



НИИЭФА
РОСАТОМ

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

Алексеев Д.И.¹, Кривошеев С.И.², Манзук М.В.¹, Паученко А.Н.¹,

Харченко В.В.¹.

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

Ведущий исследователь отдела сильноточной
коммутиционной аппаратуры

Установки управляемого термоядерного синтеза



НИИЭФА
РОСАТОМ

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

Search Device Name
Highlight Device Name



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

Tokamaks



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

Operating 55	Under construction 5	Planned 14	Public 69	Private 5
-------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------

© 2021 Mapbox © OpenStreetMap

Назначение и особенности конструкции быстродействующих защитных коммутационных аппаратов.



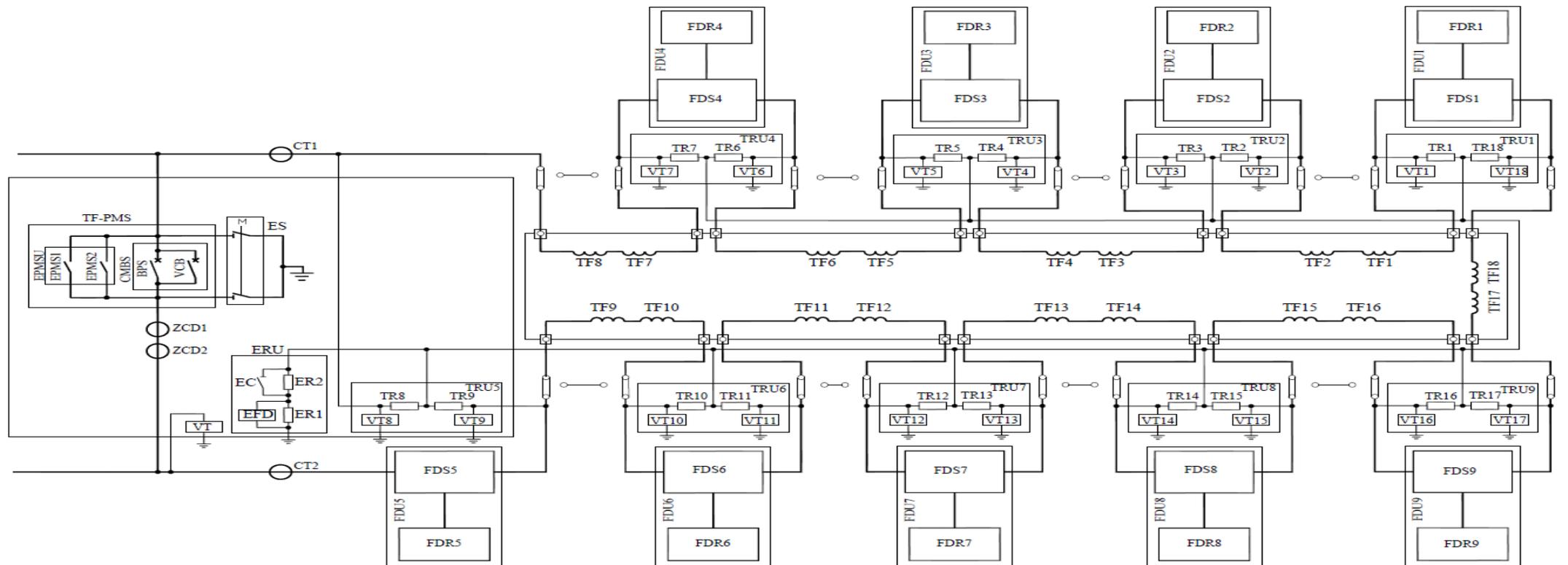
НИИЭФА
РОСАТОМ

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

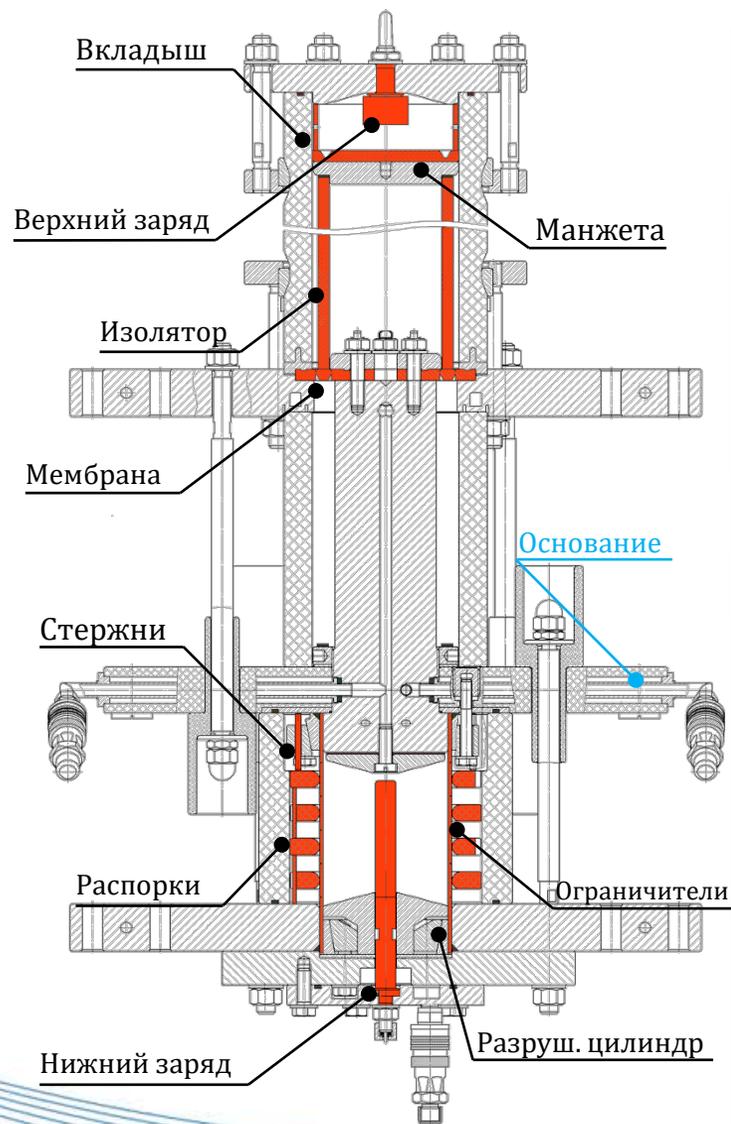


Устройство и работа детонационного размыкателя.

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 ³ /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, %	$\mu_{газ}/\mu_{пв}$	$\gamma = C_p/C_v$	α , дм ³ /кг	ρ , кг/дм ³
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.**

