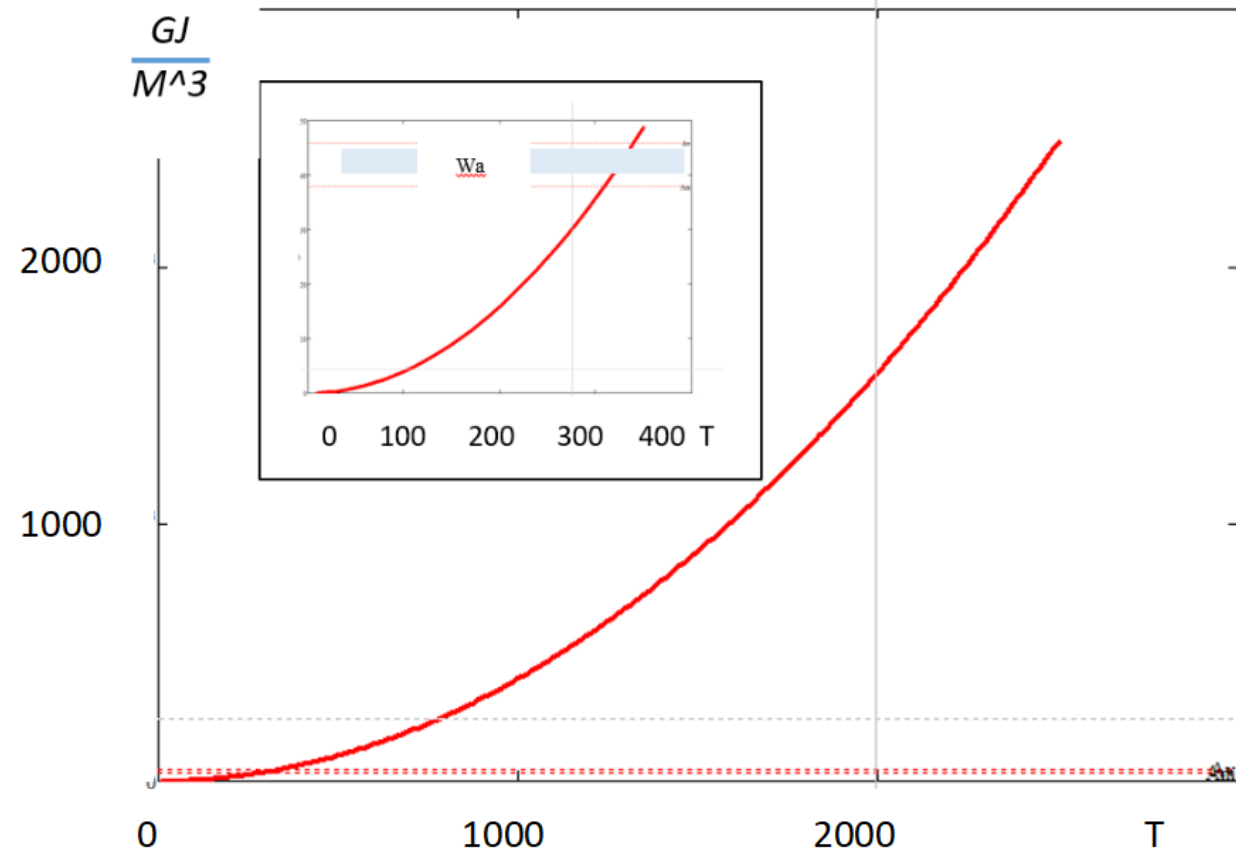
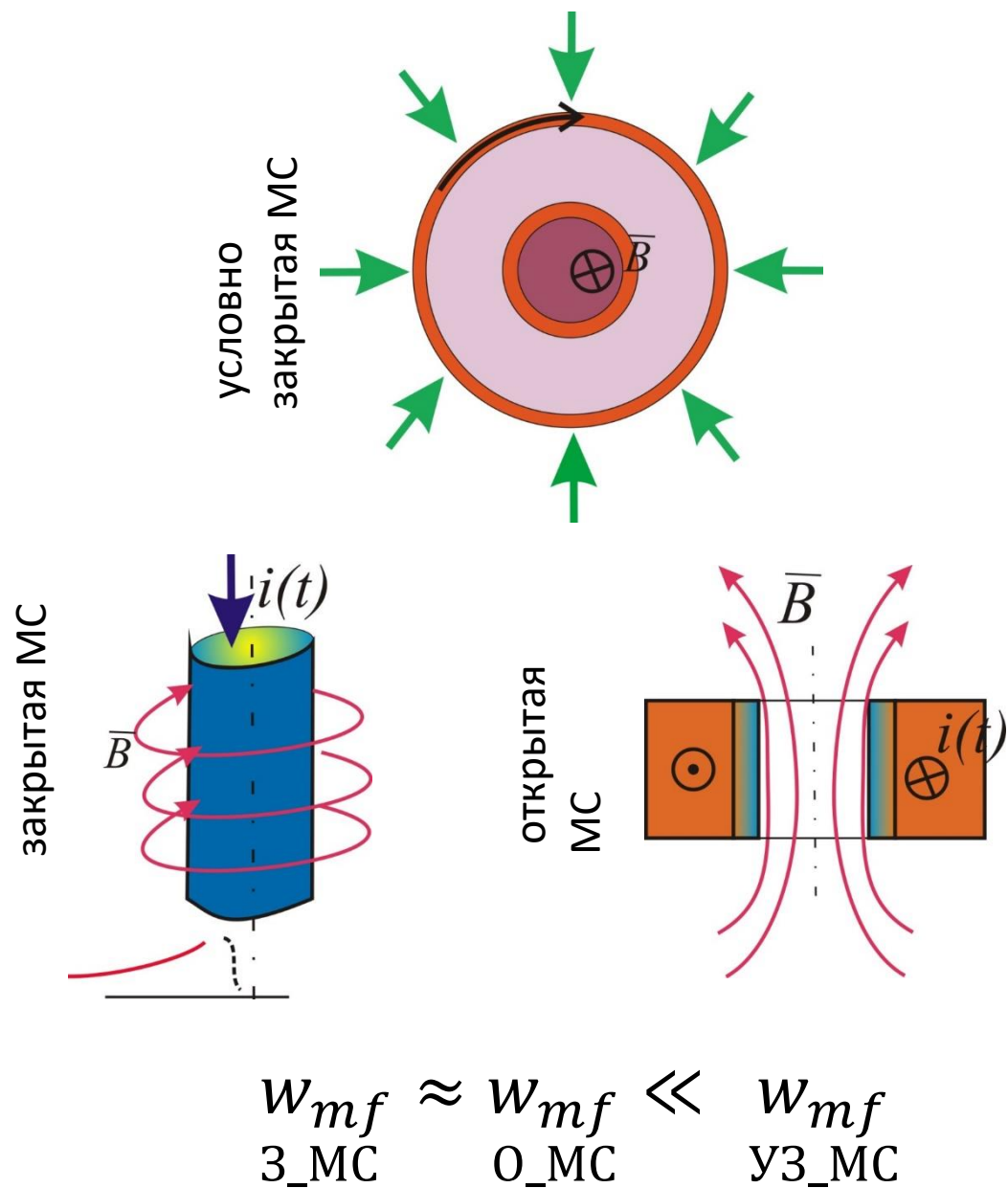


**К оценке прочности твердых диэлектриков при
комбинированном электрическом и механическом
импульсном воздействии**

**On the Evaluation of Solid Dielectric Strength Under
Combined Electrical and Mechanical Pulse Action**

Кривошеев С.И., Адамьян Ю.Э., Магазинов С.Г., Кузнецов И.Б.

Pulse magnetic systems



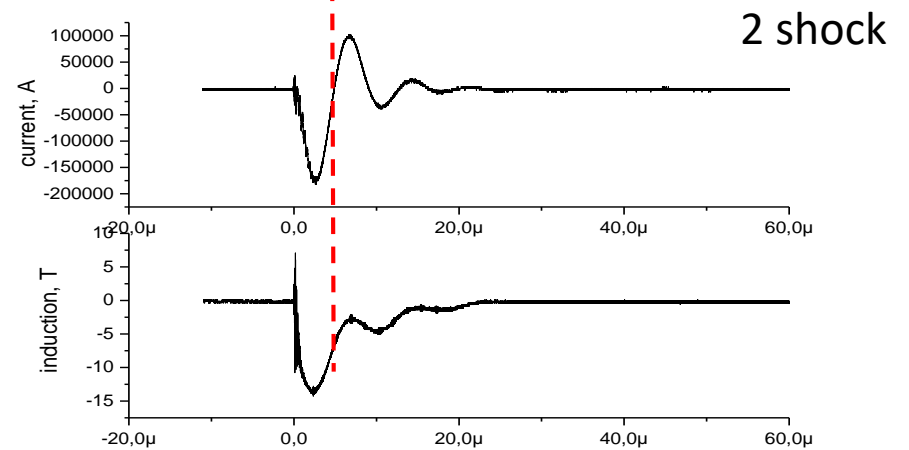
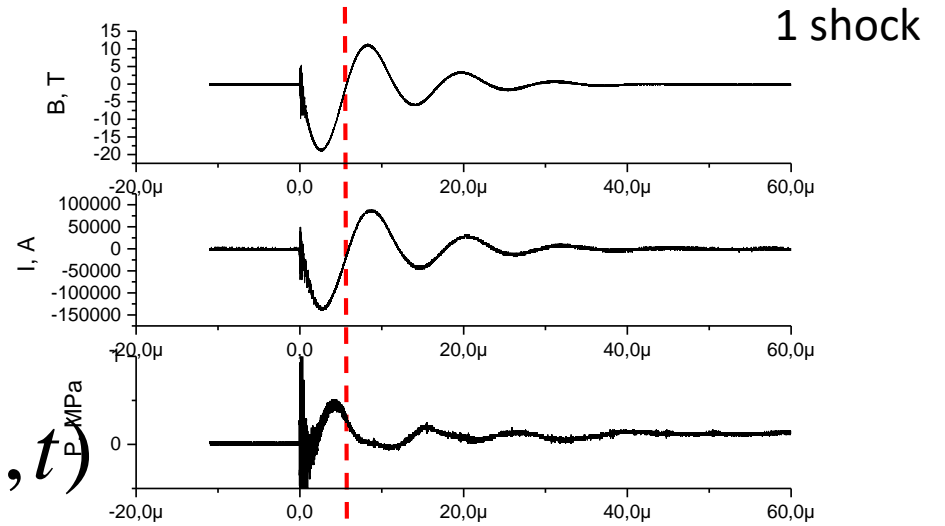
OMS: quasi-force-free winding



