



РАСЧЕТЫ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ ТИПА АЛТ ДЛЯ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ

А. М. Буйко, Г. Г. Иванова, И. В. Морозова

Аннотация

*Представлены уточненные расчеты устройств типа АЛТ. Они хорошо согласуются с экспериментом и показывают возможности устройств для безударного сжатия металлов до **20 Мбар** - при магнитной имплозии лайнеров под действием токов до **60 МА** (азимутальных магнитных полей **~10 МГц**).*

*Презентация доклада международной конференции
XIV Забабахинские научные чтения, 18-22 марта 2019, г. Снежинск*

1. Введение. 1.1. Устройство ALT-3 (проект).

2

Устройство ALT-3 (Рис. 1) разрабатывалось [4] для проверки эффективности магнитной имплозии цилиндрического Al-лайнера как ударника - под действием тока до 70 МА (азимутального магнитного поля до 6 МГс).

Такой лайнер ($R_l=4\text{см}$, $\Delta_{Al}=3\text{мм}$) может разогнаться до $\sim 20\text{км/с}$ ($R_{imp}=1\text{см}$, глубина имплозии $R_{ind}/R_{imp} \sim 4$).

В экспериментах ALT-1,2 [5] ("Advanced Liner Technology") такой же Al-лайнера ($\Delta_{Al}=2\text{мм}$) был разогнан до $\sim 12\text{км/с}$ - под действием тока $\sim 30\text{МА}$ ($B_j \sim 2\text{МГс}$).

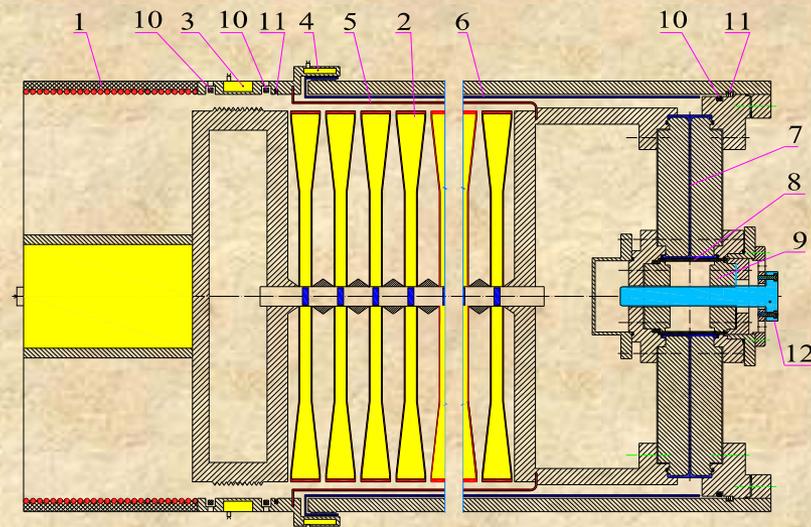


Рис. 1. Схема устройства ALT-3. 1 и 2 – спиральный и дисковый взрывомгнитные генераторы (СВМГ и ДВМГ $\varnothing 0.4\text{м}$); 3 и 4 – взрывные замыкатели тока: кроубар 3 отключает СВМГ при начальном токе ДВМГ $I_0 = 7\text{МА}$ ($t = t_0$); ВЗТ 4 подключает нагрузку индуктивностью бНГн в заданное время t_{oi} (при напряжении на ФРТ $U_{oi} < 10\text{kV}$); 5 – фольговый размыкатель тока (ФРТ) с Си-фольгой толщиной $\Delta_f = 0.12\text{-}15\text{мм}$ и высотой $\sim 90\text{см}$; 6,7 – коаксиально-радиальная передающая линия (ПЛ); 8 – пондеромоторный узел (ПУ) с Al-лайнера; 9 – торцевые стенки ПУ; 10,11 – токовые датчики; 12 – измерительный узел радиусом $R_{imp}=1\text{см}$ с PDV-датчиками и исследуемыми материалами.

4. A.M.Buyko, S.F.Garanin, A.M.Glybin, et al., "Testing and revision of the parameters of a system for liner driving to 20 km/s," *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, vol. 56, no.1, pp. 96-102, 2015.