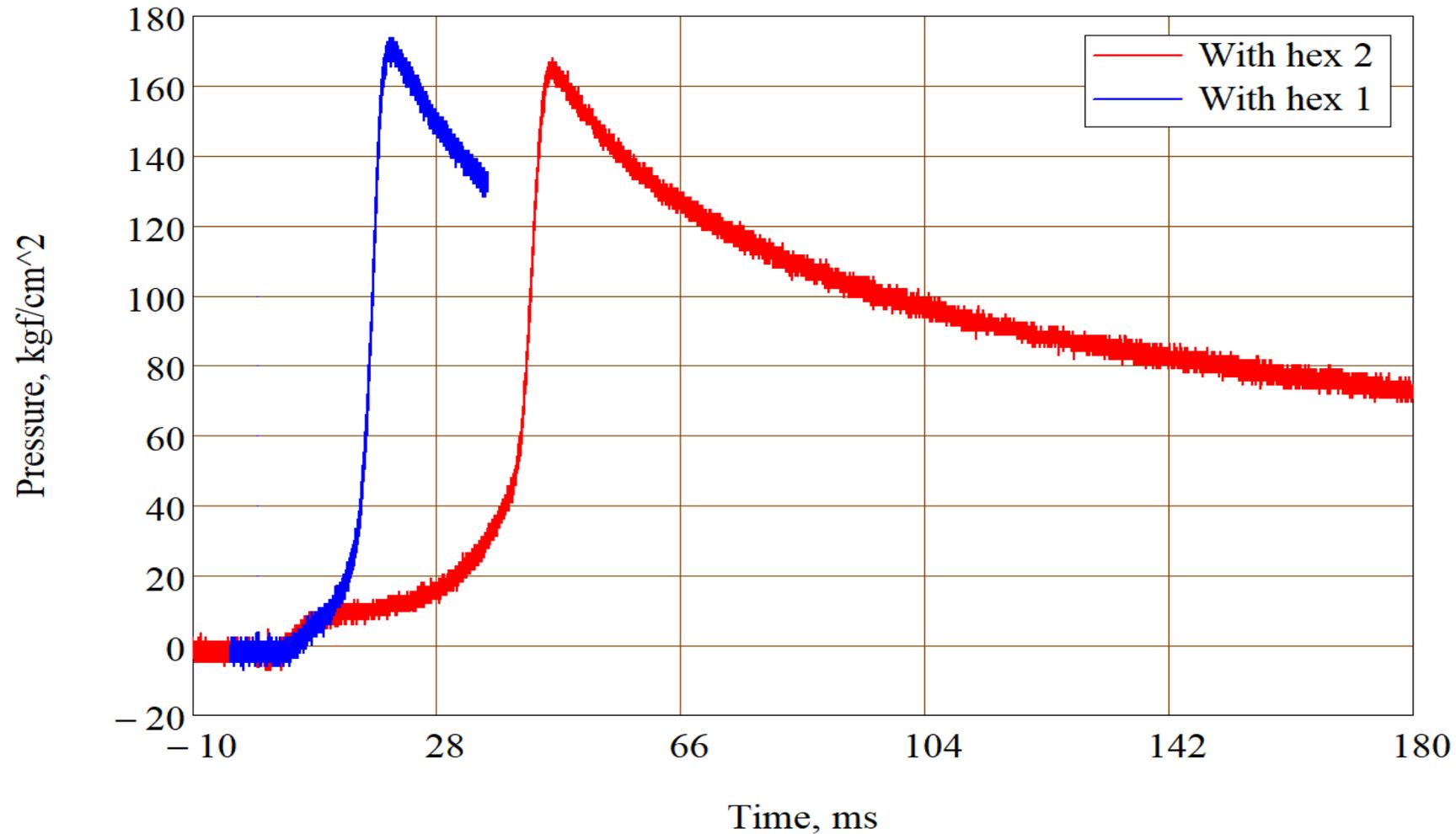
Усилие среза по площади контакта **$F= 257737$ Н.**

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.

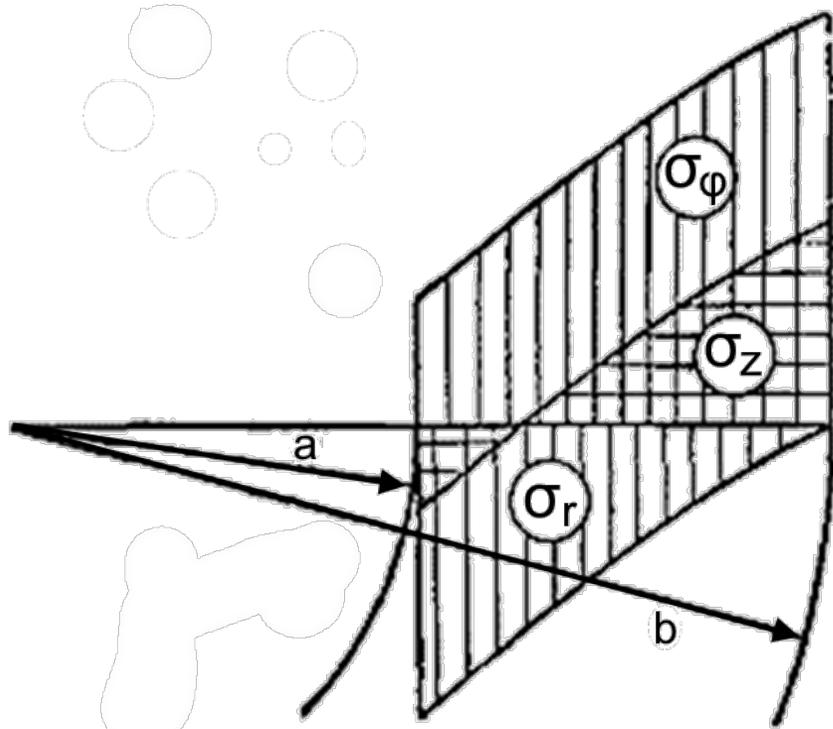




Результаты расчёта срезной мембраны с учётом динамической нагрузки.