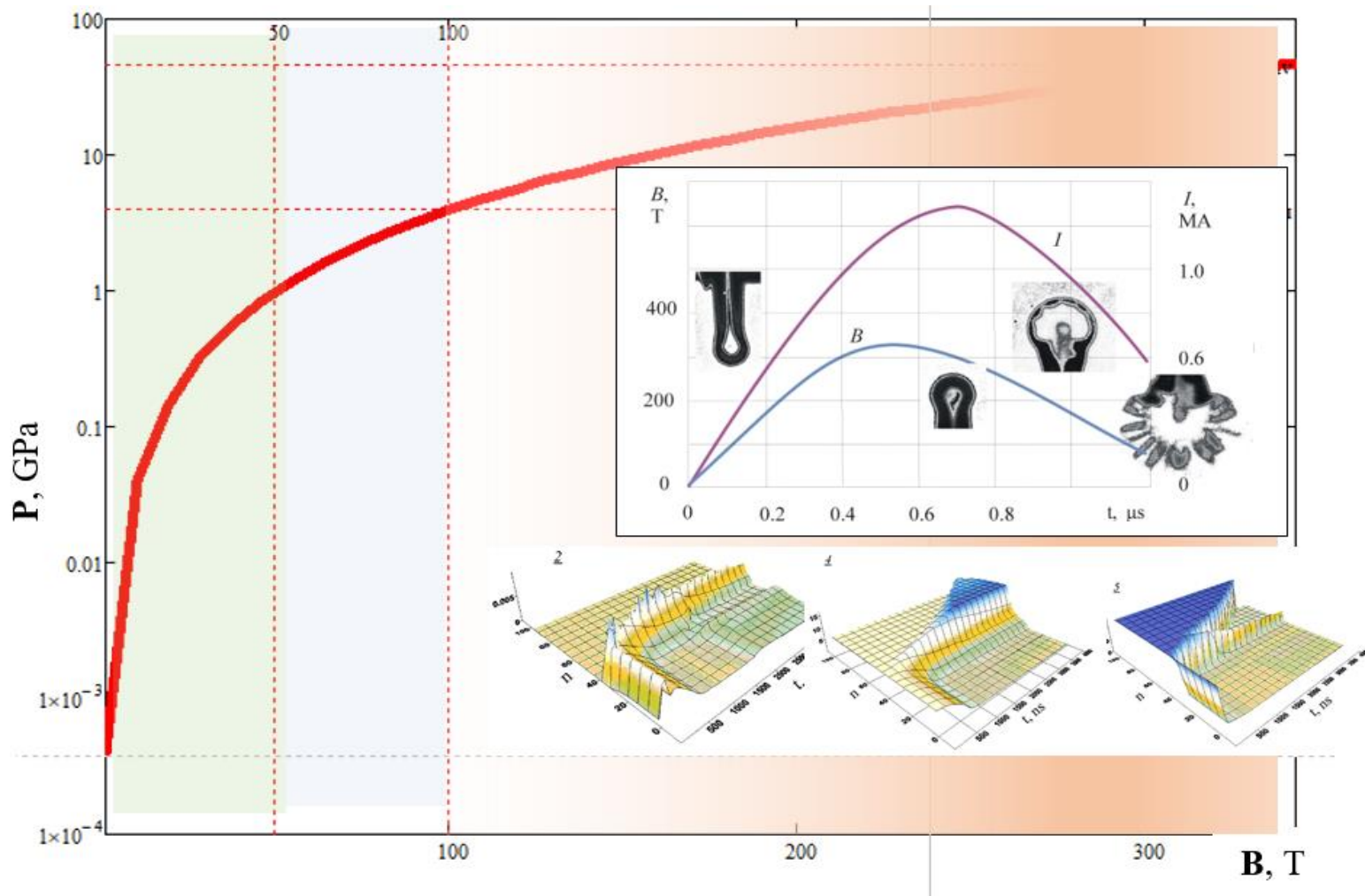
$$\sigma \sim B^2$$

$$U \sim \frac{dB}{dt}$$

$$T(^{\circ}C) \sim (B^2, t_P)$$



Действие ССИМП на проводник



$di/dt \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ A/s}$
 $I_m \sim 2 \text{ MA}$
 50 TW
 $w_a \approx 5-6 \text{ kJ/g}$

$P_m \sim 50 \text{ GPa}$

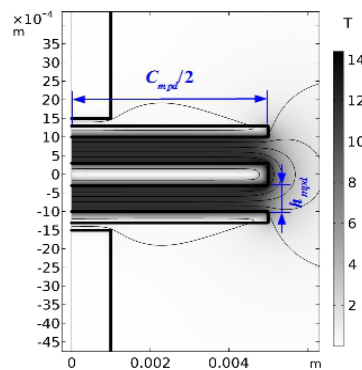
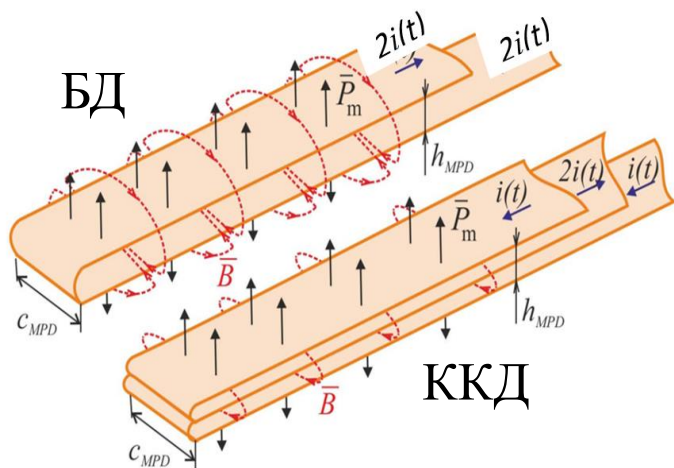
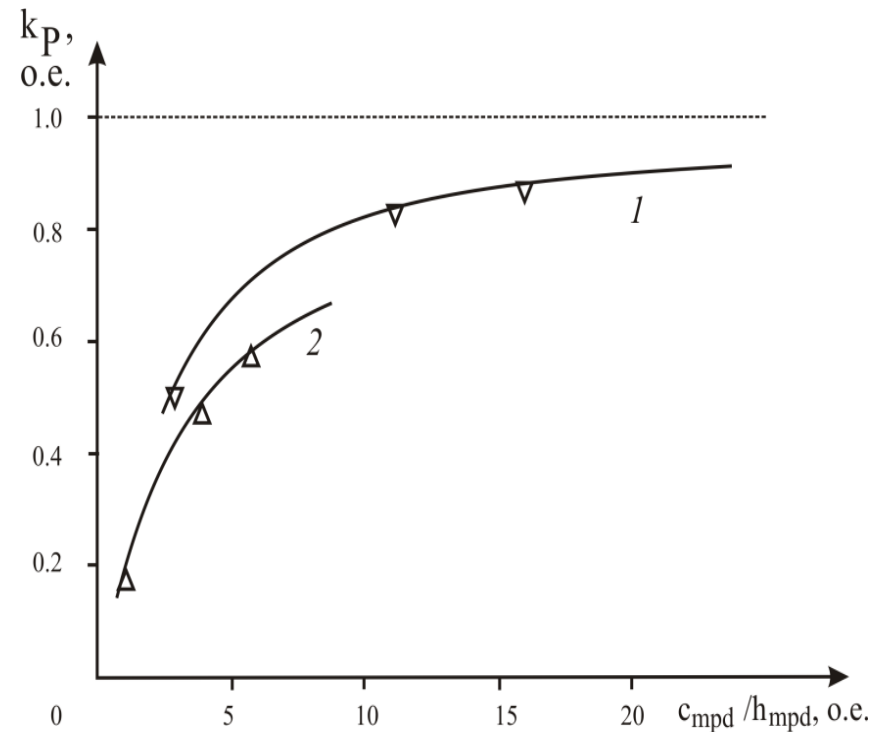
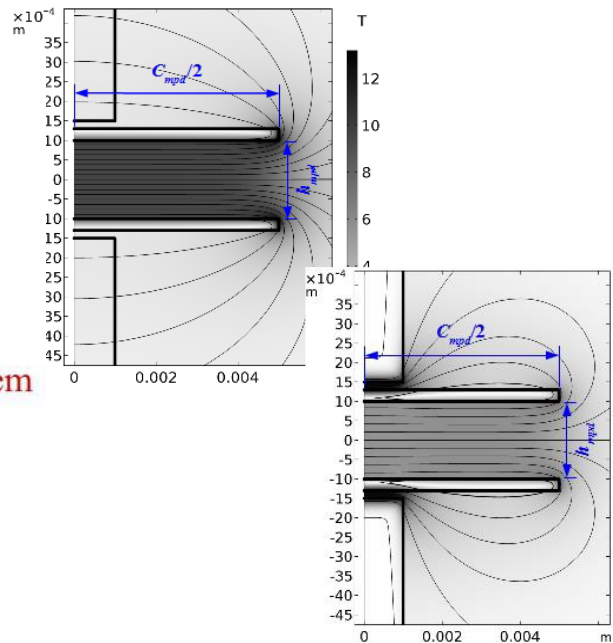
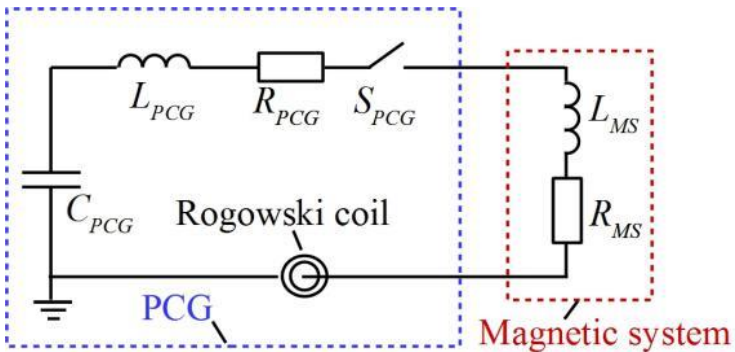
$\frac{dP}{dt} \sim 100 \text{ PPa/s}$

• 360 T - Мировой рекорд по генерации

• магнитных полей методом прямого разряда!



