

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ НА ПАКЕРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ КОМПЛЕКСА СЕЛЕКТИВНОЙ ПЕРФОРАЦИИ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

по направлению подготовки 15.04.03 Прикладная механика
Профиль 15.04.03_01 Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг

Выполнил студент гр. 3641503/90101
Янов Д. В.

Научный руководитель: доцент, к.т.н.
Новокшенов А. Д.

Санкт-Петербург
2021

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

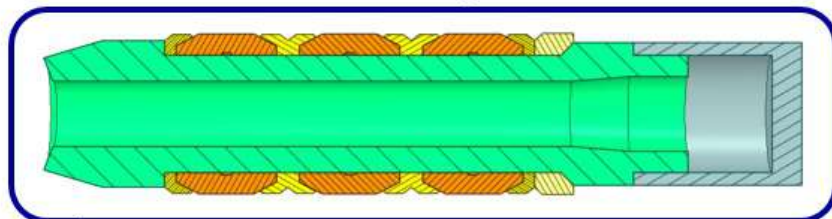
Комплекс селективной перфорации



Актуальность работы обусловлена необходимостью прогнозирования технологических операций, протекающих в процессе подготовки скважины к освоению, которые должны удовлетворять условиям эксплуатации и безопасности

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

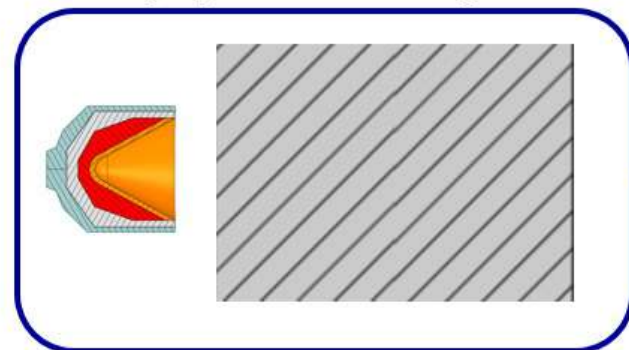
Пакер



Результаты герметизации:

- Напряженно-деформируемое состояние
- Контактное усилие

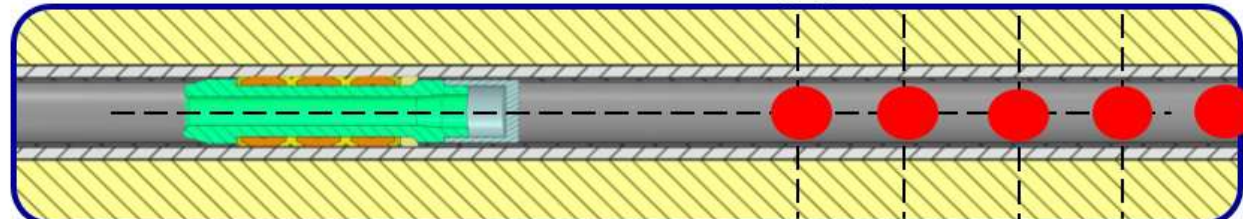
Кумулятивный заряд



Результаты перфорации:

- Остаточная энергия продуктов детонации
- Перерасчет массы ВВ

Комплекс селективной перфорации



Цель:

- Анализ герметичности участка разобщения ствола скважины при воздействии детонационной волны
- Анализ прочности пакерующего элемента при воздействии детонационной волны
- Определение безопасного расстояния между пакерующим элементом и системой зарядов ВВ

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ

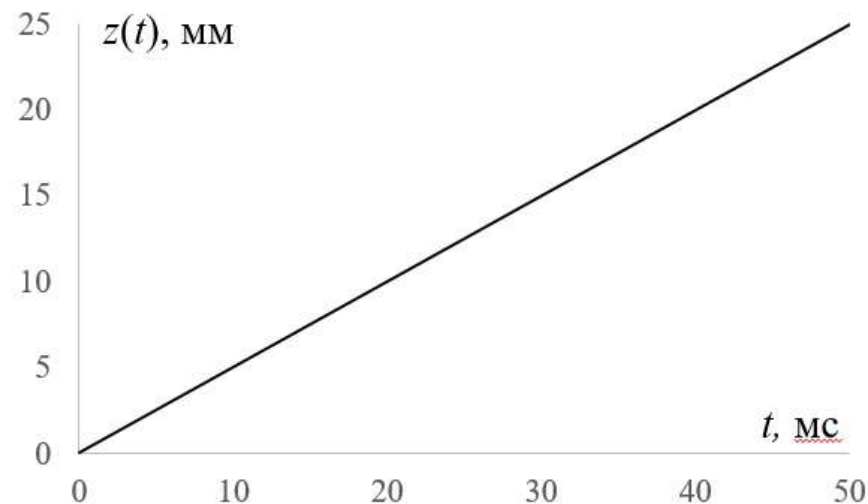
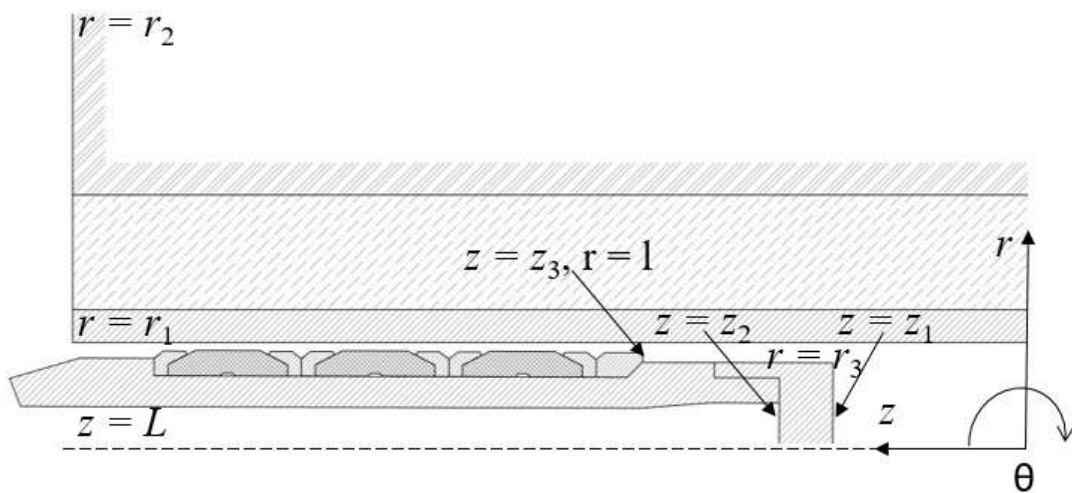