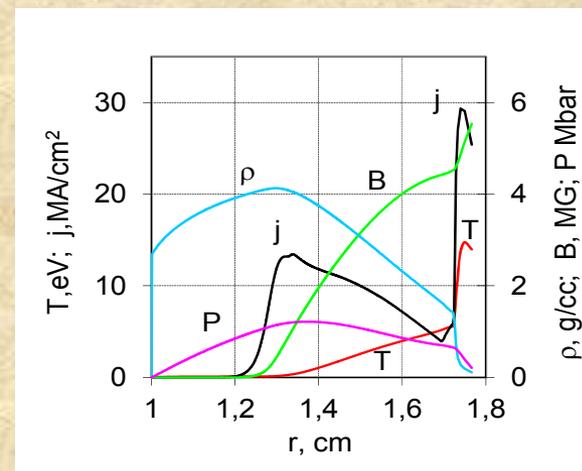
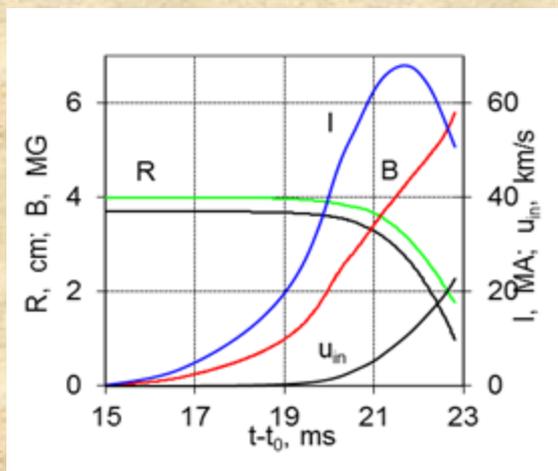
5. Buyko A.M., Gorbachev Yu. N., Zmushko V.V. et al., Anderson B.G., Atchison W. L., Clark D.A. et al., "Simulation of Atlas parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2". Proc. IX Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, M.–St. Petersburg, 2002, VNIIEF, Sarov, 2004. P. 747-751.

1.2. Магнитная имплозия лайнеров. Ее характеристики для Al-лайнера ALT-3

Используются однослойные (Al,Cu) и двухслойные лайнеры - с внутренним слоем (ударник, исследуемый материал) и наружным слоем (Al,Cu - «толкатель»), по которому течет ток $I(t)$, а на его поверхность $R_{out}(t)$ действует азимутальное магнитное поле $B_j(t) = I(t)/5R_{out}(t)$ [см,МА,МГс] (Рис. 2, слева). Это поле диффундирует в скин-слой и формирует в нем магнитное давление $P_B = B^2/8\pi$ [МГс, Мбар] - как результат действия объёмных сил, пропорциональных $[jB]$ ($j(r,t)$ и $B(r,t)$ - плотность тока и магнитное поле, Рис. 2, справа).

К концу имплозии вблизи наружной границы Al-лайнера ALT-3 температура может достигать 15эВ (перенос излучения в образующейся здесь плазме). Но внутренняя половина Al-лайнера находится в твердом безударно сжатом до 1Мбар ($\sim P_B$) и упрочненном состоянии, что должно ограничивать развитие основных неустойчивостей лайнера

Рис. 2 [8]. Слева - ток $I(t)$ и магнитное поле $B(t)$ на лайнере ALT-3, ($R-t$) - диаграммы границ лайнера и скорость $v_{in}(t)$; справа - профили магнитного поля $B(r)$ и плотности тока $j(r)$, безударного давления $P(r)$, плотности $\rho(r)$ и температуры $T(r)$ в лайнере ALT-3 перед его соударением ($R_{imp}=1\text{см}$, $R_{in0}/R_{imp} \sim 4$).



1.3. Безударное сжатие материалов при имплозии лайнеров. Некоторые возможности устройства ALT-3.

4

В экспериментах [6] при имплозии лайнеров (3) - под действием тока, нараставшего до 16МА за 0.8мкс ($B_j \sim 16\text{МГс}$, $P_B \sim 10\text{Мбар}$) – безударные давления достигали $\sim 10\text{Мбар}$. Были получены прецизионные измерения скорости $v_{in}(t) < 20\text{км/с}$ внутренней границы лайнеров (с погрешностью $\sim 10\text{м/с}$), что позволило расчетно-экспериментальным методом получать непрерывную зависимость безударного давления от плотности и более высокую точность, « 5,7% (1,8%) по давлению (плотности) или меньше», - в отличие от рентгенографии.

