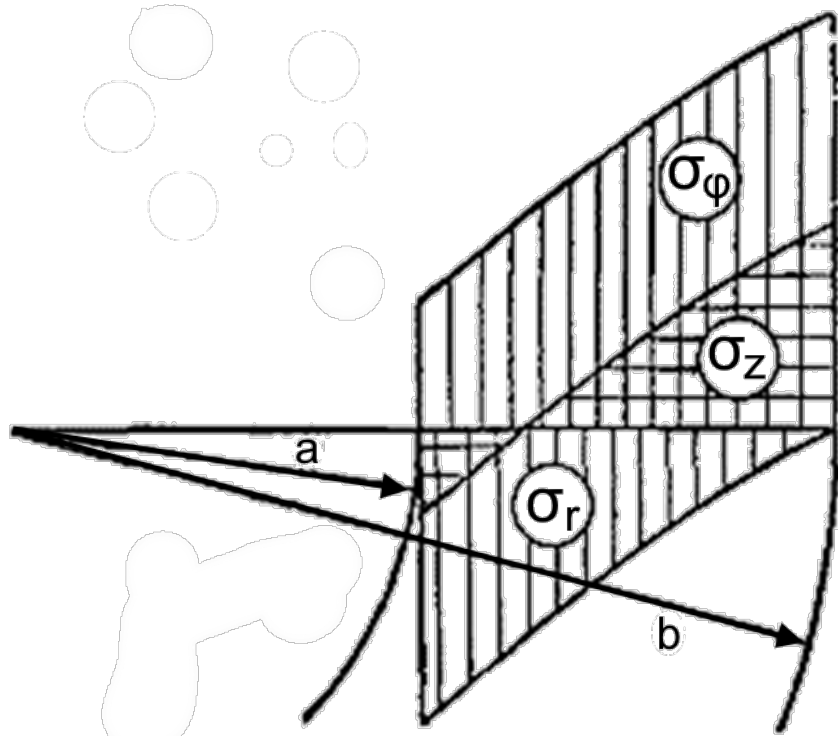




## Результаты расчёта срезной мембраны с учётом динамической нагрузки.

- Мембрана срезная (чертёж 3А.546.522) изготовлена из листа ГПРХХ 12 М1 по ГОСТ 1175-2006. Медь, отожжённая марки М1 по ГОСТ 859-2014 [7] имеет следующие механические характеристики (модуль Юнга и временное сопротивление разрыву):
  - $E = 1,28 \cdot 10^5$  МПа;
  - $\sigma_T = 220 \dots 250$  МПа.
- В расчётах принимаем, что эквивалентная толщина мембраны в зоне среза (концентратор напряжения) составляет 4 мм (расчёт в запас), то есть  $h = 0,4$  см.
- Диаметр среза  $2 \cdot a = 124 \text{ мм} = 12,4$  см;
- диаметр диэлектрического цилиндра (изолятора)  $2 \cdot b = 96 \text{ мм} = 9,6$  см.
- S-площадь поверхности контакта из определяем, как площадь кольца. Из геометрических соображений.  $S = \pi \cdot (R^2 - r^2) = 120,7 - 72,3 = 48,4 \text{ см}^2$ .
- $\sigma_{\max} = C_2 \cdot (P \cdot a^2 / h^2) = 1174$  МПа, [6].
- Условие гарантированного разрушения мембраны можно записать в следующем виде:
- $\sigma_{\max} \geq [\sigma]$ . То есть  $1174 \geq 360$  МПа. Гарантированный коэффициент К запаса по разрушению мембраны равен  $K = 1174 / 360 = 3,26$ .

# Расчёт на прочность цилиндра контактного за пределами упругости по теории Мизеса [8].



Здесь:

$\sigma$  – нормальные (главные) напряжения;

$z$ ,  $r$  и  $\varphi$  – цилиндрические координаты;

$a$  – внутренний радиус цилиндра;  $b$  – наружный радиус цилиндра.