Магнитное давление в плоских шинах



$$P_m = k_p * \left(\frac{I}{c_{mpd}} \right)^2 * \frac{\mu_0}{2}$$

Хрупкое разрушение

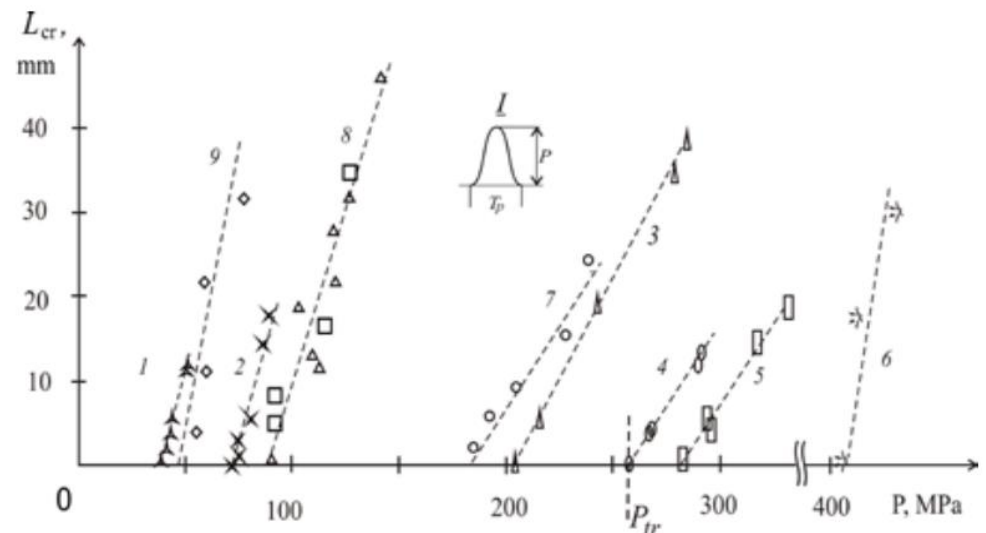
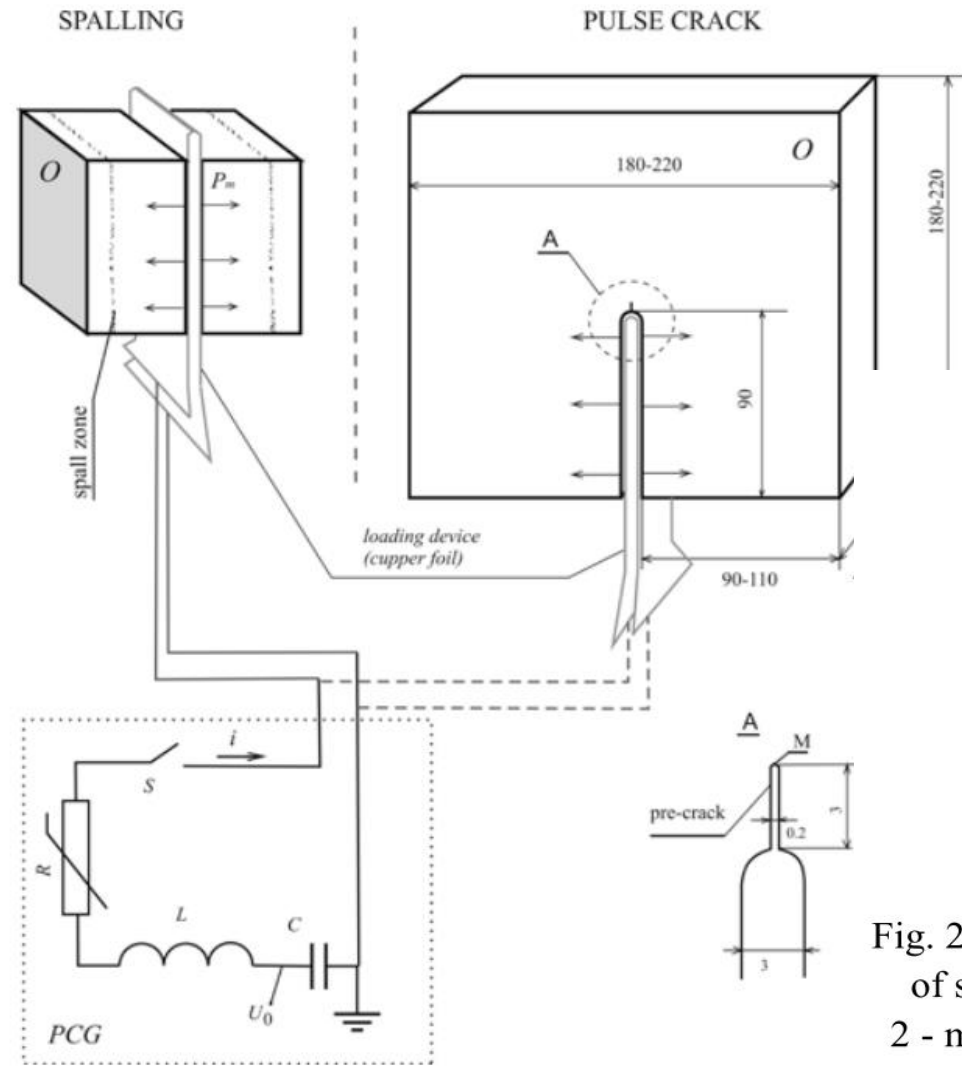
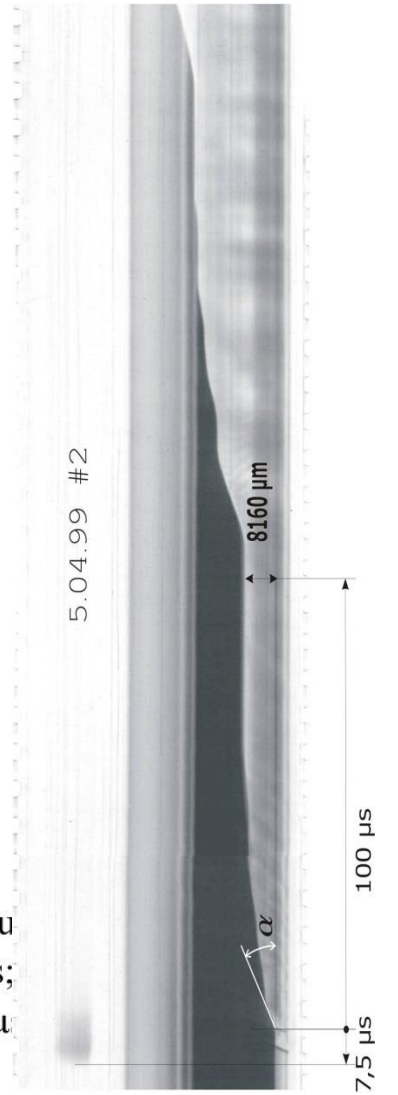
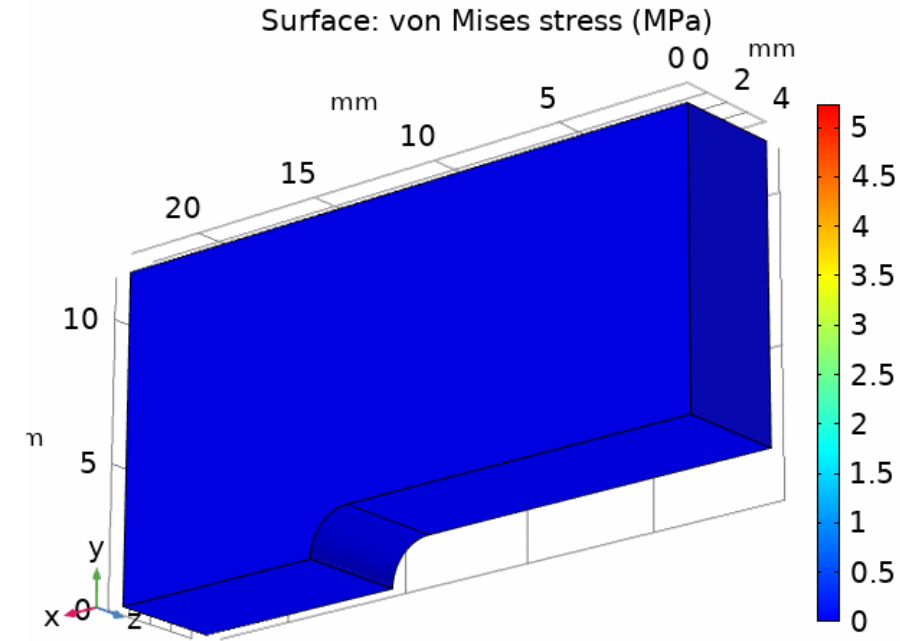
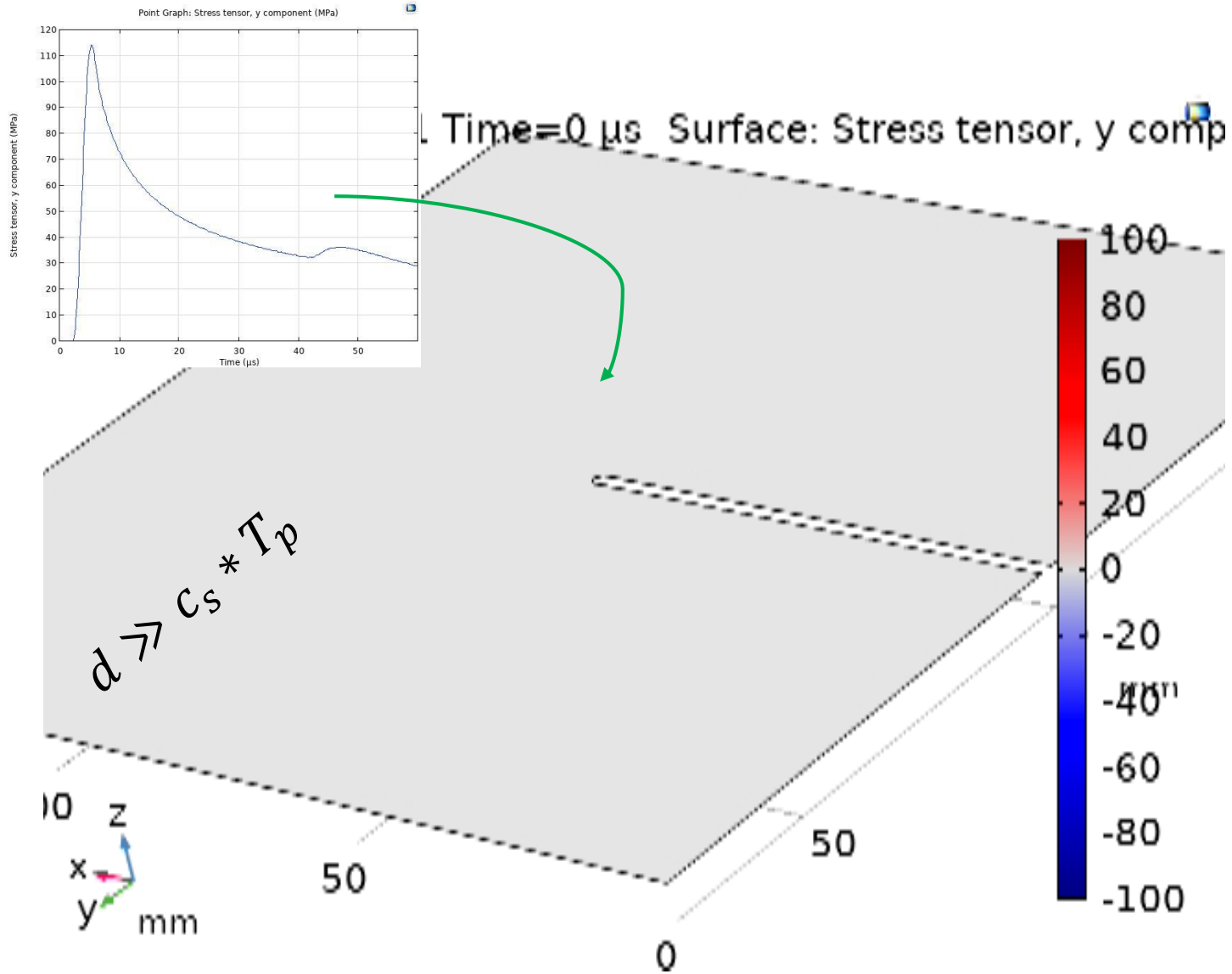


Fig. 2. Dependences of the length of penetrated crack on the amplitude of single pressure pulse at loading duration: 1 – limestone, 4.4 μs ; 2 - marble, 3.6 μs ; 3 – gabbro-diabase, 3.6 μs ; 4 – sandstone, 3.6 μs ; 5 - basil, 3.6 μs ; 6 – polymer compound - 1.5 μs [17]; PMMA: 7-1 μs ; 8 –2 μs ; 9 – 4.3 μs [1, 18]. I - pulse waveform.



Режимы нагрузки



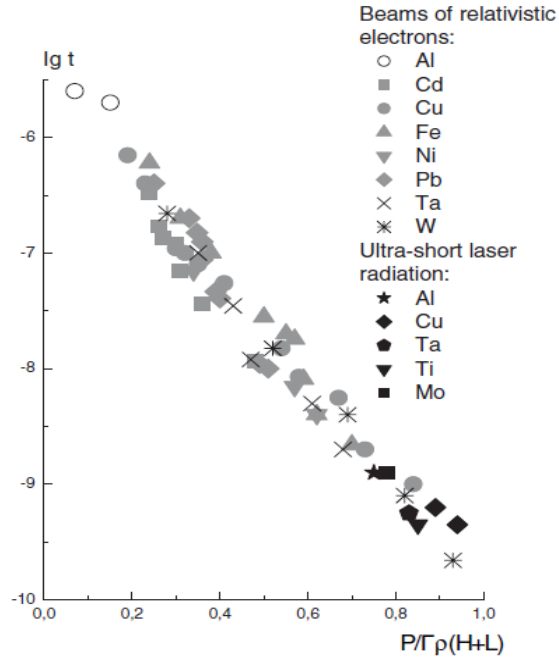
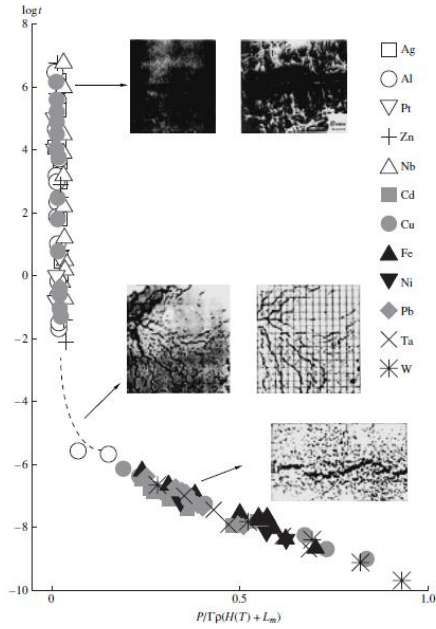
$$d \ll c_s * T_p$$

При импульсном воздействии возможна реализация схем нагружения, в которых:

- формируется поле напряжений, пространственная локализация которого существенно меньше размеров образца (**ударно-волновой режим**);
- нагружение происходит при известных и **контролируемых** в процессе формирования нагрузки параметрах;
- образец может рассматриваться как **энергетически замкнутая система**, т.к. после окончания импульса нагрузки энергообмен между образцом и загрузочным устройством отсутствует.

Physical nature of metals longevity in the dynamic failure phenomenon A.Ya. Uchaeva, S.S. Sokolov, N.I. Selchenkova, E.V. Kosheleva, and L.V. Zhabyka DOI: 10.1051/epjconf/20122604025

R. I. Il'kaev, A. Y. Uchaev, S. A. Novikov, N. I. Zavada, L. A. Platonova, and N. I. Sel'chenkova, "Universal properties of metals in the phenomenon of dynamic failure," *Dokl. Phys.*, vol. 47, no. 5, pp. 341–345, 2002, doi: 10.1134/1.1484401.