График перемещения штока

Граничные условия

$$z = 0; r_1 < r < r_2; 0 < \theta < 360^\circ$$

$$U_z = 0; U_r = 0; U_\theta = 0$$

$$z_1 < z < z_2; 0 < r < r_3; 0 < \theta < 360^\circ$$

$$U_z = z(t); U_r = 0; U_\theta = 0$$

$$0 < z < L; r = 0$$

$$U_r = 0; \tau_{r\theta} = 0$$

$$z = L; r_1 < r < r_2; 0 < \theta < 360^\circ$$

$$U_z = 0; U_r = 0; U_\theta = 0$$

$$z = z_3; r = l; 0 < \theta < 360^\circ$$

$$U_z = z(t); U_r = 0; U_\theta = 0$$

Начальные условия

$$\sigma_{ij}(0, z, r, \theta) = 0, P(0, z, r, \theta) = 0,$$

$$\rho(0, z, r, \theta) = \rho_0, E(0, z, r, \theta) = 0,$$

$$v_x(0, z, r, \theta) = 0, v_z(0, z, r, \theta) = 0$$

$$v_y(0, z, r, \theta) = 0,$$

МОДЕЛЬ МАТЕРИАЛА ЭЛАСТОМЕРА

Упругий потенциал **Муни-Ривлина**^{1,2}

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}$$

Условие несжимаемости:

$$J = V/V_0 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$$

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3)$$

Второй тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа:

$$\underline{\underline{S}} = 2 \frac{\partial W}{\partial \underline{\underline{C}}} = 2 \left[\left((C_{10} + C_{11} I_2 - 3C_{11}) \frac{\partial I_1}{\partial \underline{\underline{C}}} + (C_{01} + C_{11} I_1 - 3C_{11}) \frac{\partial I_2}{\partial \underline{\underline{C}}} \right) \right]$$

Напряжения в актуальной конфигурации:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \frac{1}{J} \underline{\underline{F}} \underline{\underline{S}} \underline{\underline{F}}^T$$

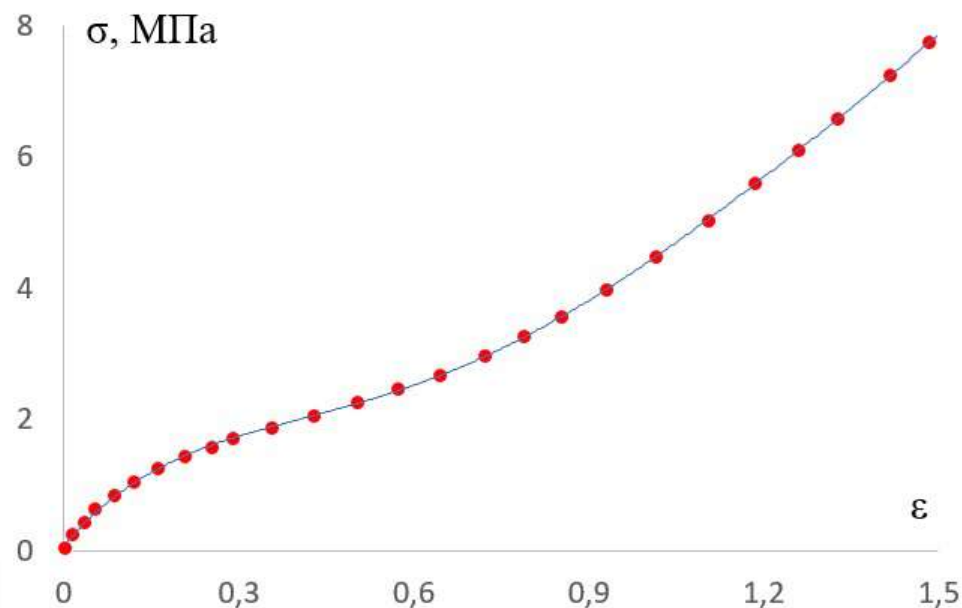


Диаграмма растяжения эластомера

- Экспериментальные данные $\sigma(\varepsilon)$
 - Аппроксимирующая кривая
- $C_{10} = -2.26$ МПа, $C_{01} = 4.22$ МПа $C_{11} = 0.61$ МПа

¹Лурье, А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.

²Пальмов В. А. Определяющие уравнения термоупругих, термовязких и термопластических материалов: учеб. пособие / В. А. Пальмов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 138 с.

МОДЕЛЬ УПРУГО-ПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ СЖИМАМОСТИ

Модель Джонсона-Кука³

$$\sigma_y = \left(A + B \bar{\varepsilon}^p \right) (1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m})$$

$$\bar{\varepsilon}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt; \quad \dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}; \quad \dot{\varepsilon}_0 = 0.001 c^{-1}$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}; \quad T - T_r = \frac{E}{C_p \rho V_0}$$

Критерий текучести по Мизесу

$$f(\underline{\underline{\sigma}}) - Y(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\varepsilon}^p) = 0; \quad Y(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\varepsilon}^p) = \sigma_y$$