При этом  $\sigma_\varphi > \sigma_z > \sigma_r$

По критерию Мизеса можно записать:

$$q = \sigma_T \frac{b^2 - a^2}{\sqrt{3}b^2}$$

где:  $q$  – внутреннее давление, при котором весь материал переходит в пластическое состояние;

$\sigma_T$  – предел текучести материала цилиндра.

# Расчёт на прочность цилиндра контактного за пределами упругости по теории Мизеса.



Предположим, что в трубке осуществляется плоское деформированное состояние, то есть относительное удлинение материала вдоль оси  $z = 0$ .

$$\sigma_r = -q_t + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t \ln \frac{r}{a},$$

$$\sigma_\varphi = -q_t + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t \left(1 + \ln \frac{r}{a}\right),$$

$$\sigma_z = -q_t + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{r}{a}\right).$$

Внутреннее давление, при котором весь материал трубки переходит в пластическое состояние:

$$q_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_t \ln \frac{b}{a}$$

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр  $a$  – 111мм;
- наружный диаметр  $b$  – 117 мм;
- предел текучести материала  $\sigma_t$  для меди марки М1 по ГОСТ 859-2014 (240 МПах1,5) – 360 МПа;
- коэффициент Пуансона  $\mu = 0,3$ .





## Механические свойства, характеризующие прочностные и пластические свойства медного цилиндра с учётом динамики нагружения.

- Для меди марки М1  $\sigma_{\text{в}} = 250 + 15\varepsilon \%^{0,58}$ , МПа, здесь приведены данные аппроксимации автора (Ю. Н. Логинова, [19]).
- При скорости деформации **15-20 м/с**, по уравнению регрессии получаем
- $\sigma_{\text{S}} = 80 + 285\varepsilon^{0,226}$ , где
- $\sigma_{\text{S}}$ - сопротивление деформации, [МПа].
- Получаем следующие значения:
- -  $\sigma_{\text{в}} = 250 + 15 \cdot 18,333^{0,58} = 332,75$  МПа;
- -  $\sigma_{\text{S}} = 80 + 285 \cdot 18,333^{0,226} = 634,43$  МПа (экспериментальное значение  $\sigma_{\text{S}}$  показывает истинное значение динамического коэффициента нагружения  $K_{\text{д}} = 634,43/332,75 = 1,9$  при скорости деформации **15-20 м/с**).
- получим допустимые значения кратковременных разрушающих давлений (в динамике) равные:  $q_{\text{T}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{T}} \ln \frac{b}{a}$ .
- После подстановки получаем:  $\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 332,75 \cdot \ln \frac{117}{111} = 20,23$  МПа (Здесь  $\sigma_{\text{T}} = 240$  МПа заменяем на  $\sigma_{\text{в}} = 332,75$  МПа, с учётом динамики нагружения).
- Это означает, что при давлении **20,23 МПа** (в динамике, с запасом) весь материал цилиндра переходит в пластическое состояние и он начинает движение. **Получим:  $P_{\text{пр}} = 20,23$  МПа.**

# Оценочный расчёт давления продуктов взрыва в зарядной капсуле



Уравнение Нобля–Абеля:

$$P_{\text{взр}} = (P_0 V_{\text{ок}}) \frac{T_{\text{взр}}}{T_0} \left[ \frac{\rho_{\text{зар}}}{1 - \alpha_0 \rho_{\text{зар}}} \right]$$

Для точных расчётов коволюм продуктов взрыва специально рассчитывают, однако для оценочных расчётов вполне корректно взять уже известные значения.

По расчётам О.Е. Власова, коволюм продуктов взрыва гексогена при плотности 1,5 г/см<sup>3</sup> равен 4,84·10<sup>-4</sup> м<sup>3</sup>/кг.