$$R_l = 3.43-3.20\text{мм}, \Delta_{Al} = 1.0-1.2\text{мм}, \Delta_{Cu-Ta} = 0.53-0.30\text{мм}; R_{imp} = 0.35\text{мм} (R_{in0}/R_{imp} \sim 5) \quad (3)$$

В устройстве ALT-3 можно получать безударные давления в материалах более 10Мбар [8] – за счет более высоких магнитных полей (меньших радиусов R_l) и, особенно, более глубокой имплозии, например, используя двухслойные лайнеры:

$$R_l = 30\text{мм}, \Delta_{Al} = 4.14\text{мм}, \Delta_{Al+Cu(W)} = 3.0+0.34(0.16)\text{мм}; R_{imp} = 1\text{мм} (R_{in0}/R_{imp} \sim 27) \quad (4)$$

Безударное сжатие таких лайнеров в процессе их имплозии (Al-ударников ALT-1-3 – до их соударений с образцами) было предложено [7,8] исследовать аналогично [6] - по прецизионным PDV измерениям скорости $v_{in}(t)$ внутренней границы лайнеров.

6. Lemke R.W., Dolan D.H., Dalton D.G., et al. «Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000GPa compression with magnetically driven liner implosions» // Journal of Applied Physics **119**, 015904 (2016).

7. С.Д. Кузнецов, А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, и др. «Моделирование изэнтропического сжатия алюминия при магнитной имплозии лайнеров в устройствах ALT-1-3» // ЗНЧ-2019.

8. A.M.Buyko “Some capabilities of magnetic implosion of high-velocity condensed-matter liners in the ALT-3 driver”, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 46, no. 10, pp. 3512-3517 (2018).

2.1. Моделирование устройств ALT-1,2,3 и типа ALT-3

5

Используется код $1D(MHD)_n$ [11], разработанный на базе методики УП-ОК [13] (Буйко А.М., Иванова Г.Г. и Софронов В.Н.) и **тестированный** рядом экспериментов [12]. Совместно (**параллельно**) решается произвольное количество (n) 1D МГД задач, которые моделируют элементы устройств и связаны двумя уравнениями цепи типа (5).

Каждая цепь - **ДВМГ-ФРТ** с током $I_g(t)$ и **ФРТ-ПУ** с током $I(t)$ - состоит **из модулей**, которые берутся из «библиотек» источников энергии (ДВМГ, ФРТ и др.), передающих линий с замыкателем тока (ВЗТ, коаксиалы, радиальные линии и др.) и ПУ (цилиндры, квазисферы и др.). Для тока $I(t)$ уравнение цепи имеет вид [мкс, нГн, МА,кВ]:

$$d(L I)/dt = U_f - U_- = U_f - (U_{kl} + U_{tl} + U_{pu} + U_l), \quad t > t_{0l}, \quad I(t_{0l}) = 0, \quad (5)$$

где $L(t)$ – индуктивность нагрузки, $U_f(t)$ и $U_-(t)$ – напряжения на фольге ФРТ и на стенках (U_{kl} , $U_{tl}(t)$, $U_{pu}(t)$ и $U_l(t)$ – на ВЗТ, ПЛ, ПУ и на лайнере). $U_i(t)$ вычисляются по электрическим полям $E_i(t)$ на стенках, возникающим из-за магнитной диффузии (U_{kl} - из экспериментов), $L(t)$ - по смещениям стенок $\delta_i(t)$ и лайнера $R_l - R_{out}(t)$.

Во всех 1D МГД расчетах проводники описываются широкодиапазонными комплексами «уравнение состояния - проводимость».

11. Buyko A.M. Disc Explosive Magnetic Generator and Quasi-Spherical Liner Simulations with a 1D code // Proc. 2006 Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation Related Topics, Nov. 5-10, 2006, Santa Fe, NM, USA. Eds Kiuttu G.F., Turchi P.J., Reinovsky R.E., IEEE, Inc., 2007. P. 287-292.