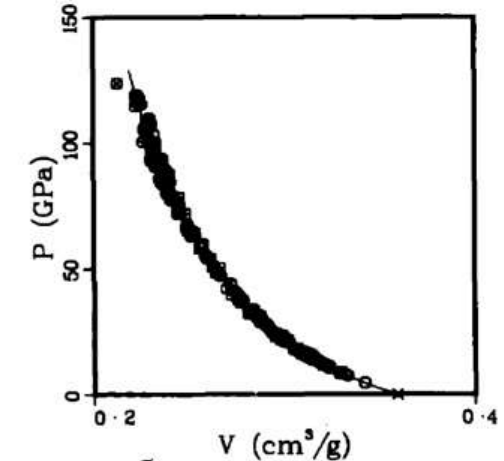
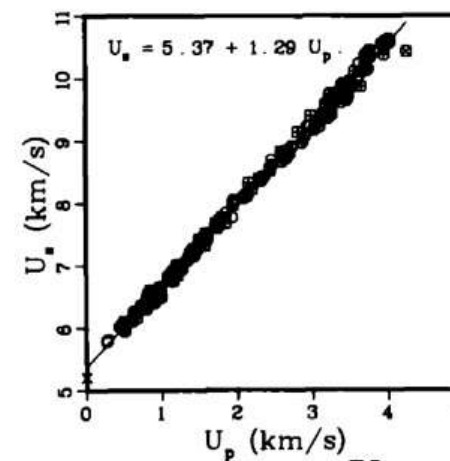
$$f(\underline{\underline{\sigma}}) = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{S}} \cdot \underline{\underline{S}}}$$

Закон пластического течения

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f(\underline{\underline{\sigma}})}{\partial \underline{\underline{\sigma}}}$$

Уравнение состояния Ми-Грюнайзена

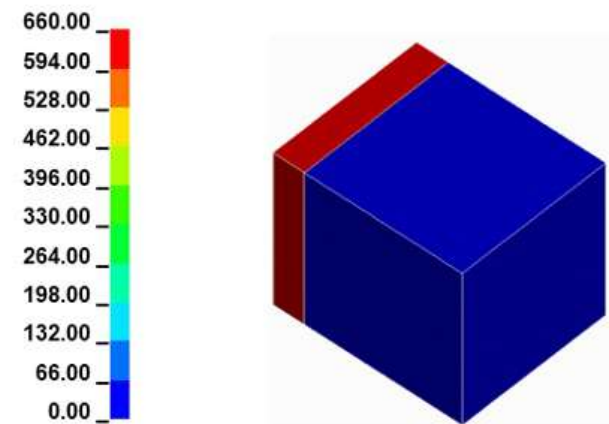
$$P = \frac{\rho_0 C^2 V \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) V - \frac{a}{2} V^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)V - S_2 \frac{V^2}{V+1} - S_3 \frac{V^3}{(V+1)^2} \right]} + (\gamma_0 + aV)E$$



Ударная адиабата

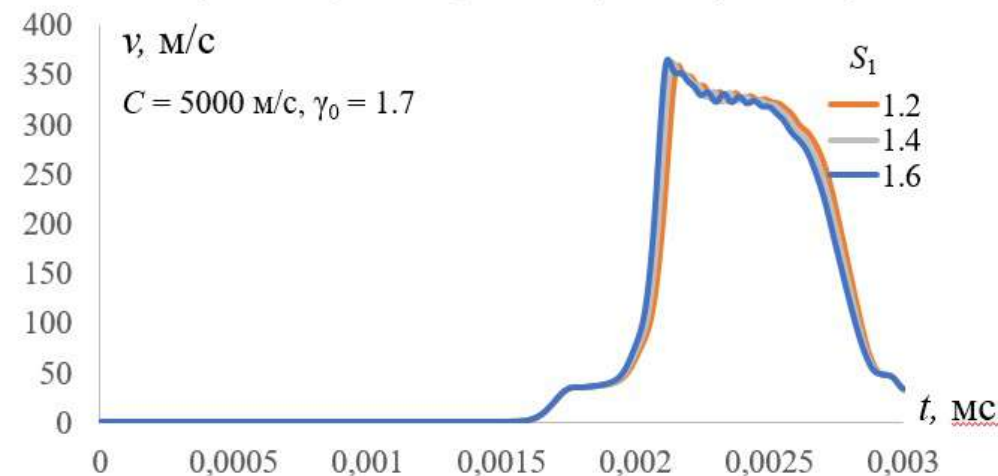
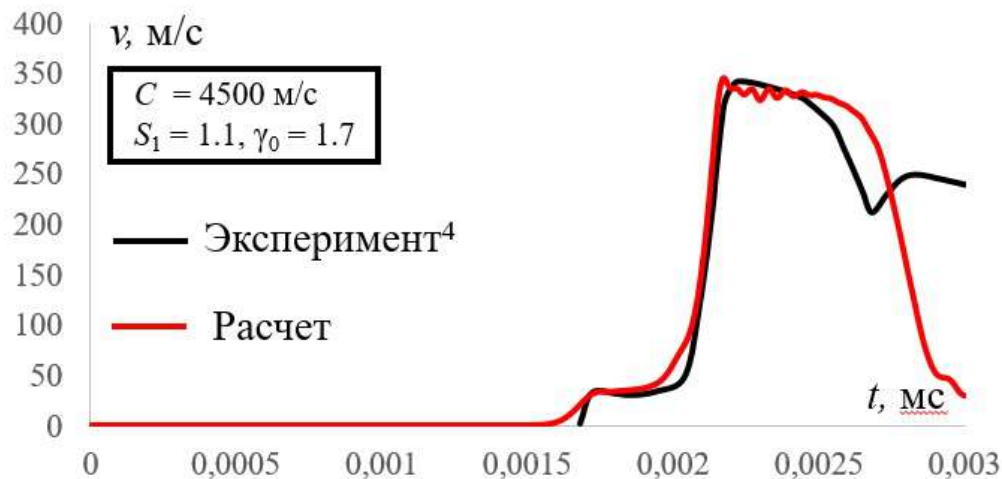
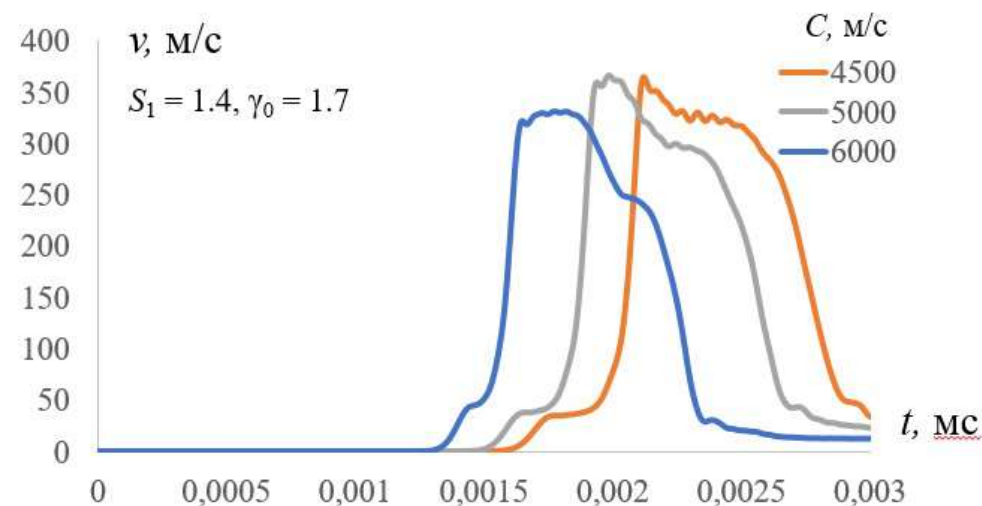
³Johnson, G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. 1983. P. 541 – 547.

ВАЛИДАЦИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ



Мишень - сталь Ст.3
 Ударник - алюминий
 $v_0 = 660$ м/с

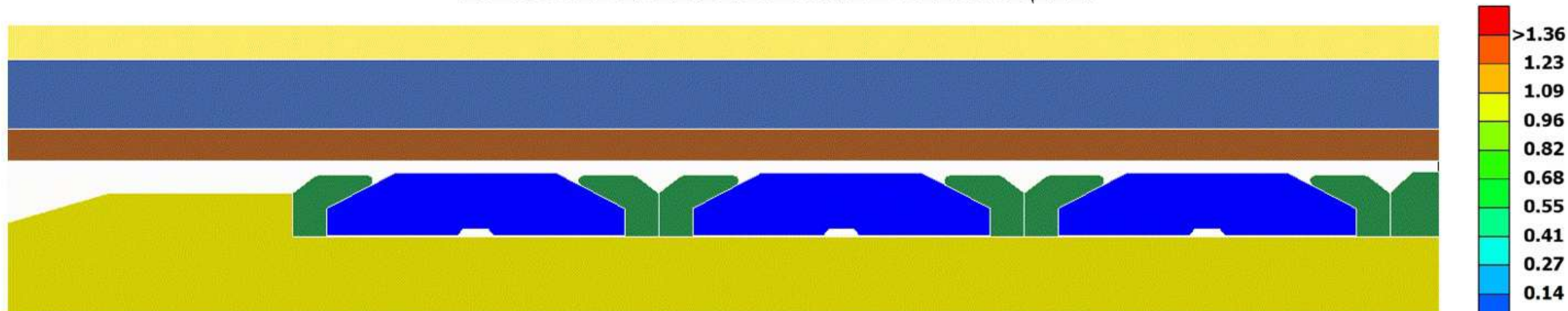
Поля продольной скорости, м/с



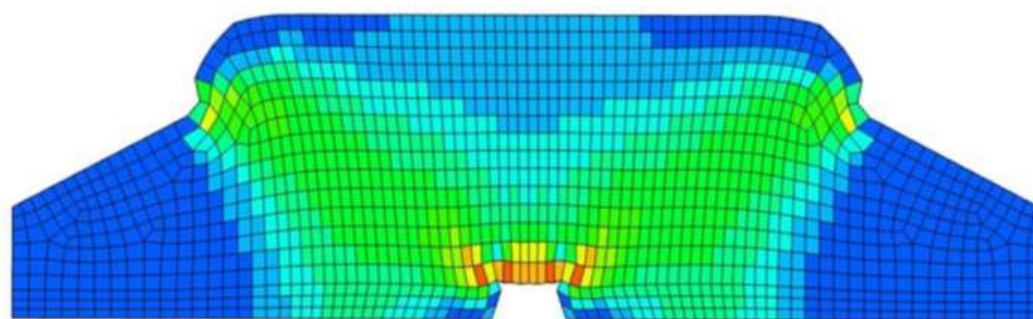
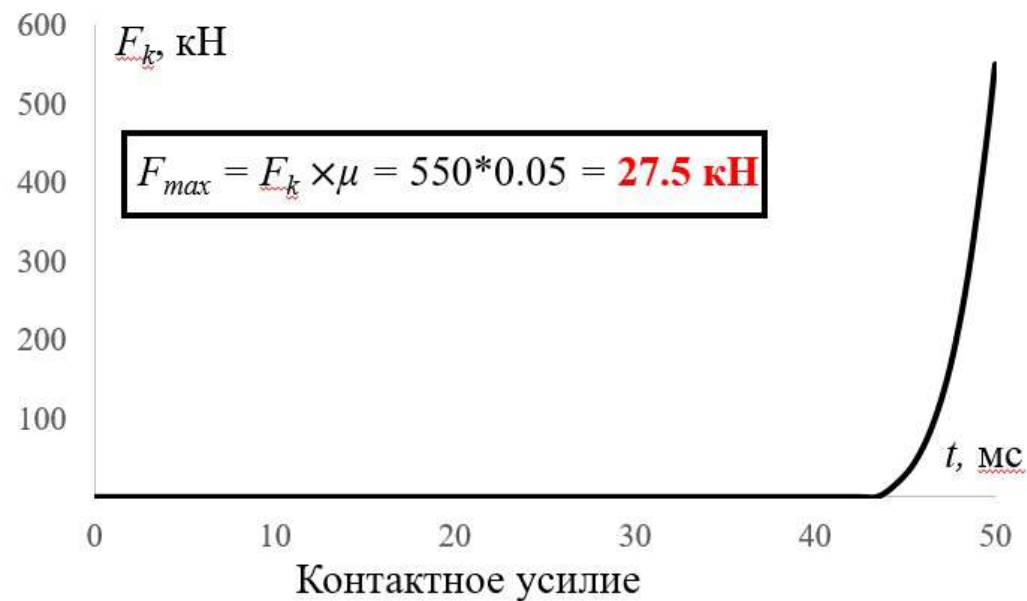
Скорость свободной поверхности