**$T_0 = 283\text{К}$ .  $P_0 = 0.1$  МПа.** Рассчитанное заранее значение ПВ  **$V_{\text{ок}} = 0,8$  м<sup>3</sup>/кг.**

При плотности заряжания 1000 кг/м<sup>3</sup> и температуре продуктов взрыва  $T_{\text{взр.}} = 3769$  К получаем:

$$P_{\text{взр}} = 20650 \text{ кгс/см}^2 \approx \mathbf{2000 \text{ МПа.}}$$

Таким образом, давление в зарядной капсуле, окруженной водой, рассчитанное по формуле Нобля-Абеля, составляет величину около **2000 МПа.**

# Оценочные расчёты скорости разлёта оболочки зарядной капсулы



Формула Гарни (широко используется в расчётах при метании металлических пластин взрывом, а также для оценки скорости метания и углов разлёта осколков):

$$\frac{V}{(2E_G)^{0.5}} = \left(\frac{M}{C} + 0.5\right)^{-0.5},$$

где:  $C$  – масса ВВ ( $m = 0.02$  кг);  $M$  – масса капсулы.

После подстановки, при  $(2E_G)^{0.5} = 2.29$  км/с для гексогена насыпной плотности, получаем:

$$V = 1,87 \text{ км/с}$$

Известно, что скорость звука в пресной воде при атмосферном давлении и температуре 65 °С составляет величину около 1,52 км/с. То есть скорость разлёта оболочки зарядной капсулы превышает скорость звука в водной среде.



# Численное моделирование в ANSYS Autodyn.



Выполнен численный анализ процесса деформации на основе данных, полученных из аналитического расчета.

В качестве расчетной модели использована модель деформирования с пластическими характеристиками Джонсона–Кука для бескислородной меди. Согласно модели пластичности Джонсона–Кука механическое напряжение при пластическом деформировании описывается следующим выражением:

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C\ln\dot{\varepsilon}_p^*][1 - T^{*m}]$$

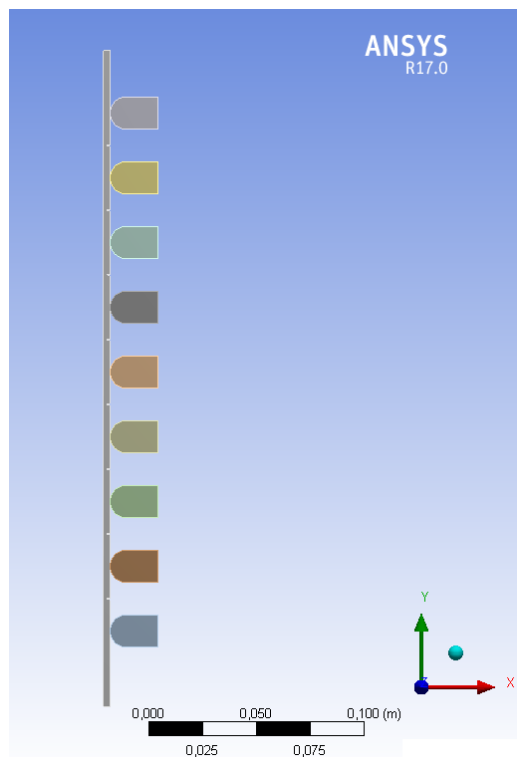
где:

- $\varepsilon_p$  – эффективные пластические деформации
- $\dot{\varepsilon}_p^*$  – относительная скорость деформации
- $T^{*m}$  – гомологическая температура
- A, B, C, n, m – параметры модели.

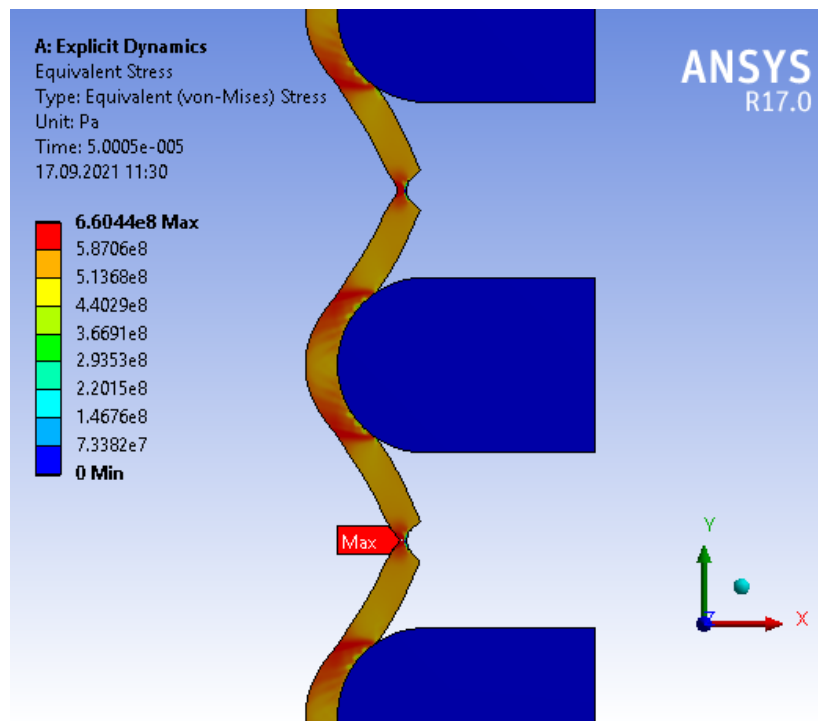
# Численное моделирование в ANSYS Autodyn.