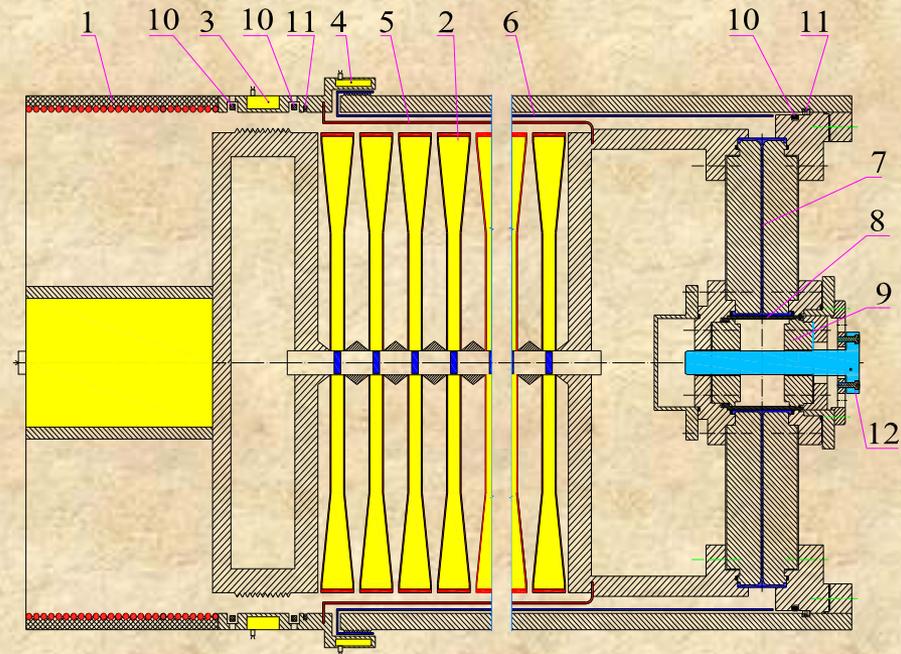
12. А.М.Буйко. “Электровзрывные размыкатели сильноточных взрывомагнитных генераторов” // ПМТФ, т. 56, №1, С. 137-149, 2015.

13. Гаврилов Н.Ф., Иванова Г.Г., Селин В.И., Софронов В.Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАИТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, № 3 (4), 1982. С.11-14

2.2. Уточнения моделирования лайнерной нагрузки

6

В уточненных расчетах устройств ALТ-3 и типа АЛТ-3 полагается $n=13$ (было 11). Лайнерная нагрузка - потери в ней магнитного потока и изменения ее индуктивности - моделируется более адекватно: используется 9 1D МГД задач (было 7) и др.



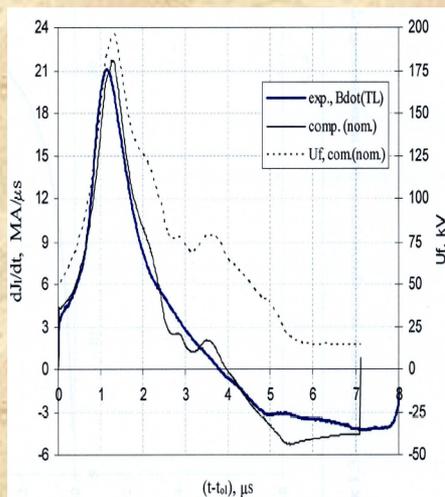
Используются более тонкие лагранжевы сетки - с разрешением до 1 микрона (было до 20-25 микрон Cu-Al проводников). В уточненных расчетах имплозии лайнера учитывается перенос излучения в приближении «вперед-назад», а также электронная теплопроводность; поток излучения через наружную границу лайнера учитывается, но без его влияния на поверхность прилегающего изолятора (возможны Н-отжатый разряд и ответвление в него тока, которые, по оценкам, малы и слабо влияют на имплозию лайнера).

2.3. Расчеты устройств ALT-1,2,3 ($R_I=40\text{мм}$, $R_{in0}/R_{imp} = 4$)

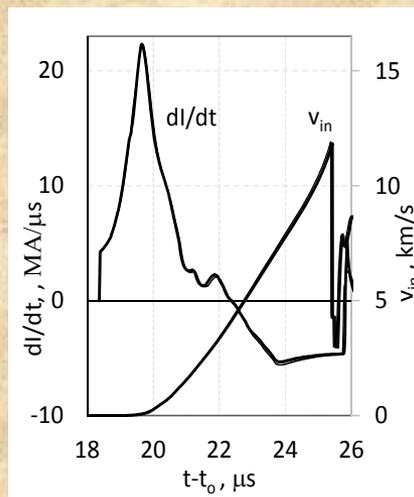
7

Эксперименты ALT-1,2 показали хорошее согласие результатов с прежними расчетами (Рис. 3а). Уточненные и прежние расчеты почти совпадают (Рис.3б).