- 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:

σ – нормальные (главные) напряжения;

z , r и φ – 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;

σ_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 σ_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
- σ_{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 σ_{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 $1,5 \text{ г/см}^3$ равен $4,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

$T_0 = 283\text{К}$. $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$. Рассчитанное заранее значение ПВ $V_{\text{ок}} = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$.

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

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

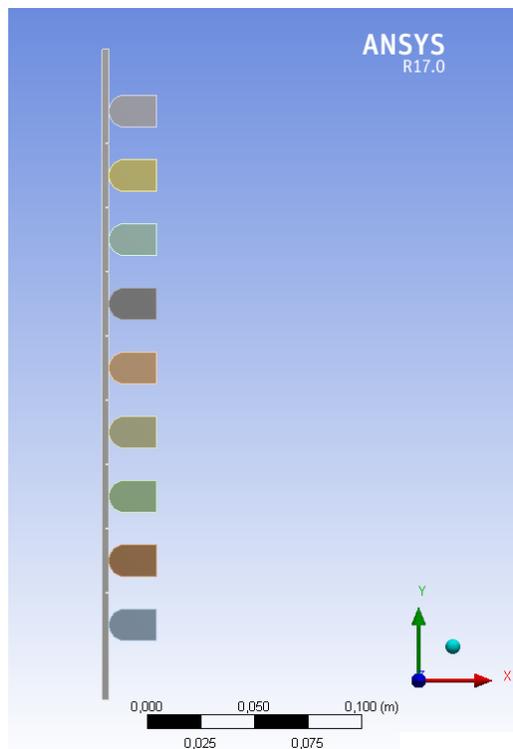
где:

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

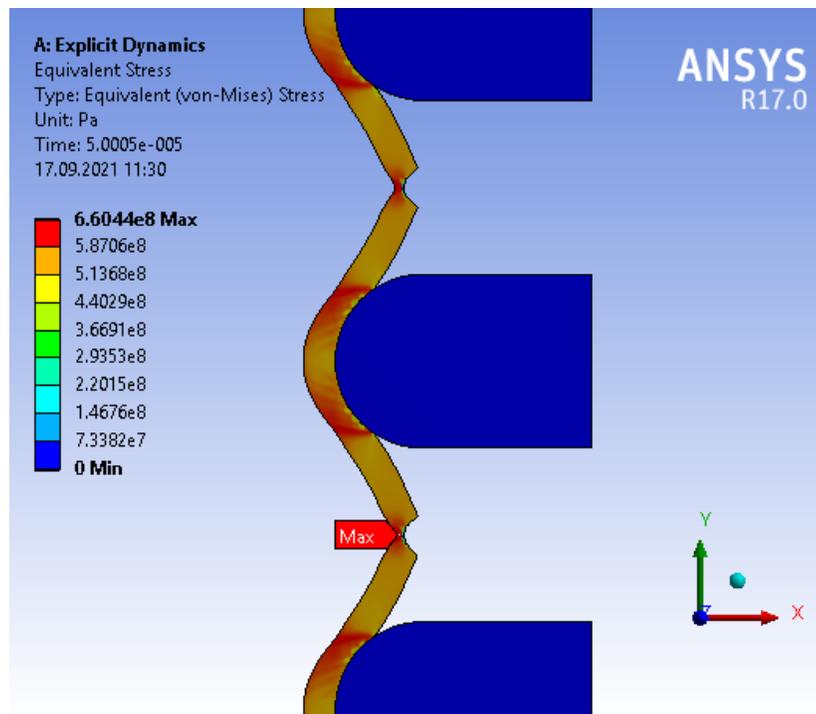
Численное моделирование в ANSYS Autodyn.