⁴Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г.И. Канель [и др.]. – М.: «Янус-К», 1996. – 407 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ

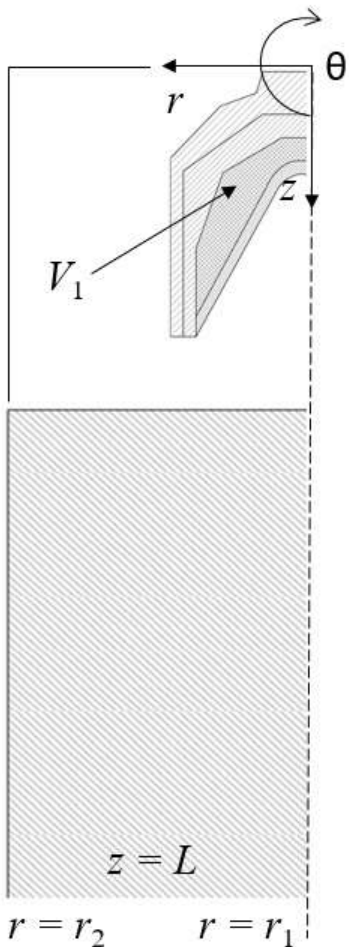


Поля эквивалентных деформаций



Поля эквивалентных деформаций, мм/мм, $t = 50 \text{ мс}$

АНАЛИЗ ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА



Начальные условия

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(0, z, r, \theta) &= 0, \quad P(0, z, r, \theta) = 0, \\ \rho(0, z, r, \theta) &= \rho_0, \quad E(0, z, r, \theta) = 0, \\ v_x(0, z, r, \theta) &= 0, \quad E(0, z, r, \theta) = E_0 \in V_1 \\ v_z(0, z, r, \theta) &= 0, v_y(0, z, r, \theta) = 0, \end{aligned}$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} z = L; r_1 < r < r_2; 0 < \theta < 360^\circ \\ U_z &= 0; U_r = 0; U_\theta = 0 \\ 0 < z < L; r = 0 \\ U_r &= 0; \tau_{r\theta} = 0 \end{aligned}$$

Уравнение состояния Jones-Wilkins-Lee (JWL)⁵

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

Степень превращения

$$F = \max(F_1, F_2)$$

Давление в ячейке

$$P = F P(V, E)$$

$$F_1 = \begin{cases} \frac{2(t-t_l)DA_e}{3v_e} & \text{if } t > t_l \\ 0 & \text{if } t < t_l \end{cases}$$