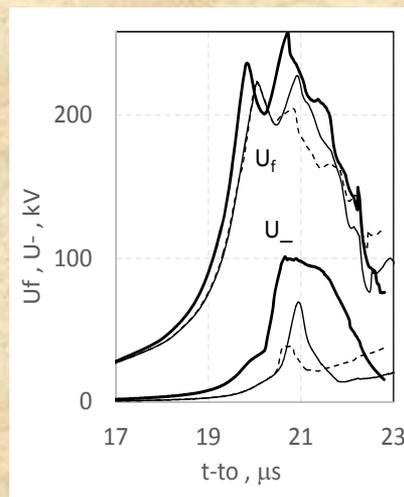
Для устройства ALT-3 (проект) уточненный расчет дает **сильный рост потерь U_-** в нагрузке (Рис.4а), почти тот же ток (63МА при 7.5нГн вместо 64МА при 8.4нГн) и **снижение на 14%** достигаемого безударного **давления** в лайнере (Рис. 4б).



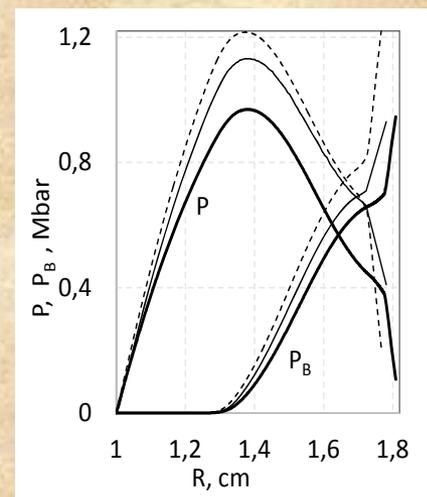
a)



b)



a)



b)

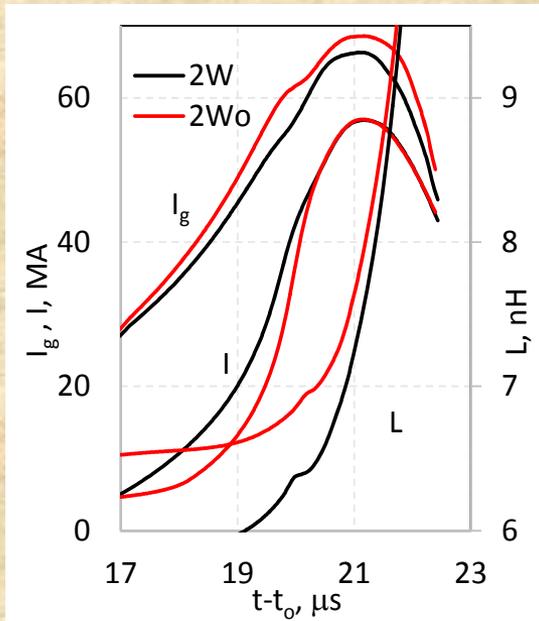
Рис. 3. а) $di/dt(t)$ в эксперименте ALT-2 и в прежнем расчете (жирная и тонкая линии [12]; б) $di/dt(t)$ и скорость Al-лайнера $v_{in}(t)$ в уточненном и прежнем расчетах (жирные и тонкие линии).

Рис. 4. Результаты уточненного, прежнего [4] и расчета [8] устройства ALT-3 (жирные, тонкие линии и пунктир): с) напряжения $U_f(t)$ и $U_-(t)$; д) профили безударного $P(r)$ и магнитного $P_B(r)$ давлений в лайнере при $R_{in}=R_{imp}=1\text{см}$.

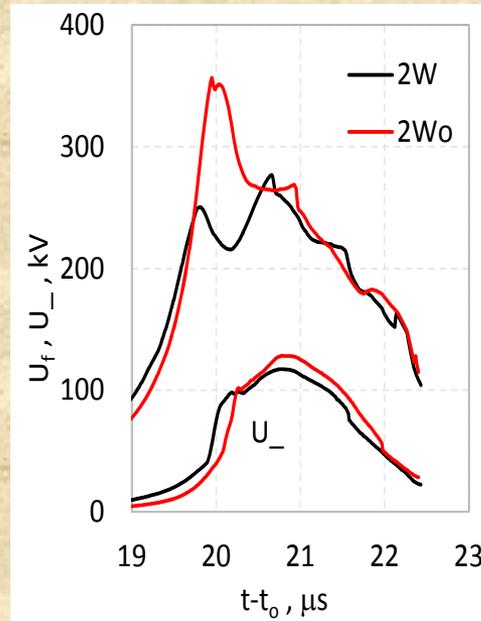
2.4. Расчеты устройства типа ALT-3 с Al-, Al/Cu-, Al/W-лайнерами ($R_f=30\text{мм}$, $\Delta_{Al}=3\text{мм}$, $\Delta_{Cu}=0.34\text{мм}$, $\Delta_W=0.16\text{мм}$, $R_{imp}=1\text{мм}$, $R_{ino}/R_{imp}=27$)