Γ – Gruneisen parameter, ρ – density, H – enthalpy and Lm – melting heat

Pulse strength. Groundworks

$$\tau \cong \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right),$$

где $\tau_0 \cong 10^{-13} - 10^{-12} \text{ s}$ – средний период частоты колебаний атомов,
 U_0 – энергия межатомной связи,
 γ – активационный объем, характерные значения которого лежат в диапазоне $0.5-5 \text{ nm}^3$.

$$BF \equiv \int_0^{\tau_p} \frac{dt}{\tau[\sigma(t), T]} = 1$$

$\tau(t) = \alpha \left(\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon\right)^\beta = \alpha (A_{def})^\beta$, где α, β – постоянные значения, определяемые свойствами материала. При $\beta = -1$ и $\alpha = \varepsilon_m \sigma_0 \tau_L$ приобретает вид

$$BF = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\tau_p} \frac{1}{\left(\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon\right)^\beta} dt = \frac{1}{\varepsilon_m \sigma_0 \tau_L} \int_0^{\tau_p} A_{def} dt,$$

Bailey, J. An attempt to correlate some tensile strength measurements on glass III. *Glass Ind.* 1939, 20, 21.

from **particular** to **general** and/or vice versa

$$\frac{\max_{(x,y,z)} \int_0^t w_p(t,x,y,z)|_{PA} dt}{\tau_{Lm}|_{PA}} \leq w_{p0}|_{PA}$$

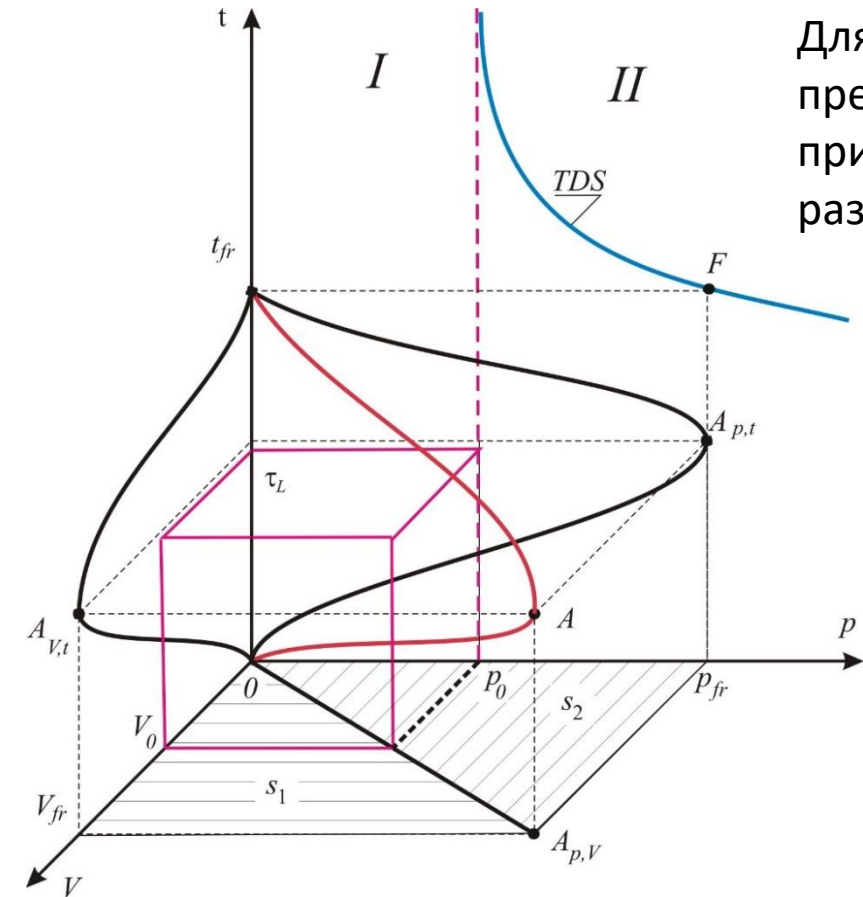
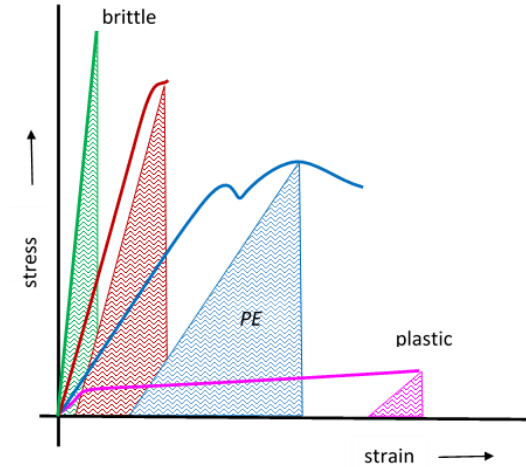
$$w_e = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_e^2 / 2,$$

$$w_m = \varepsilon_Y^2 E_Y / 2,$$

где w_p - плотность потенциальной энергии, соответствующей разрушению при механическом воздействии ($PA \rightarrow fr$) или электрическому пробое ($PA \rightarrow el.br$), T_p - характерное время воздействия до разрушения, τ_L - соответствующее режиму нагружения время аккумуляции энергии, характеризующее время в течении которого материал не разрушается при предельной плотности энергии в статике.

Pulse strength. *Advancing*

Для оценки состояния системы введем предельное значение потенциальной энергии $p_{fr} V_{fr}$ при превышении которого система переходит в разрушенное состояние



$$\frac{1}{\tau_L} \int_0^t p(t)V(t) ds \leq p_m V_m$$

$$\max_x \int_0^t \varepsilon(t, x) \sigma(t, x) dt \leq \varepsilon_m \sigma_0 \tau_{Lm},$$

$$\max_{(x,y,z)} \int_0^t \sigma(t, x, y, z)^2 dt \leq \sigma_0^2 \tau_{Lm}$$

$$E_Y \Leftrightarrow const(T_{pulse})$$

адиабатический режим

Особенности управляемости параметрами

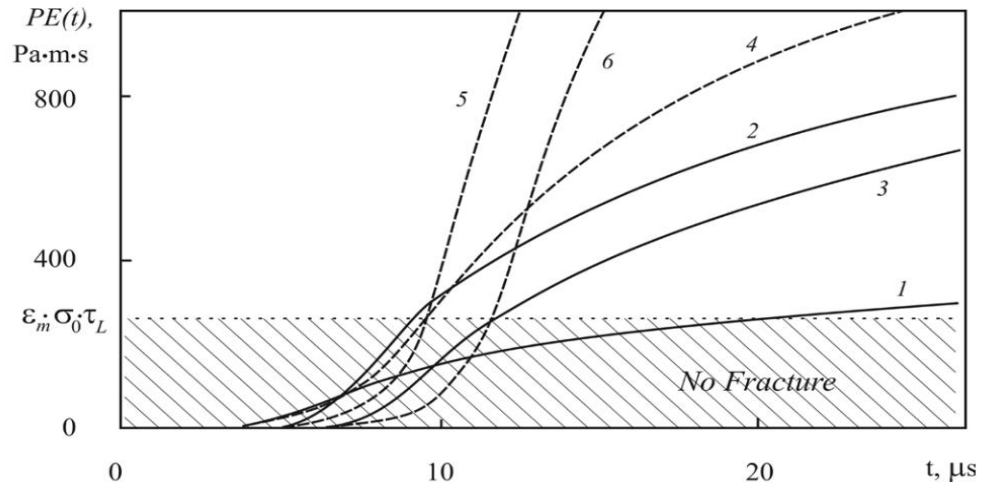


Figure 6. Dependence in PMMA sample at pre-crack length of: 1 and 4 – 0 mm; 2 and 5 – 1.5 mm, 3 and 6 – 3 mm, loaded by 320 MPa pulse of 5.6 microsecond duration –curves 1-3 and of 11.6 microsecond duration.

$$\max_{(x,y,z)} \int_0^t \sigma(t, x, y, z)^2 dt \leq \sigma_0^2 \tau_{Lm},$$

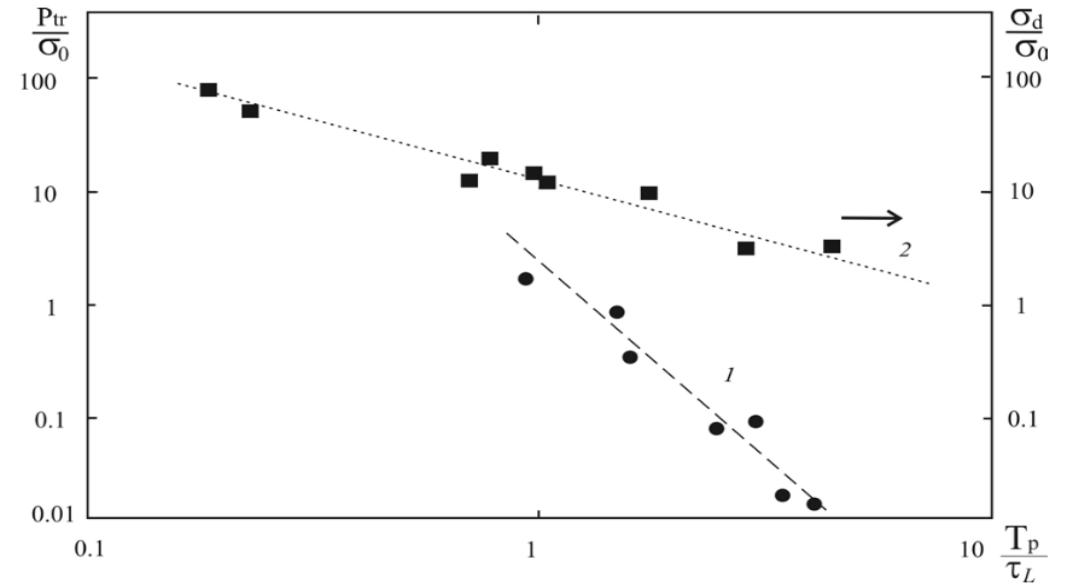
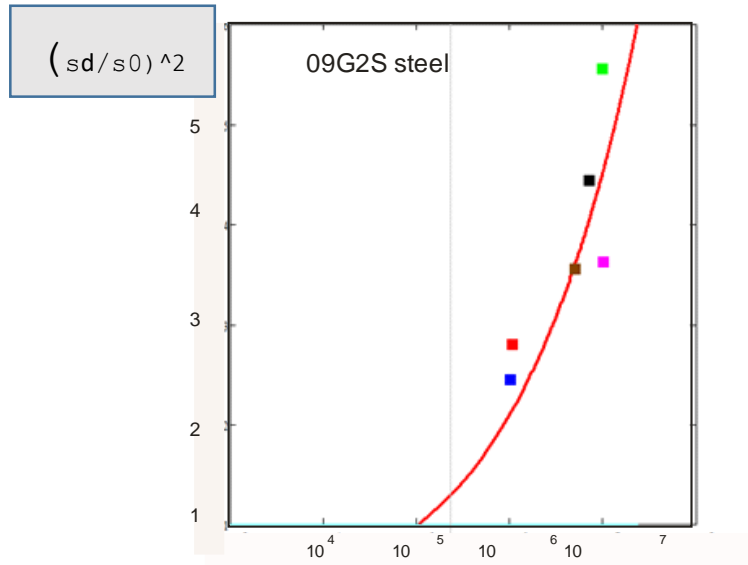
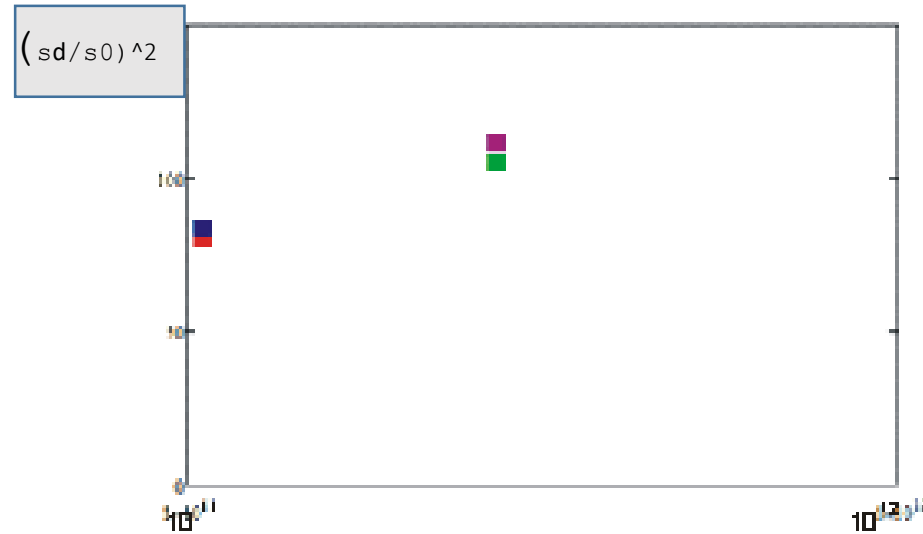


Figure 7. Generalized dependence for various materials of threshold destruction loading for testing samples with macro-defects -1 and along the spallation destruction pattern -2.