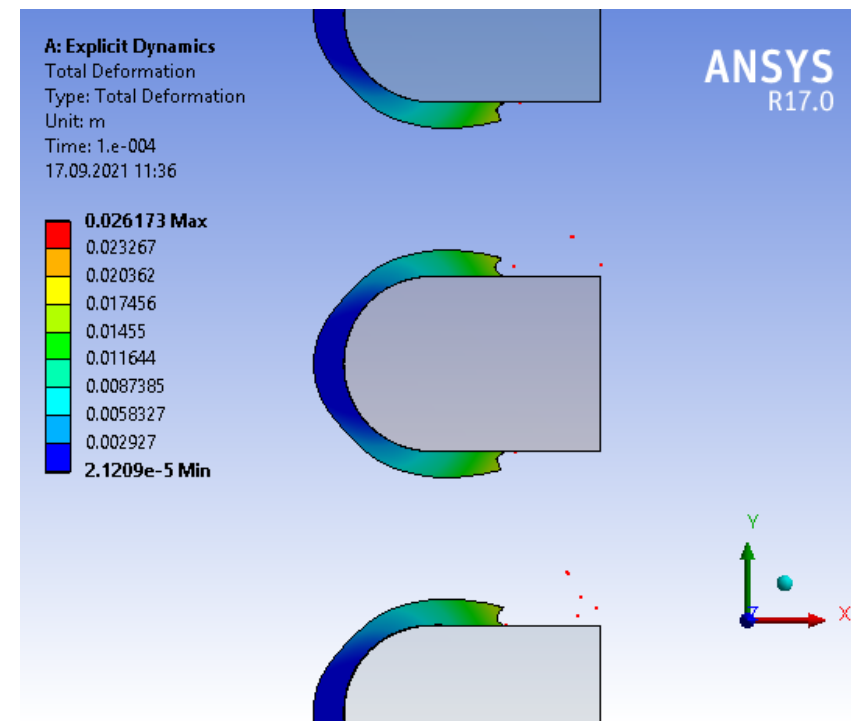
НИИЭФА  
РОСАТОМ



Геометрия расчётной области



Распределение механических напряжений



Деформация цилиндра

# Подготовка и проведение испытаний по определению давления в водной среде при взрыве 1 грамма RDX.

- С помощью индуктивного датчика избыточного давления ДДИ-20, который предназначен для измерения быстропеременных давлений в пневматических и гидравлических системах и нормирующего преобразователя НП-03 производства ООО «ЦАТИ» (Московский энергетический институт) [24] был подготовлен и проведён эксперимент.