8

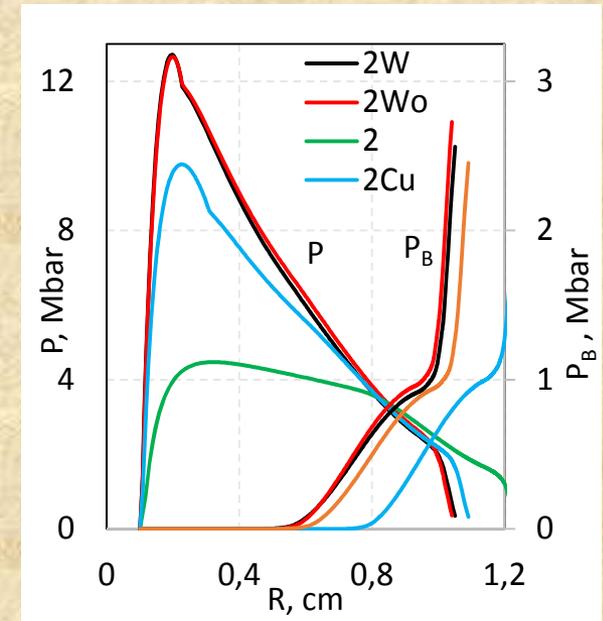
Результаты уточненных расчетов этих устройств существенно отличаются от их расчетов в [8] (Рис. 5а-с, $\Delta_f = 0.12\text{мм}$). Ток в лайнере упал на $\sim 13\%$ (57МА), а достигаемые безударные давления – на $\sim 26\%$: 4.5 – 9.9 – 12.8 Мбар (Al – Cu – W).



а)



б)



с)

Рис. 5. а) токи $I_g(t)$ и $I(t)$ и индуктивность нагрузки $L(t)$; б) $U_f(t)$ и $U_-(t)$; с) профили безударного $P(r)$ и магнитного $P_B(r)$ давлений в лайнере при $R_{in} = R_{imp} = 1\text{мм}$ – в расчетах устройств с Al-, Al/Cu-, Al/W-лайнерами 2 - 2Cu - 2W (2W₀ - расчет устройства без ВЗТ, его не было в [8]).

3.1. Расчеты устройств типа АЛТ-3 с Cu- и Cu/W-лайнерами ($R_f=20\text{мм}$, $\Delta_{Cu}=2.0\text{мм}$; $\Delta_{Cu+W}=1.75+0.25\text{мм}$, $R_{imp} = 1-0.7\text{мм}$)

9

Токи в этих лайнерах достигают 55МА (при $\Delta_f=0.15\text{мм}$, см. Таблицу 1) - на 5МА ниже, чем в Al/W- и Al/Cu-лайнерах. Но из-за меньших радиусов (20мм вместо 30мм) магнитные давления здесь в ~2 раза больше (~4.5Мбар), что приводит к росту в ~1.5 раза достигаемых безударных давлений (Cu - W) : 14.5 - 19.7 Мбар, $R_{in0}/R_{imp}=26$ и 16.1-12.3 Мбар, $R_{in0}/R_{imp}=18$ (последние существенно превышают достигаемые давления в Al/Cu- и Al/W-лайнерах: 9.9-12.8 Мбар, $R_{in0}/R_{imp} = 27$).

Таблица 1. Результаты расчетов устройства с Cu, Cu/W лайнерами ($R_{in0}/R_{imp} = 18-26$).