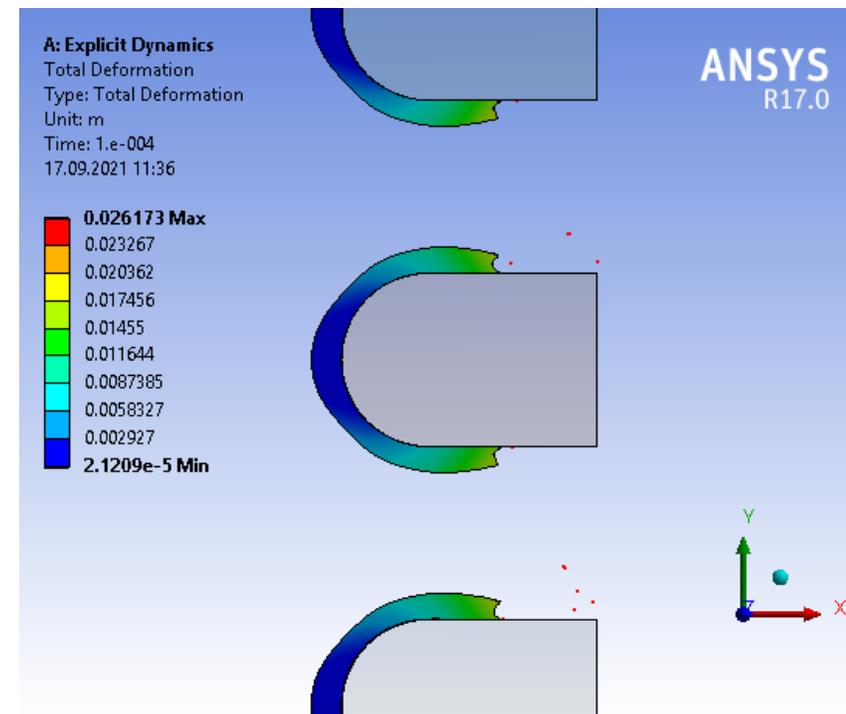
НИИЭФ
РОСАТОМ



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.

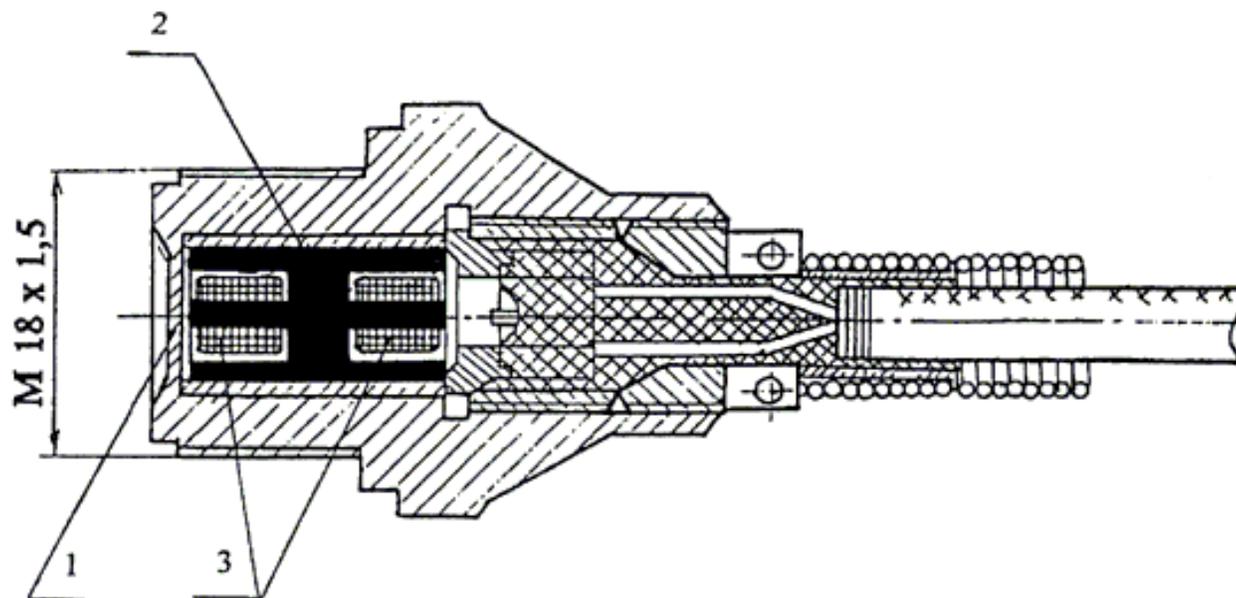
- На Рис. 4. Датчик давления ДДИ-20.