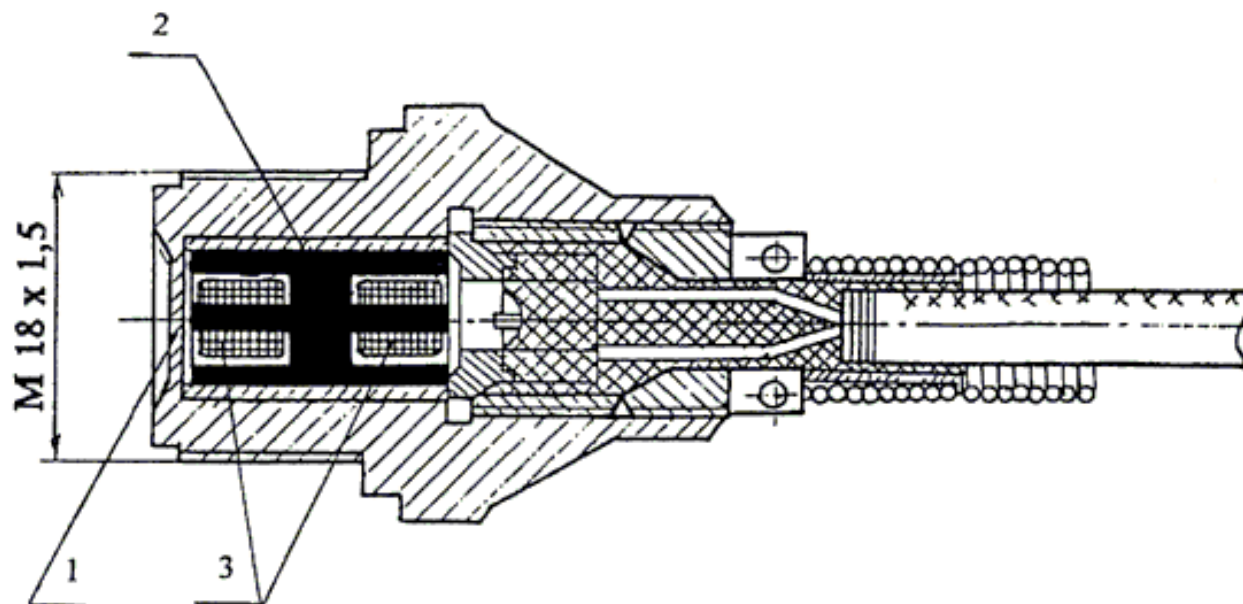
- На Рис. 4. Датчик давления ДДИ-20.

1. Чувствительный элемент (мембрана). 2.Магнитопровод. 3.Рабочая и компенсирующая катушки. Контрольное давление датчика ДДИ-20

соответствовало  $P_k=120 \text{ кгс/см}^2$  При достижении номинального значения избыточного давления, на выходе датчика фиксируется

напряжение равное 2,4 В. Регистрация данных проводилась с использованием цифрового осциллографа модели **DPO 3014** с тактовой

частотой 200 МГц.