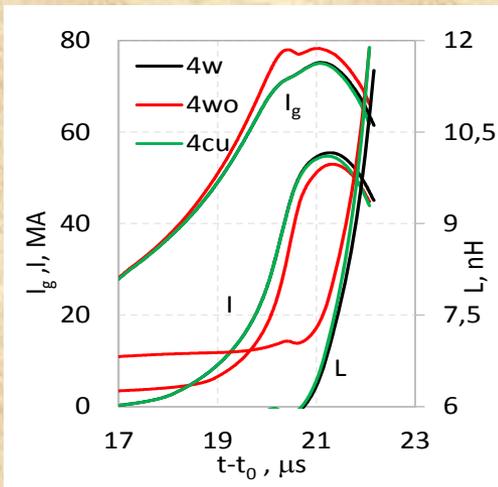
№	Δ_f mm	U_{0l} kV	I_g MA	$U_{f1} - U_{f2}$ kV	U_- kV	I MA	L nH	B MG	P_B Mbar	P_{ex} Mbar	P_{max} Mbar	V_{max} km/s
2w	0.12	6	62	263-298	117	52	7.9	10.7	4.58	15.7-19.0	15.7-19.0	25-27
4w	0.15	6	75	351-279	131	55	7.0	10.5	4.41	16.1-19.5	16.1-19.7	26-28
2cu	0.12	6	62	265-304	114	51	8.0	10.8	4.67	-	11.6-13.5	28-30
4cu	0.15	6	75	352-283	131	55	7.0	10.6	4.49	-	12.3-14.5	30-33
2w ₀	0.12	0	63	385-375	117	49	9.2	11.0	4.84	11.8-13.6	11.9-14.1	21-23
4w ₀	0.15	0	78	452-295	137	53	8.0	10.9	4.75	14.4-17.6	14.6-17.6	23-25

Обозначения в таблице 1: I_g , U_{f1} и U_{f2} , U_- - максимумы тока ДВМГ, напряжений на ФРТ (1-й и 2-ой пики) и на стенках нагрузки; I и L – максимум тока и соответствующая ему индуктивность нагрузки; B и P_B - наибольшие магнитное поле и магнитное давление в лайнере; P_{ex} , P_{max} и V_{max} – параметры внутреннего слоя лайнера: давления на наружной поверхности и внутри слоя и скорость слоя при $R_{in} = R_{imp} = 1.0-0.7\text{мм}$

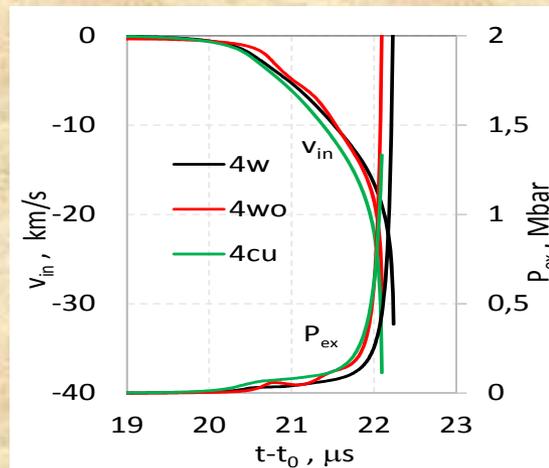
3.2. Результаты для устройств с Cu-, Cu/W- лайнерами

($\Delta_f=0.15\text{мм}$; $R_f=20\text{мм}$, $\Delta_{Cu}=2.0\text{мм}$, $\Delta_{Cu+W}=1.75+0.25\text{мм}$; $R_{imp}=0.7\text{мм}$, $R_{in0}/R_{imp}=26$)

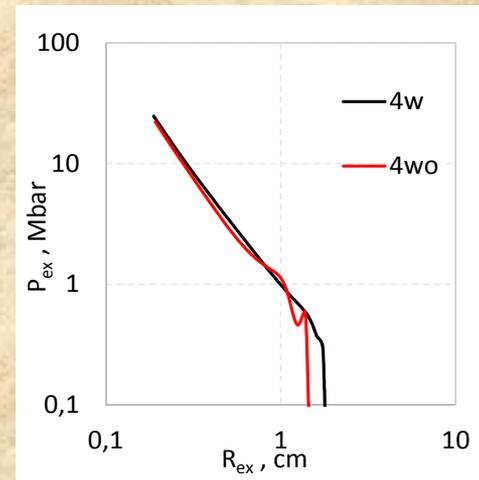
a)