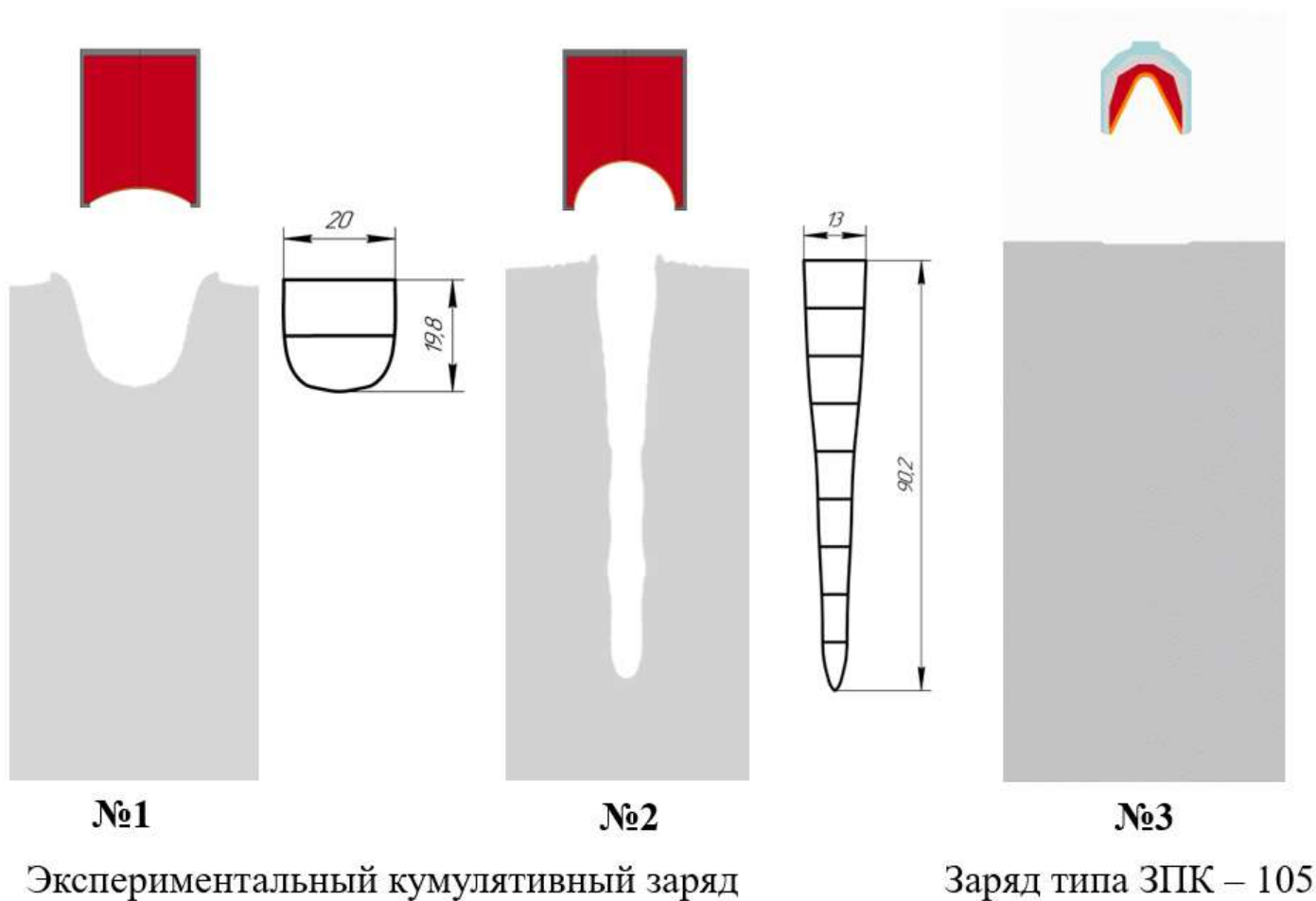
Время детонации
 $t_l = L/D$

$$F_2 = \frac{1-V}{1-V_{CJ}}$$

A (ГПа)	B (ГПа)	R ₁	R ₂	ω	E ₀ (ГПа мм ³)
880	18.36	4.62	1.32	0.38	10
D (м/с)	P _{CJ} (ГПа)	ρ (кг/м ³)	Параметры модели ⁵ для LX10-1		
8820	37.5	1865			

⁵Wilkins, M. L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena / M. L. Wilkins. Springer, 1999. – 264 p.

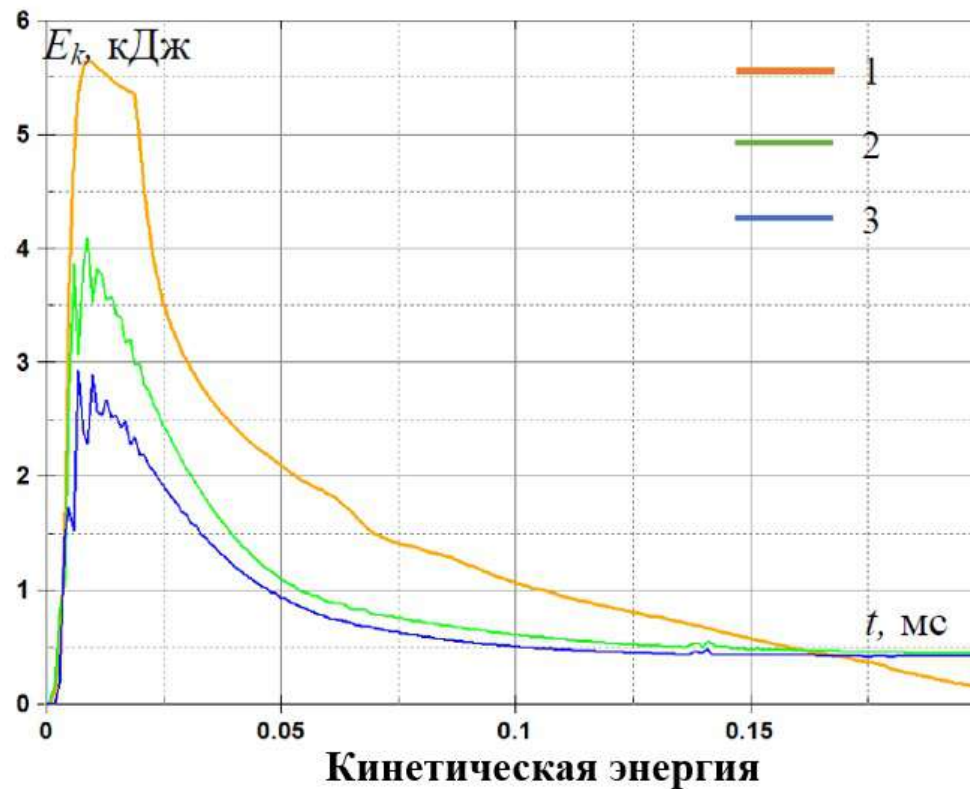
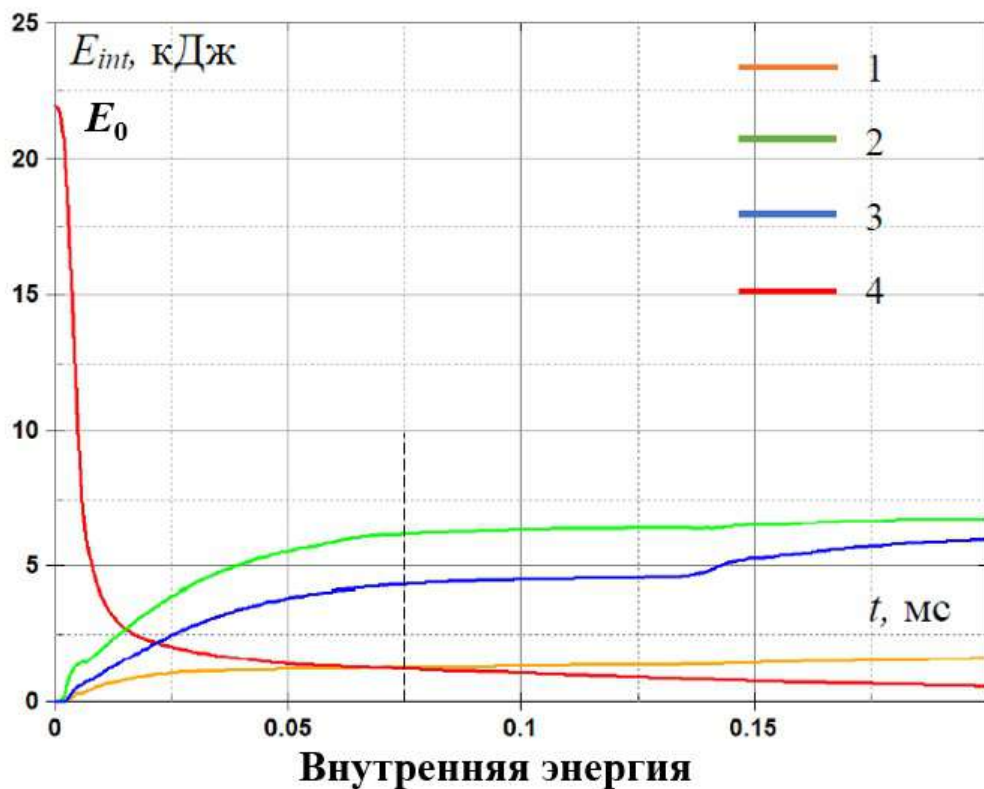
ВАЛИДАЦИЯ СИСТЕМЫ КУМУЛЯТИВНЫЙ ЗАРЯД – МИШЕНЬ