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

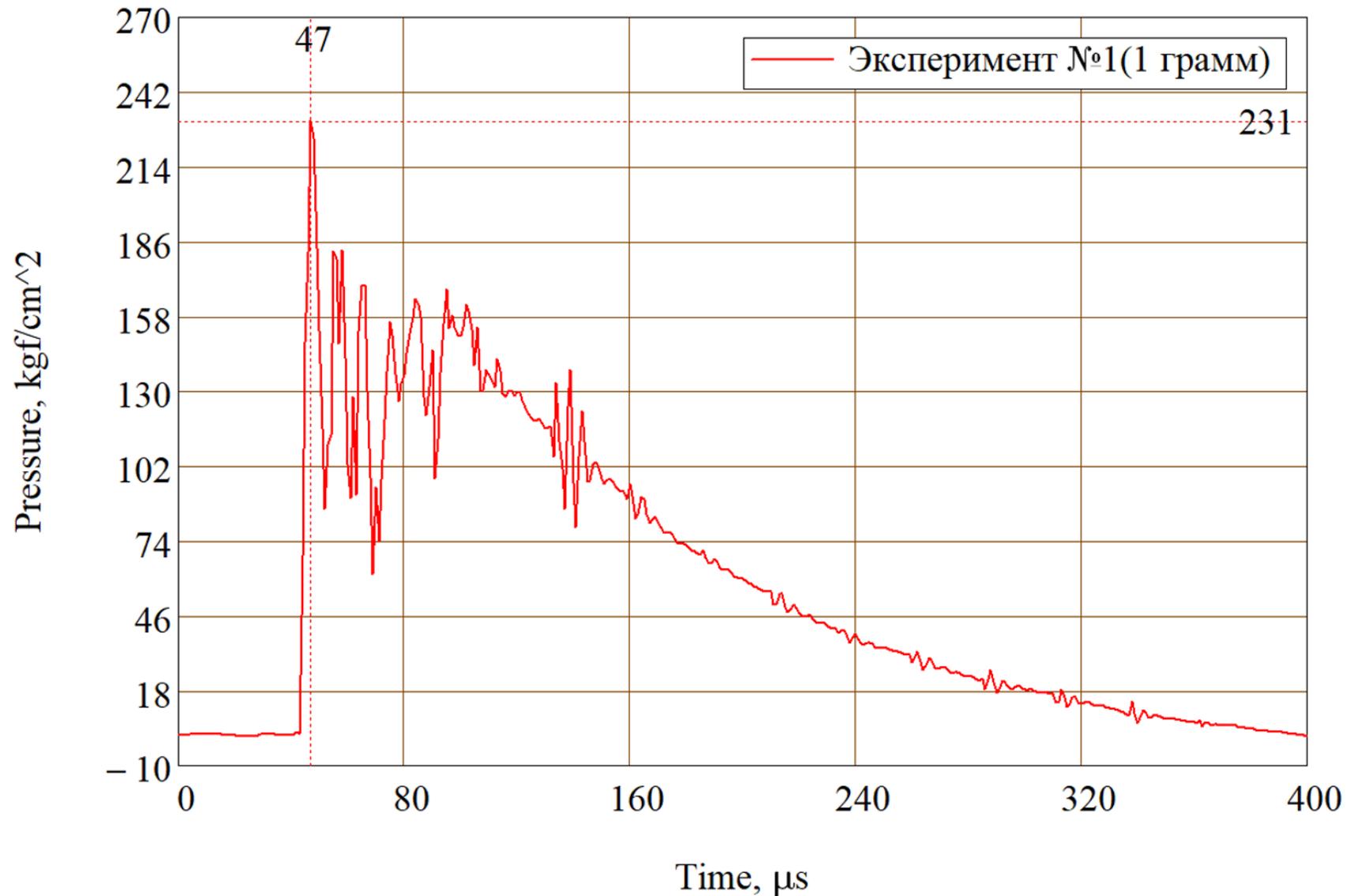
частотой 200 МГц.





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 **$21,2 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$** .
- σ_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