[The spall failure delay: Experimental observation and theoretical analysis](#) International Journal of Impact Engineering, 2022, Mikhailova, N.V., Smirnov, I.V., Balandin, V.V., (...), Bragov, A.M., Petrov, Y.V.

$14 \cdot 10^{-7}$



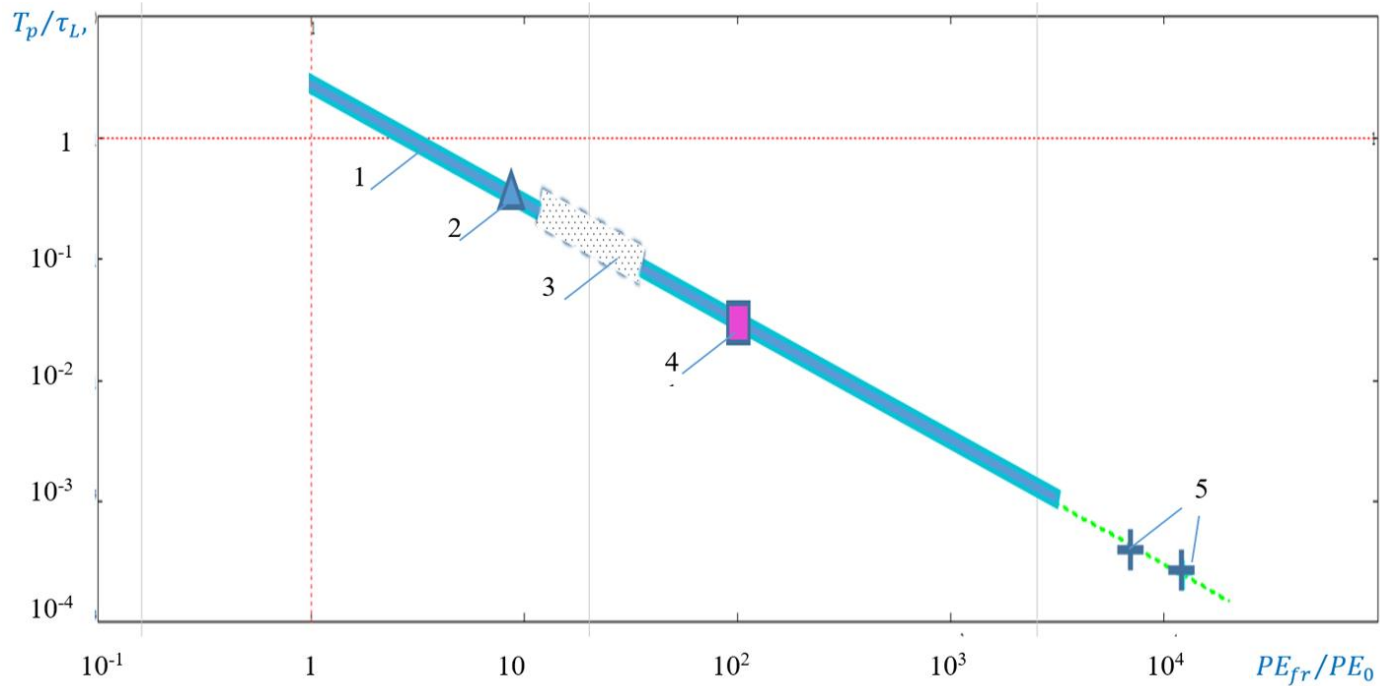
[ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИИ И ОТКОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ АЛЮМИНИЯ ПРИ ОДНОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА](#)

Ашитков С.И., Комаров П.С., Овчинников А.В., Струлёва Е.В., Агранат М.Б.
Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 3. С. 242-245.

$1.35 \cdot 10^{-7}$

Особенности управляемости параметрами

$$\max_{x_i} \int_0^t PE(s, x_i) ds \leq PE_0 \tau_{Lm},$$



Зависимость относительной длительности разрушающего импульса от относительной потенциальной энергии. Обработанные в соответствии с (2) экспериментальные данные: 1-из данных [16], 2 – из [] (PMMA), 3- область данных из [30] (09G2S steel), 4 - из [33] (Al), 5- из [32] (Ti).

$$PE_{fr}/PE_0 \equiv (\sigma_{fr}/\sigma_0)^2$$

$$\max \int_0^t \varepsilon(s, x) \sigma(s, x) ds \leq \varepsilon_m \sigma_0 \tau_{Lm},$$

. N. V. Mikhailova, I. V. Smirnov, V. V. Balandin, V. V. Balandin, A. M. Bragov, and Y. V. Petrov, "The spall failure delay: Experimental observation and theoretical analysis," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 164, no. December 2021, p. 104194, 2022, doi: 10.1016/j.ijmpeng.2022.104194.

. С. И. Ашитков, П. С. Комаров, А. В. Овчинников, Е. В. Струлёва, М. Б. Агранат, "Динамика деформации и откольная прочность алюминия при однократном воздействии фемтосекундного лазерного импульса", *Квантовая электроника*, 43:3 (2013), 242–245 [*Quantum Electronics*, 2013, *Volume 43, Issue 3, Pages 242–245* DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n03ABEH015104>]

. SPALLATION STRENGTH OF TITANIUM AT HIGH-SPEED TENSION Struleva E.V., Komarov P.S., Ashitkov S.I. *High Temperature*. 2020. Т. 58. № 5. С. 744-746.

. P. Forquin, M. Nasraoui, A. Rusinek, and L. Siad, "Experimental study of the confined behaviour of PMMA under quasi-static and dynamic loadings," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 40–41, pp. 46–57, 2012, doi: 10.1016/j.ijmpeng.2011.09.007

. С. И. Ашитков, П. С. Комаров, А. В. Овчинников, Е. В. Струлёва, М. Б. Агранат, "Динамика деформации и откольная прочность алюминия при однократном воздействии фемтосекундного лазерного импульса", *Квантовая электроника*, 43:3 (2013), 242–245 [*Quantum Electronics*, 2013, *Volume 43, Issue 3, Pages 242–245* DOI: <https://doi.org/10.1070/QE2013v043n03ABEH015104>]

WSW \rightleftharpoons ? SW

уровень, соответствующий переходу между режимами (the weak shock limit (WSL)), близок к теоретическому пределу прочности.

N. K. Bourne and F. L. Bourne, "On the transition from weak to strong shock response," *J. Appl. Phys.*, vol. 131, no. 14, 2022, doi: 10.1063/5.0084553

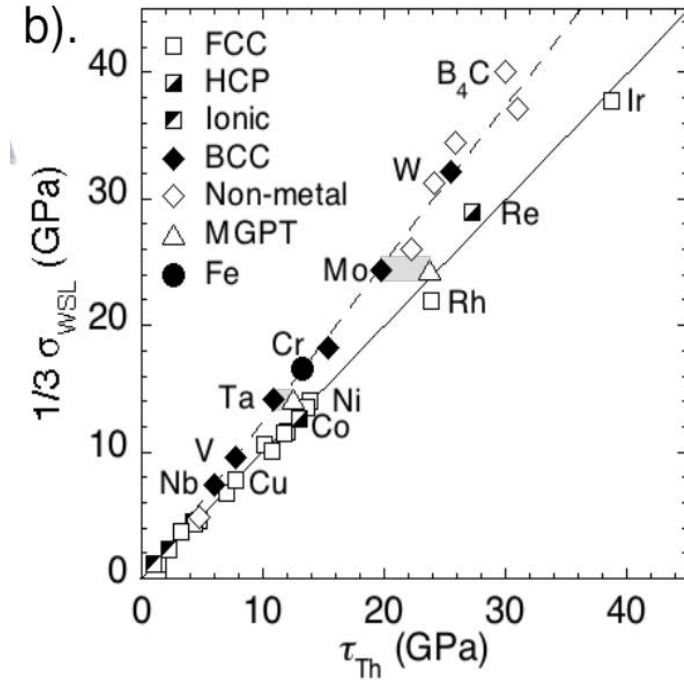
$$T_0 (S_1 - S_0) = \frac{1}{12} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2} \right)_S (V_0 - V_1)^3$$

где $V = \frac{1}{\rho}$ (ρ – плотность среды), T – температура

for WSW

$$(V_1 - V_0) \sim 0 \Rightarrow S \sim const$$

Y. Zel'dovich and Y. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Academic Press Inc., New York, 1966)



b). variation of the experimentally measured weak shock limit threshold with estimated theoretical strength;

F. L. Bourne and N. K. Bourne, "Thresholds in shock response across the elements," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1793, 2017, doi: 10.1063/1.4971549.
Centre for Matter under Extreme Conditions, Oxfordshire, United Kingdom.

Влияние формы импульса

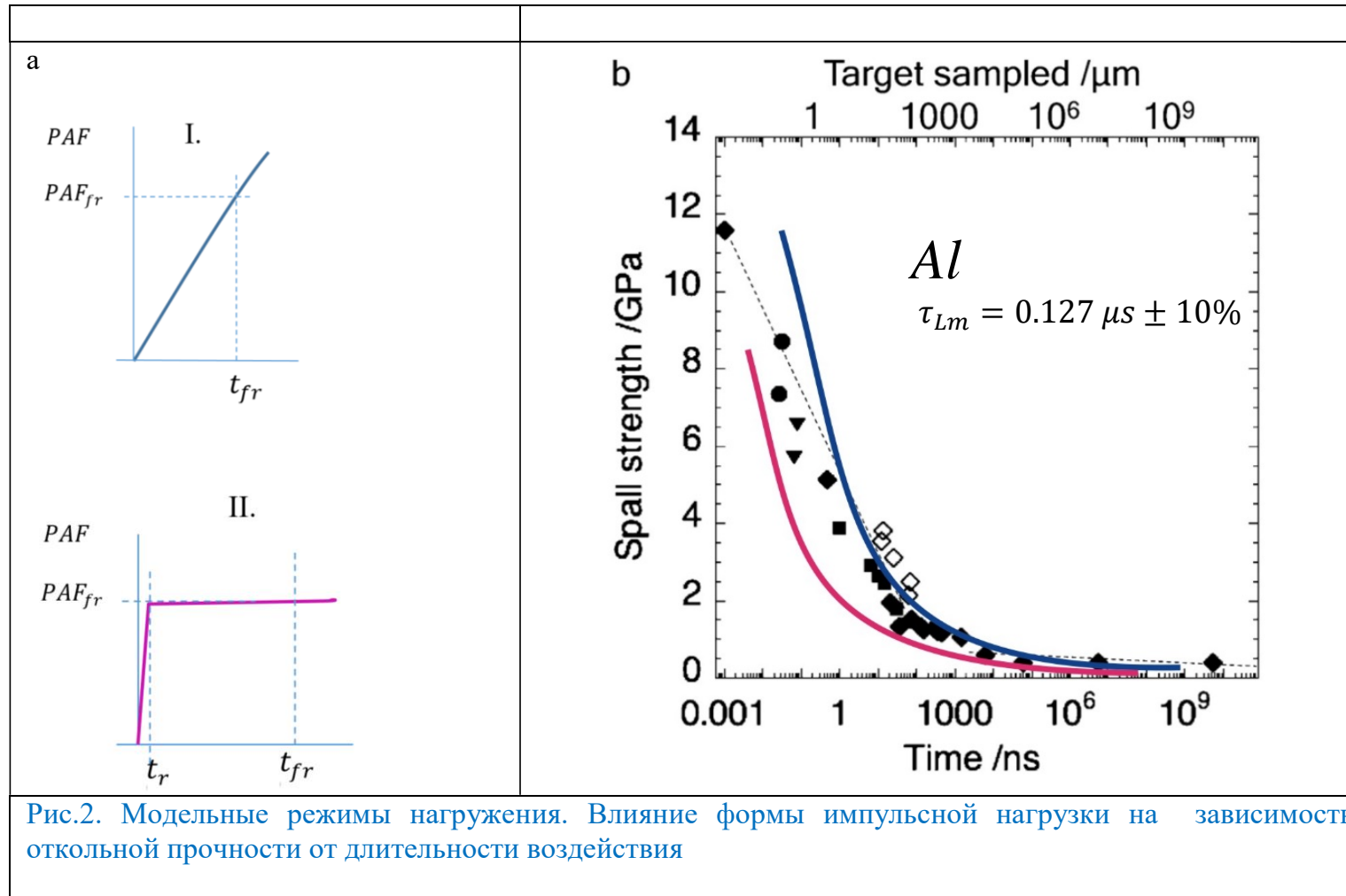


Рис.2. Модельные режимы нагружения. Влияние формы импульсной нагрузки на зависимость откольной прочности от длительности воздействия

С. И. Ашитков, П. С. Комаров, А. В. Овчинников, Е. В. Струлёва, М. Б. Агранат, “Динамика деформации и откольная прочность алюминия при однократном воздействии фемтосекундного лазерного импульса”, *Квантовая электроника*, 43:3 (2013), 242–245 [*Quantum Electronics*, 2013, [Volume 43, Issue 3](#), Pages 242–245]

$$SS_{th} \sim 11.7 - 14.9 \text{ GPa} \text{ при } \epsilon' \sim 2 \cdot 10^{10} \frac{1}{s}$$

N. K. Bourne, “On Thresholds for Dynamic Strength in Solids,” *J. Dyn. Behav. Mater.*, vol. 7, no. 2, pp. 325–337, 2021, doi: 10.1007/s40870-021-00301-y.