Результаты численного моделирования и экспериментов

№ 1	$H, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$
Численный расчет	17	21.2
Эксперимент	19.8	20
$\delta, \%$	14	5.6
№ 2	$H, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$
Численный расчет	80.3	11.2
Эксперимент	90.2	13
$\delta, \%$	11	13
№ 3	$H, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$
Численный расчет	145	12.3
Эксперимент	150	11.5
$\delta, \%$	3.3	6.5

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

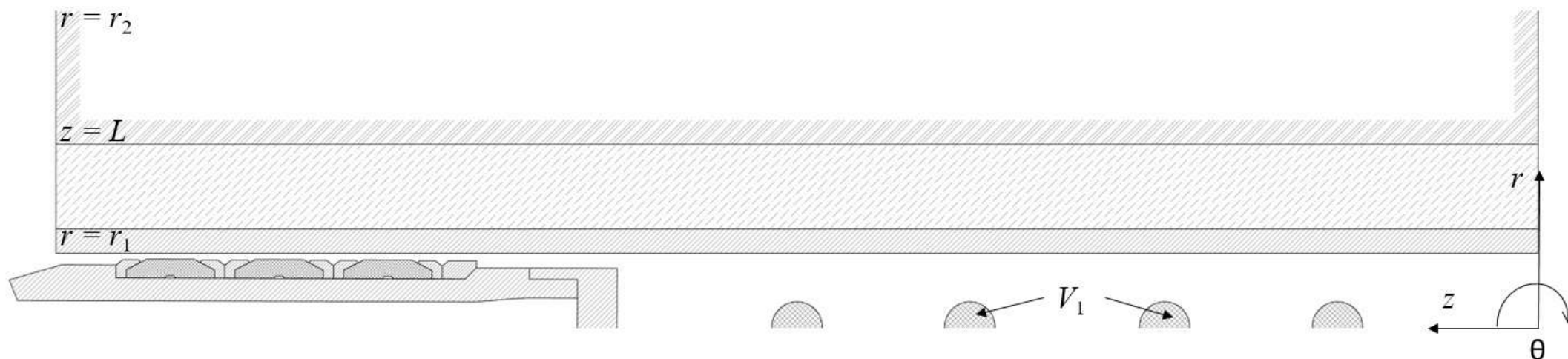


1 – облицовка, 2 – оболочка внутренняя, 3 – оболочка внешняя, 4 – взрывчатое вещество

$$E_0 - E_1 = E_k + E_{int} + E_f$$

Остаточная энергия ВВ = **1.25 кДж**, что составляет **5.68 %** (1.25 гр. ВВ)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ НА ПАКЕР



Граничные условия

$$z = 0; r_1 < r < r_2; 0 < \theta < 360^\circ$$

$$U_z = 0; U_r = 0; U_\theta = 0$$

$$z = L; r_1 < r < r_2; 0 < \theta < 360^\circ$$

$$U_z = 0; U_r = 0; U_\theta = 0$$

$$0 < z < L; r = 0$$

$$U_r = 0; \tau_{r\theta} = 0$$

Начальные условия

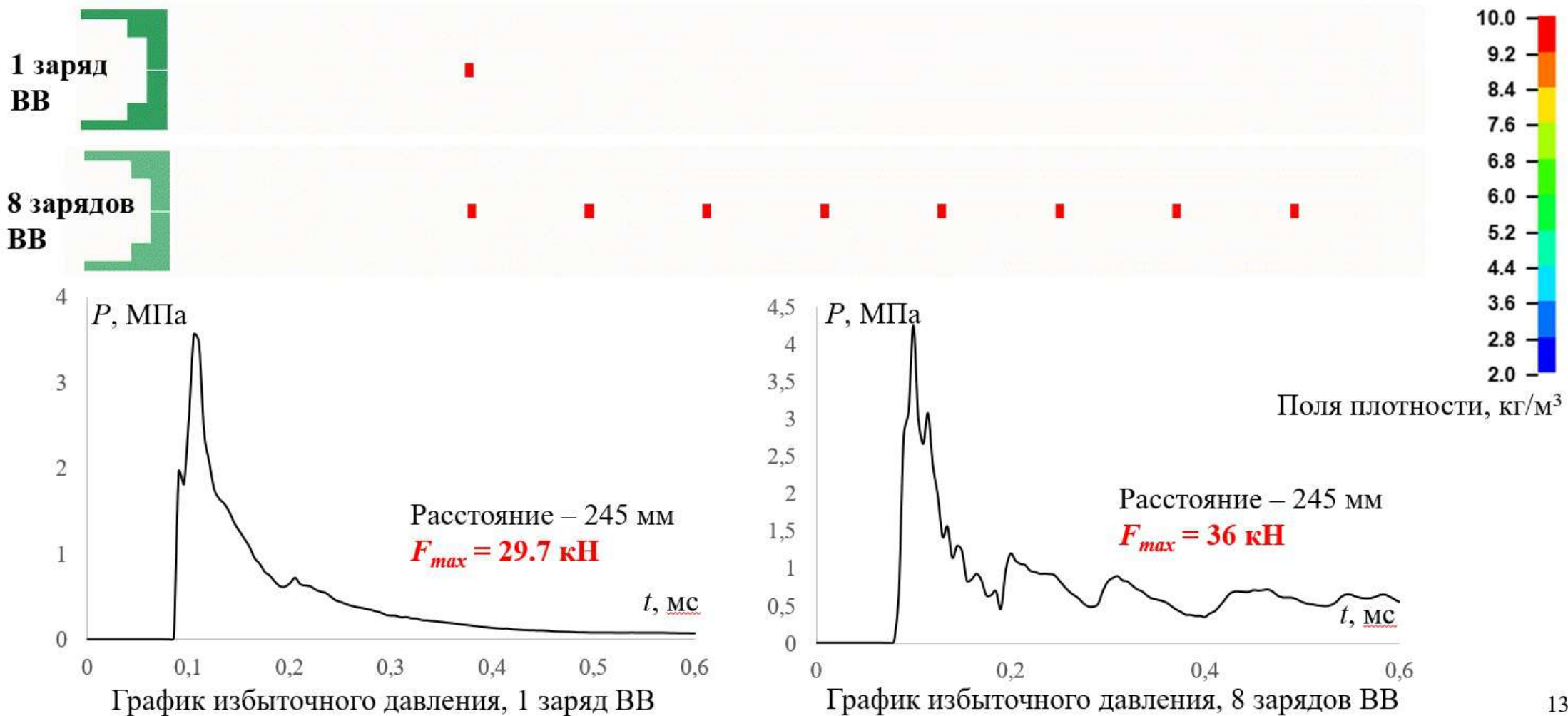
$$\sigma_{ij}(0, z, r, \theta) = \sigma_0, P(0, z, r, \theta) = P_0,$$