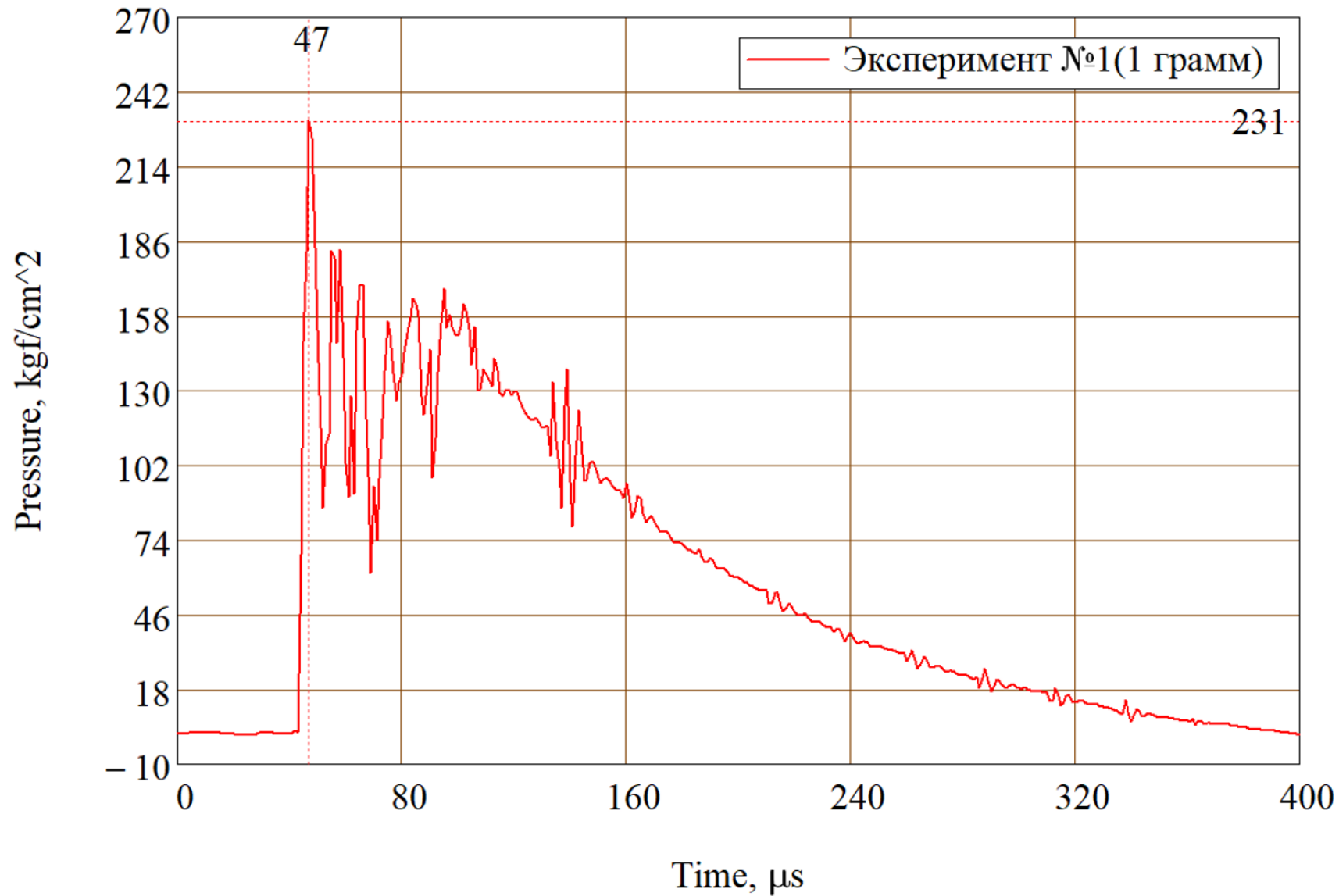






## Результаты прямого эксперимента.

Зарегистрирована величина избыточного давления равная 23,1 МПа.



# Сравнительный анализ расчётных и экспериментальных результатов.



НИИЭФА  
РОСАТОМ

- Скорость деформации (расширения) токопроводящего цилиндра составила величину 15-20 м/с (расчёт выполнен по методике Покровского Г.И. [18]).
- Относительное удлинение цилиндра контактного по диаметру **3А.548.538** фактически составляет величину от 14,53% до 17,95% .
- для вырезанных образцов-**12,82%** [20].
- средняя величина деформации токопроводящего цилиндра 16, 24% (средняя величина деформируемого диаметра составляет 19,03 мм), при скорости расширения 20 м/с получаем значение скорости деформации  **$9,5 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$** .
- Результаты численного моделирования по ANSYS даёт значение  **$21,2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$** .
- $\sigma_S$ - максимальное сопротивление деформации  $\sigma_S = 80 + 285 \cdot 18,333^{0,226} = \mathbf{634, 43 \text{ МПа}}$ .
- Результаты численного моделирования по ANSYS даёт значение **660,44 МПа**.

## Заключение.



1. Проведены расчётно-экспериментальные исследования по определению давления продуктов взрыва RDX, применительно к конструкции защитного размыкателя для ИТЭР.
2. Определены коэффициенты запаса разрушения для надёжного срабатывания и гарантированного разрушения токоведущего цилиндра с заданными параметрами.
3. Определены параметры расчётных значений давления продуктов взрыва и скорости разлёта оболочки в водной среде.
4. Решена задача разрушения токоведущего цилиндра из меди марки М1 в водной среде по критерию Мизеса.
5. Проведён численный эксперимент по разрушению токоведущего цилиндра в пакете ANSYS. Результаты численного расчета согласуются с получаемыми в экспериментах деформациями цилиндра.
6. Зарегистрирована величина избыточного давления в прямом эксперименте равная **23,1 МПа**.
7. На расстоянии 10 радиусов  $R_{\text{вв}}$ , то есть на внутренней стенке разрушаемого цилиндра давление воды составит величину около 200 атмосфер или **20 МПа** в гидродинамическом приближении с учётом цилиндрической геометрии, что очень хорошо согласуется с расчётами, выполненными по теории Мизеса при давлении **20,227 МПа** (в динамике, с запасом), когда весь материал цилиндра переходит в пластическое состояние и он начинает движение.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.