Электрический пробой

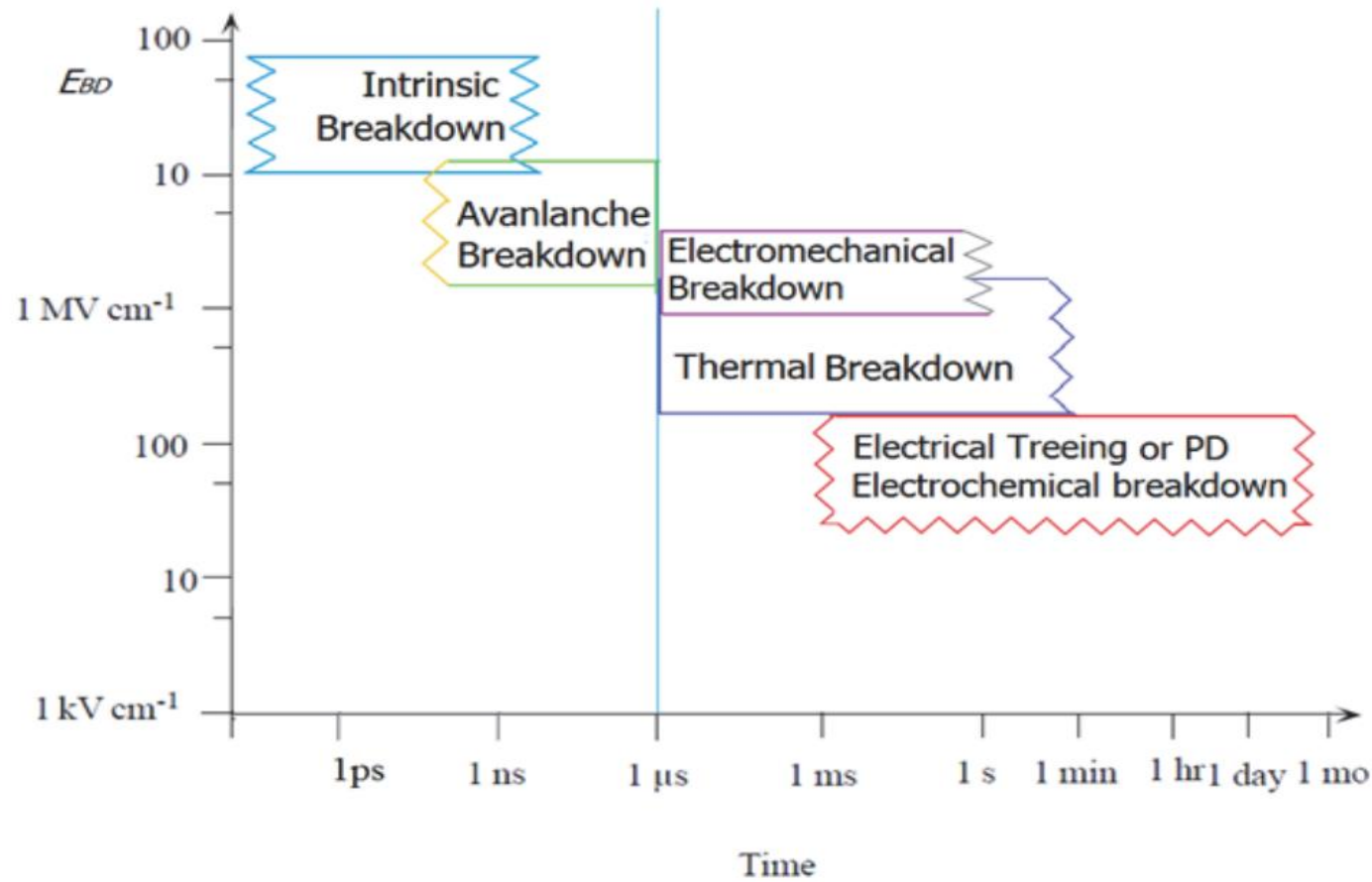


Figure 2. Gross schematic of solid dielectric breakdown mechanisms in a wide time range.

Константа скорости **туннельной ионизации** $k_{HL}(p)$ определяется в соответствии с формулой

$$k_{HL}(p) = v_0 D_{HL}, \text{ где } D_{HL} = \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m}}{3e\hbar} \cdot \frac{\Delta^{3/2}}{E}\right) - \text{прозрачность потенциального барьера, } v_0 \approx 10^{16} \text{ с}^{-1} - \text{частотный}$$

фактор, m — масса электрона, \hbar — постоянная Планка, Δ — высота потенциального барьера, рассчитанная с учетом её снижения за счет дебаевского экранирования $\Delta = E_g - \Delta I(p)$, где E_g - ширина энергетической щели.

Для выравнивания концентрации носителей по объёму диэлектрика необходимо время, которое определяется характерной длиной и скоростью дрейфа носителей заряда $\tau_i \sim \lambda / E\mu$, где μ - подвижность носителей заряда

Если $M0$ — начальная концентрация способных ионизоваться фрагментов макромолекул равна примерно 10^{27} м^{-3} , то среднее расстояние между ними $d = M0^{-3}$, то есть около 10^{-9} м . При величине подвижности зарядов $\mu = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [8] получаем для напряженности, близкой к пробивной, значение частотного фактора $v_0 = 1/\tau_i$ порядка 10^9 с^{-1} .

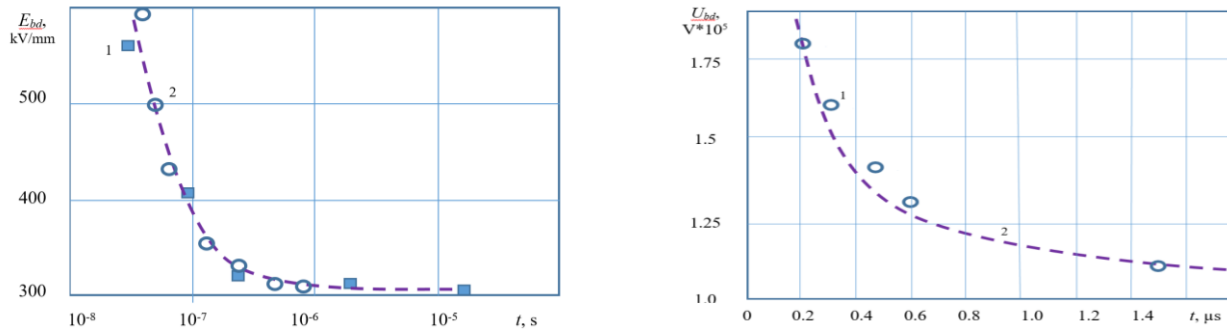
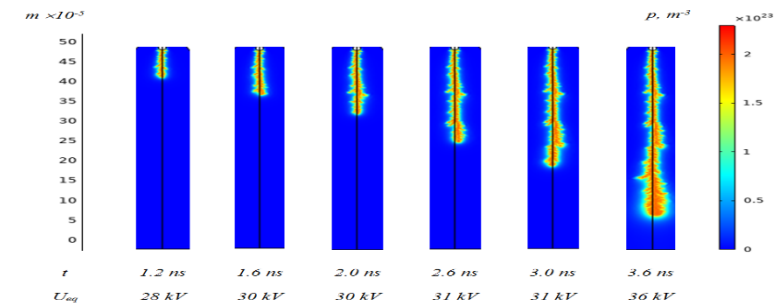


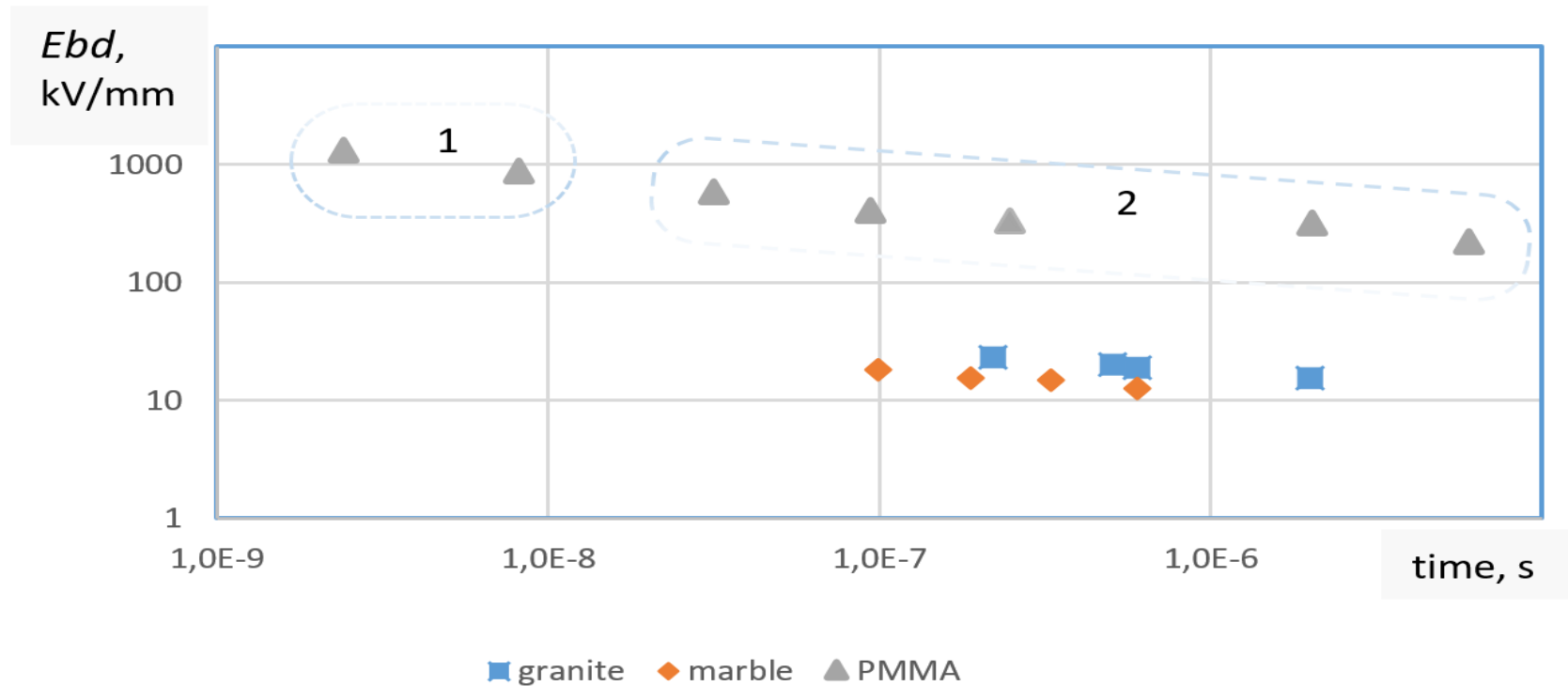
Рис.3. Экспериментальные зависимости пробивной прочности: а) ПММА – по данным: 1- из [8], 2- моделирование; б) гранита – по данным (1) -из [8], результат моделирования-2.