$$\rho(0, z, r, \theta) = \rho_0, E(0, z, r, \theta) = E_0,$$

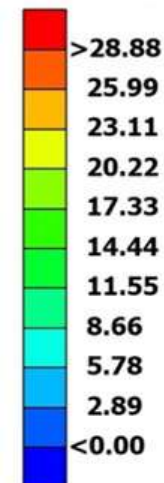
$$v_x(0, z, r, \theta) = 0, E(0, z, r, \theta) = E_1 \in V_1$$

$$v_y(0, z, r, \theta) = 0, v_z(0, z, r, \theta) = 0$$

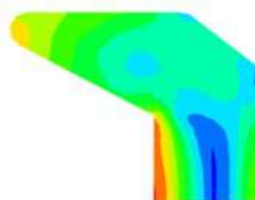
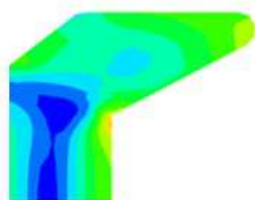
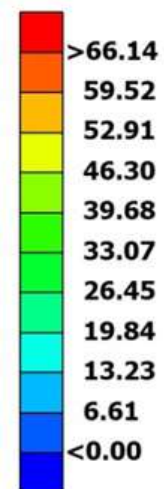
ОЦЕНКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ



НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПАКЕРА



Поля эквивалентных напряжений, МПа



Поля эквивалентных напряжений, МПа

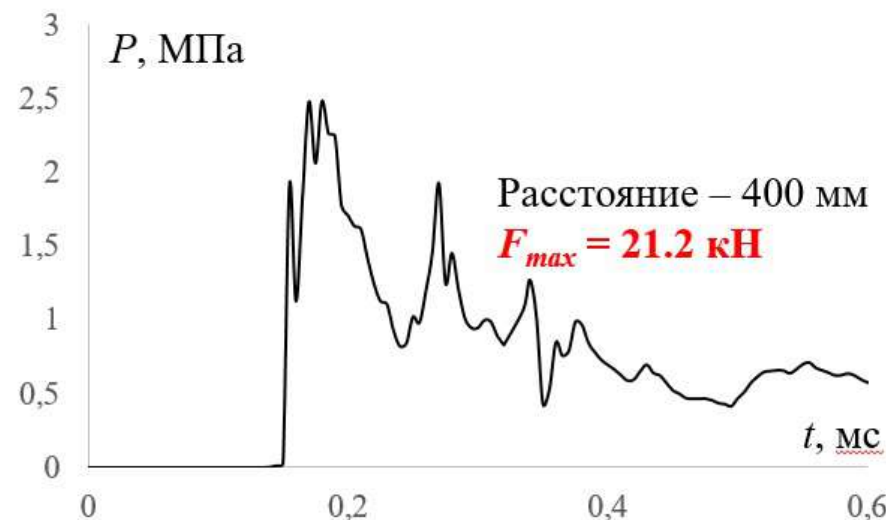


График избыточного давления, 8 зарядов ВВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Проведен анализ научной литературы, по результатам которого определены основные проблемы и актуальные направления исследования;
- Выполнена валидация ударно-волновых процессов для материала сталь Ст.3, по результатам которой определены параметры упруго-пластичной модели материала с учетом уравнения состояния;
- Проведен анализ напряженно-деформируемого состояния пакера и контактного усилия между эластомером и обсадной колонной в процессе герметизации скважины. Определено максимально допустимое осевое усилие для представленной конструкции пакера;
- Выполнена валидация процесса детонации, формирования кумулятивной струи и пробития мишени для нескольких типов кумулятивных зарядов. Определена остаточная энергия продуктов детонации кумулятивного заряда типа ЗПК-105;
- Проведен анализ воздействия детонационной волны на пакерующий элемент в случае инициации одного и нескольких зарядов взрывчатого вещества, имитирующих кумулятивные заряды. Определено расстояние между пакером и зарядом, на котором величина усилия при некотором избыточном давлении превышает максимально допустимое осевое усилие. Построены графики избыточного давления для различных положений зарядов внутри скважины;