1. ПАТЕНТ РФ на изобретение, дата подачи заявки 12.10.2020. «Взрывной размыкатель», АО «НИИЭФА», авторы: Аванесов С.Д., Манзук М.В., Волков С.М., Бесстужев К.О., Семёнова М.И., Алексеев Д.И., решение к заявке № 2020133574/07 (061327).
2. А.А. Котомин, С.А. Душенок, А.С. Козлов «Эмпирические методы расчёта взрывчатых веществ и композиций», «Лань», Санкт-Петербург, 2020 год-384с.
3. Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов «Промышленные взрывчатые вещества», 3-е издание дополненное и переработанное, Москва, «Недра», 1988 год-188с.
4. В.Ф. Захаренков «Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий», /учебник/; Балт. Гос. Техн. Ун-т. СПб-2010-276с.
5. Н.М. Беляев «Сопротивление материалов», издание пятнадцатое, переработанное, издательство «наука», главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1975-609с.
6. Справочник машиностроителя в шести томах, том 3 под редакцией С.В. Серенсена, издание второе исправленное и дополненное, «Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы», Москва, 1956-564с.
7. ГОСТ 859-2014 Медь. Марки.
8. Ю.Н. Работнов «Сопротивление материалов», «Государственное издательство физико-математической литературы», Москва, 1962-456с.
9. В.И. Феодосьев «Сопротивление материалов», издание десятое переработанное и дополненное, /учебник/, Москва, «Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана», 1999-592с.
10. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц «Теория упругости», том 7, издательство «Наука», 1987-259с.
11. Е.И. Забабахин, И.Е. Забабахин. «Явления неограниченной кумуляции». Наука, 1988-163с.
12. Е. И. Забабахин. Кумуляция и неустойчивость. РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998.



13. А.А. Дерibas «Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной», институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА и техническая физика, 2000, Т.41, №5, СО, РАН, 630090, Новосибирск.
14. Физика взрыва. /под редакцией Л.П. Орленко. - Изд.3-е переработанное и дополненное, в 2т. Т1-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002-832с.
15. Физика взрыва. /под редакцией Л.П. Орленко. -Изд.3-е переработанное и дополненное, в 2т. Т2-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002-656с.
16. Р.Коул. Взрывы в воде. Перевод с английского, Cole R.H. Underwater explosions,1948-439р.
17. «Подводные и подземные взрывы», перевод с английского под редакцией В.Н.Николаевского, издательство «Мир», Москва, 1974,-417с.
18. Г.И. Покровский «Взрыв», 4-е издание переработанное и дополненное, Москва, «Недра», 1980-190с.
19. Медь и деформируемые медные сплавы: учебное пособие/ Ю.Н. Логинов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 136 с.
20. Протокол результатов (протокол №5 от 19.01.2017) экспериментальных исследований по испытанию реальных образцов цилиндра контактного из меди М1 на растяжение для определения механических характеристик и относительного удлинения.
21. Пакет прикладных программ ANSYS, лицензия№ 668315.
22. Johnson, G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high rates and high temperature / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proc. of the 7th int.symp. on Balistics. –1983. –Pp. 541-547.
23. Johnson, G.R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures and pressures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Eng. fract.mech. - Vol. 21, № 1. -1985. - Pp. 31-48.
24. ООО «ЦАТИ». Руководство по эксплуатации нормирующего преобразователя НП-03 НП.000.003 РЭ системы измерения давления.



НИИЭФА  
РОСАТОМ

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**