*А.В. Астафуров, А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, К.М. Кевролева, Изв. Томск. политехн. ин-та, 94, 16 (1958) "Вольт-секундные характеристики твердых однородных диэлектриков" Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, vol. 94, 1958, pp. 16-19.
**Малахов В. С., Каляцкий И. И., Кривко В. В. Исследование пробоя увлажненных горных пород при импульсном воздействии напряжения //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1970. – Т. 157. – С. 196-200.

частотный параметр определяет усредненную на пространственном масштабе неоднородности скорость ионизации среды за счет дрейфа носителей заряда из центра ионизации



Электрический пробой



Экспериментальные зависимости пробивной прочности:

а) ПММА – по данным: 1- из [i], 2 из [ii], гранита и мрамора – по данным из [iii].

[i] Kitani I., Arii K. Impulse breakdown of polymer dielectrics in the ns range in divergent fields //IEEE Transactions on electrical insulation. – 1981. – №. 2. – С. 134-139.

[ii] Астафуров А. В., Воробьев Александр Акимович, Воробьев Григорий Абрамович, and Кевролева К. М.. "Вольт-секундные характеристики твердых однородных диэлектриков" Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, vol. 94, 1958, pp. 16-19.

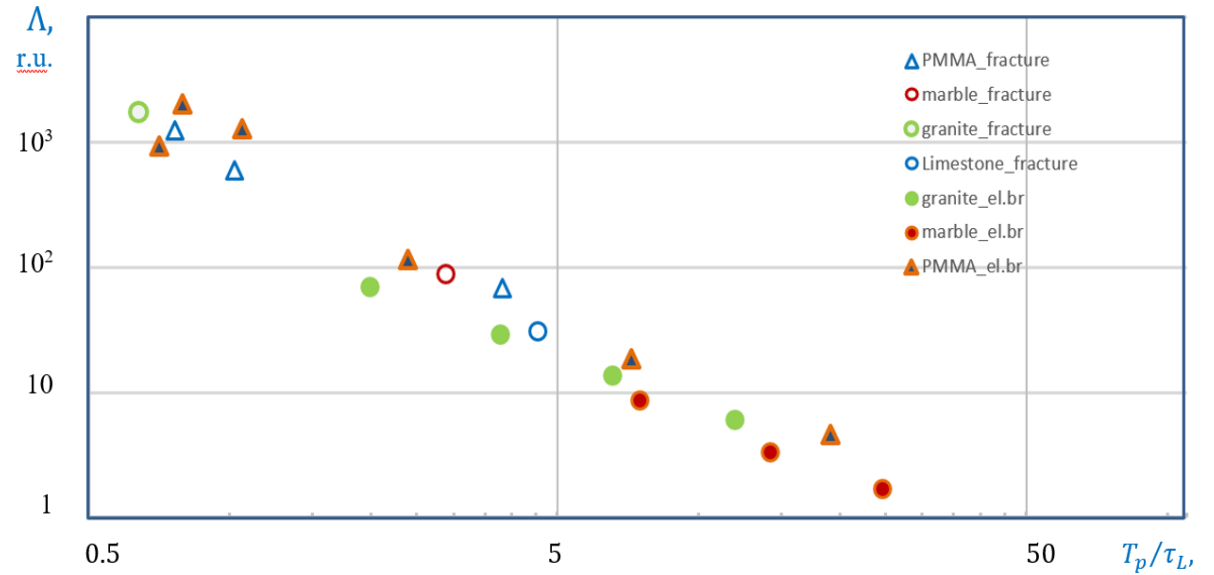
[iii] Малахов В. С., Каляцкий И. И., Кривко В. В. Исследование пробоя увлажненных горных пород при импульсном воздействии напряжения //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1970. – Т. 157. – С. 196-200.

breakdown and fracture of solid dielectrics (based on limited data available)

$$(w_p/w_0)|_{\text{fracture}} = (\sigma_{fr}/\sigma_0)^2$$

$$(w_p/w_0)|_{\text{el.br}} = (E_{el.br.}/E_{e0})^2$$

$$\Lambda|_{PA} = (w_p/w_0)|_{PA} / (T_p/\tau_L)|_{PA}$$

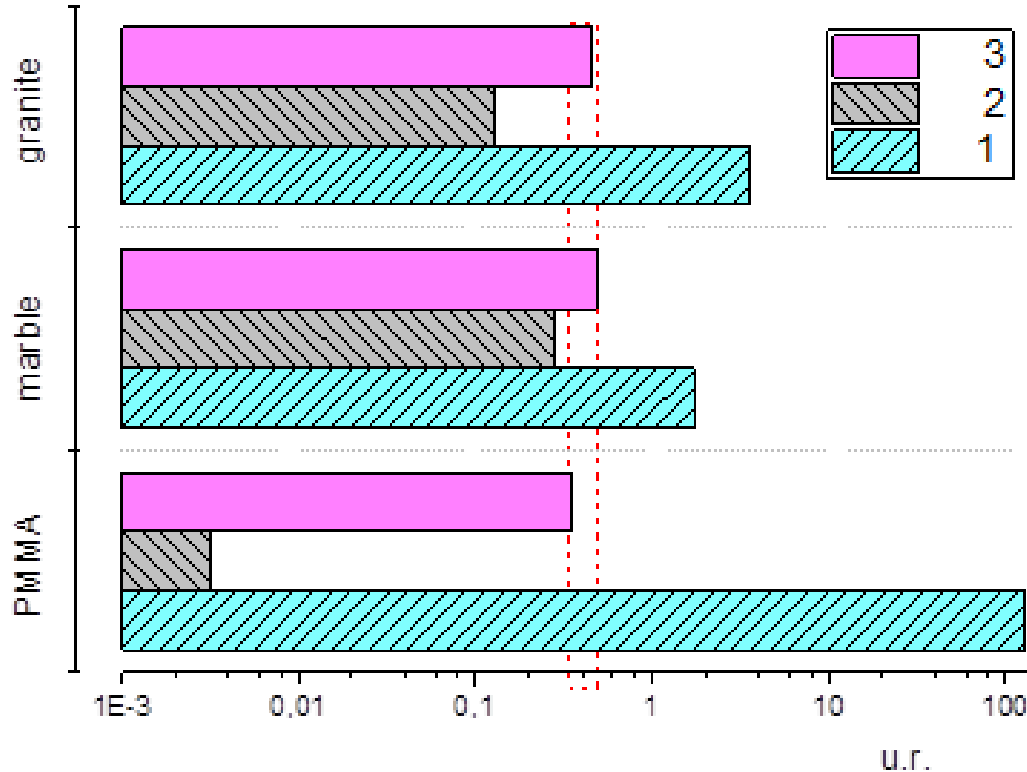


	материал	состав	Параметры модели полевой ионизации		$\tau_{Lm}, \mu s$
			E_g, eV	$\nu_0, 1/c$	
1	гранит	SiO ₂ 68-73 %; Al ₂ O ₃ 12,0-15,5 %; Na ₂ O 3,0-6,0 %; CaO 1,5-4,0 %; FeO 0,5-3,0 %; Fe ₂ O ₃ 0,5-2,5 %; K ₂ O 0,5-3,0 %; MgO 0,1-1,5 %; TiO ₂ 0,1-0,6 %; ThO ₂ 0,001-0,004 %	1.45	$3 \cdot 10^5$	12.4
2	оргстекло	$[-CH_2C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$	2.7	$1 \cdot 10^8$	4.2
3	мрамор	CaCO ₃	1.46	$2 \cdot 10^5$	2.75

$$\Lambda = A \cdot (T_p/\tau_{PA})^{-2}$$

$$A = 500 \pm 200$$

$$(PE_0) \wedge (PE_0 \vee \tau_L) \quad ?$$



	материал	состав
1	гранит	SiO ₂ 68-73 %; Al ₂ O ₃ 12,0-15,5 %; Na ₂ O 3,0-6,0 %; CaO 1,5-4,0 %; FeO 0,5-3,0 %; Fe ₂ O ₃ 0,5-2,5 %; K ₂ O 0,5-3,0 %; MgO 0,1-1,5 %; TiO ₂ 0,1-0,6 %; ThO ₂ 0,001-0,004 %
2	мрамор	CaCO ₃
3	оргстекло	[—CH ₂ C(CH ₃)(COOCH ₃)—] _n

1 – отношение энергий механического разрушения и электрической прочности $w_0|_{fr}/w_0|_{el.br}$, 2 – отношение времени аккумуляции энергии для разрушения при электрическом и механическом импульсном воздействии $\tau_L|_{el.br}/\tau_L|_{fr}$, 3 – отношение мощностей $(w_0|_{fr}/w_0|_{el.br})/(\tau_L|_{fr}/\tau_L|_{el.br})$

Комбинированное воздействие

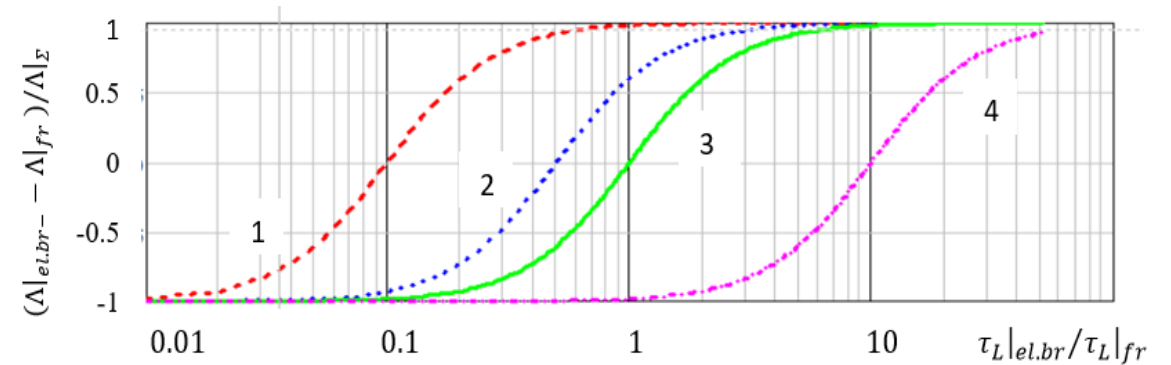
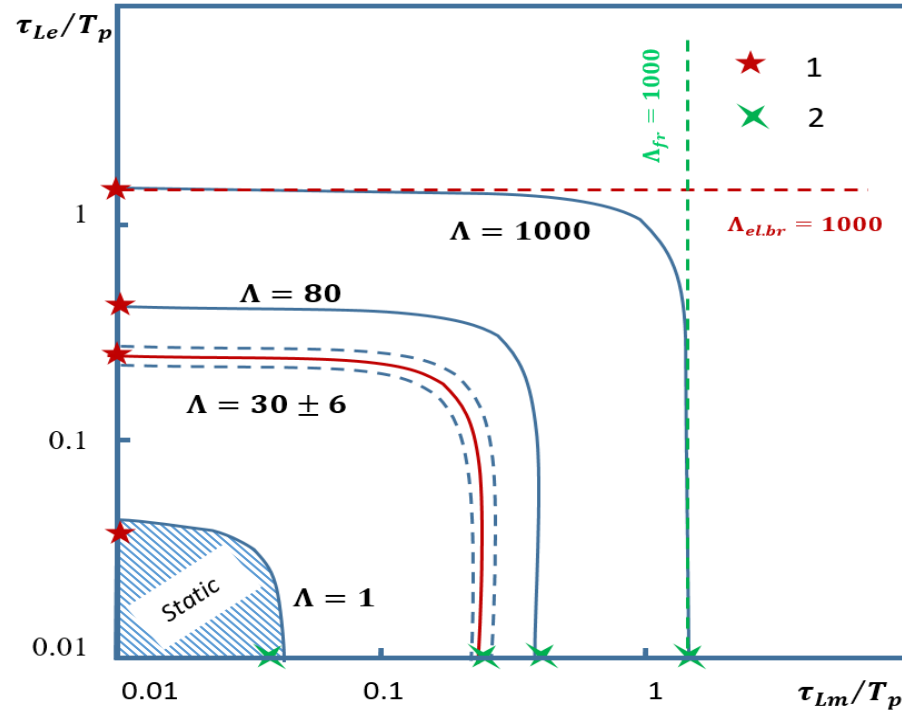
$$\Lambda|_{\Sigma} = \max_{(x,y,z)} \sum_{PA} (\Lambda|_{PA})$$

$$\Lambda|_{\Sigma} = (w_p/w_0)/(T_p/\tau_L)|_{fr} +$$

$$+ (w_p/w_0)/(T_p/\tau_L)|_{el.br} + \dots$$

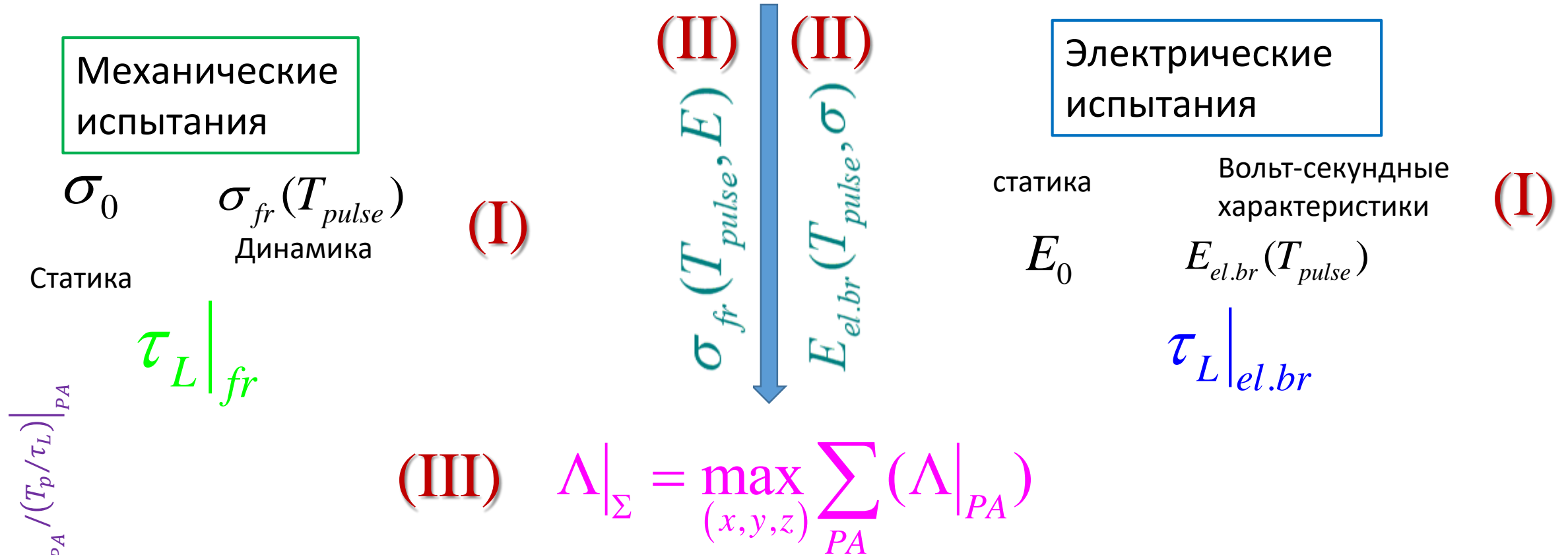
снижение пробивного напряжения 1.5-2 раза при удлинении образцов изоляции XLPE cable на 15%.

E. Ildstad and S. T. Hagen, "Electrical treeing and breakdown of mechanically strained XLPE cable insulation," *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, vol. 1992-June, pp. 135-139, 1992, doi: 10.1109/ELINSL.1992.247035.



Вклад электрической энергии в разрушение при комбинированном импульсном воздействии для различных длительностях нагружения $T_p|_{el.br}/T_p|_{fr}$: 1 – 0.1; 2 – 0.5; 3 – 1; 4 – 3.

Оценка комбинированного импульсного воздействия



The work was supported by State Atomic Energy Corporation Rosatom and Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Federal Project 3 (FP3), project # FSEG-2025-0005 “Development of design and technological solutions to ensure mechanical strength and cooling of the central solenoid of tokamak TRT”

fracture scale ?

$$\tau \cong \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - U_{ex}}{kT}\right)$$

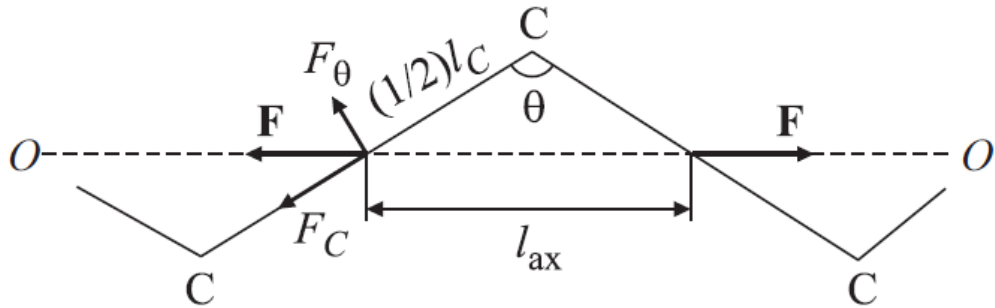
$$U_{ex_fr} = \gamma \cdot \sigma$$
$$U_{ex_el.br} = \alpha \cdot E_e$$
$$\hat{\tau}_{ex} = \left(\tau_L|_{E_{ex_st}} / \tau_L|_{E_{ex_pulse}} \right) = \exp\left(\frac{U_{ex_pulse} - U_{ex_st}}{kT}\right)$$

$$\hat{\tau}_{fr} / \hat{\tau}_{el.br} = 1 \Rightarrow U_{fr_pulse} = U_{el.br_pulse}$$

$$\sigma \cdot \gamma = \left(\gamma \cdot \frac{2E_Y}{\sigma} \right) \cdot \frac{\sigma^2}{2E_Y} = \gamma_{fr} \cdot w_{fr}$$
$$\alpha \cdot E_e = \left(\alpha \cdot \frac{2}{\varepsilon E_e} \right) \cdot \frac{\varepsilon E_e^2}{2} = \alpha_E \cdot w_E$$

Уменьшение масштаба зоны разрушения с увеличением вкладываемой плотности энергии

fracture scale ?



$$l_{fr} = \sqrt[3]{\gamma_{fr}} = \sqrt[3]{\left(\gamma \cdot \frac{2E_Y}{\sigma} \right)}$$

$$l_E = \sqrt[3]{\alpha_E} = \sqrt[3]{\left(\alpha \cdot \frac{2}{\varepsilon E_e} \right)}$$

$$l_{ax} \sim 0.127 \text{ nm} \quad (T = 90^\circ \text{C})$$

$$R_C \sim 70 \pi m$$

$$\alpha \sim 2 \cdot 10^{-28} \text{ C} \cdot m$$

$$\gamma \sim 0.14 \text{ nm}^3$$

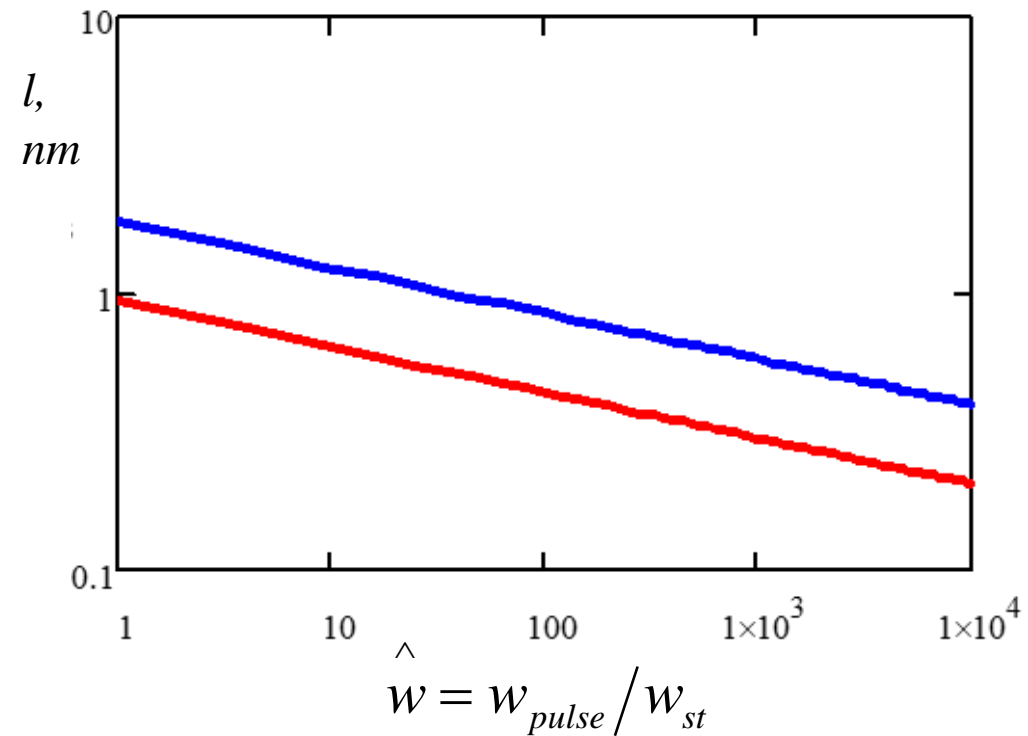


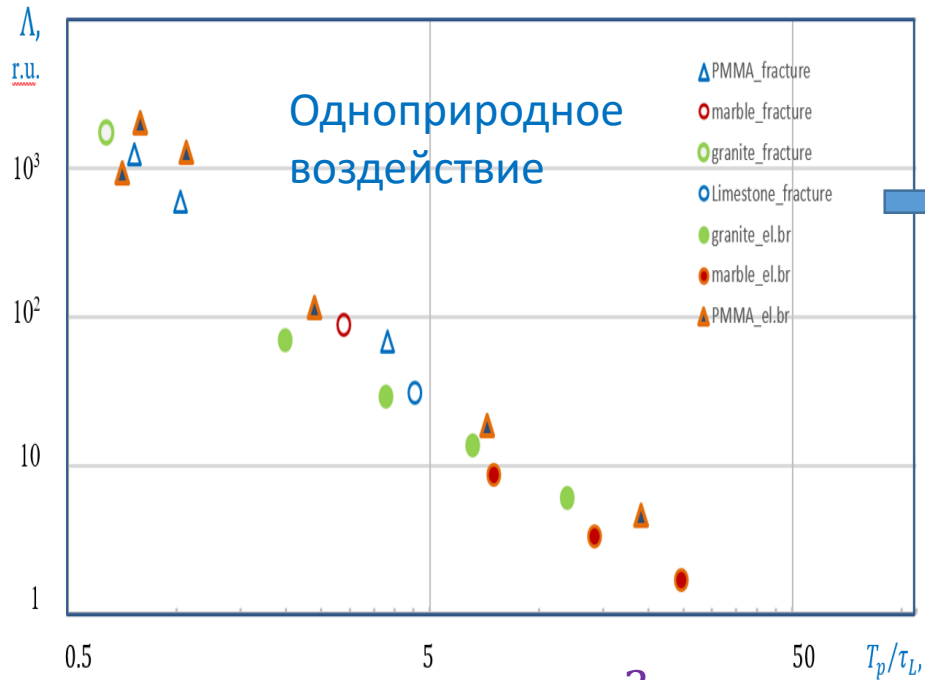
Рис. 1. Схема углеродного скелета цепной полимерной молекулы в форме плоского зигзага. Растягивающая сила F приложена по оси молекулы $O-O$.

Все впереди!



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

Импульсный пробой и разрушение твердых диэлектриков (based on limited data available)



$$\Lambda|_{\Sigma} = \max_{(x,y,z)} \sum_{PA} (\Lambda|_{PA})$$

$$\Lambda = A \cdot (T_p / \tau_{PA})^{-2}$$

$$\Lambda|_{PA} = (w_p/w_0)|_{PA} / (T_p/\tau_L)|_{PA}$$

$\tau_L|_{PA}$ - временной параметр материала для соответствующего воздействия

$$(w_p/w_0)|_{fracture} = (\sigma_{fr}/\sigma_0)^2$$

$$(w_p/w_0)|_{el.br} = (E_{el.br}/E_{e0})^2$$

T_p - длительность воздействия