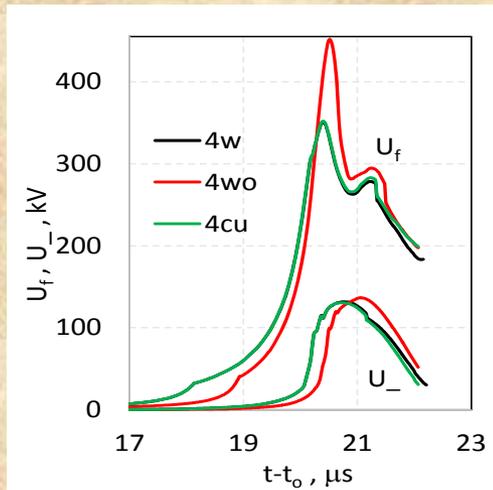
c)



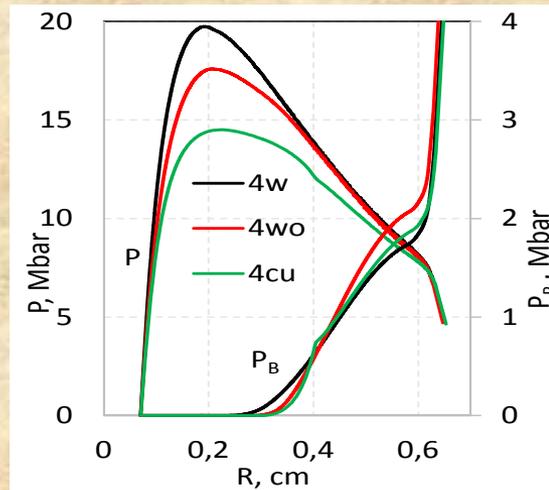
e)



b)



d)



f)

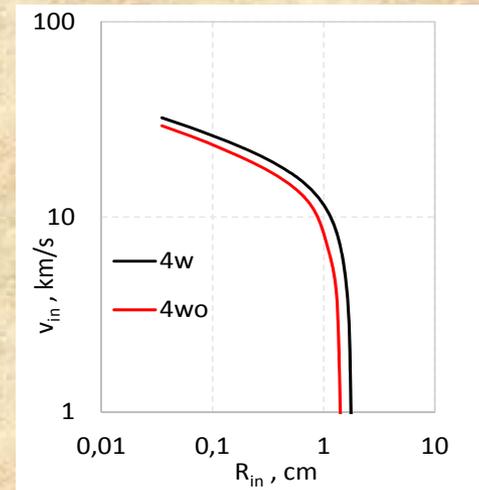


Рис. 6. a) токи $I_g(t)$ и $I(t)$ и индуктивность нагрузки $L(t)$; b,c) $U_f(t)$ и $U_-(t)$, $P_{ex}(t)$ и $v_{in}(t)$; d,e,f) профили безударного $P(r)$ и магнитного $P_B(r)$ давлений в лайнере, $(P_{ex}-R_{ex})$ и $(v_{in}-R_{in})$ диаграммы наружной и внутренней границ внутреннего слоя лайнера - в конце имплозии ($R_{in}=R_{imp}=0.7\text{мм}$).

3.3. Возможности устройств типа ALT-3 и параметры имплозии Cu- и Cu/W- лайнеров

($R_f=20\text{мм}$, $\Delta_{Cu}=2.0\text{мм}$; $\Delta_{Cu+W}=1.75+0.25\text{мм}$, $R_{imp} = 1-0.7\text{мм}$, $R_{in0}/R_{imp}=18-26$)

При устранении ВЗТ - существенное упрощение конструкции - достигаемые давления снижаются не сильно, на 1.5-5Мбар, но первые пики напряжения на ФРТ существенно растут, на 100-120кВ.

Уменьшая толщину Cu-фольги с 0.15 до 0.12мм, можно получить почти те же давления, но при меньших на 90кВ первых пиках напряжения на ФРТ.

Давления $P_{ex}(t) < 0.4\text{Мбар}$ на наружную поверхность исследуемых слоев лайнеров имеют двухволновую структуру, которая влияет на скорость $v_{in}(t)$ их внутренней границы и наиболее выражена в устройствах без ВЗТ.

К концу имплозии ($P_{ex} - R_{ex}$) и ($v_{in} - R_{in}$) диаграммы указывают на кумуляцию ($P_{ex} \sim (R_{ex})^{-2.0}$ и $v_{in} \sim (R_{in})^{-0.2}$), - что может снизить точность расчетного анализа роста скоростей лайнеров $v_{in}(t)$, необходимого для изучения изэнтроп материалов при наиболее высоких достигаемых давлениях.

4. Заключение

1. Представлены методика расчетов устройств типа ALT и влияние уточнений расчетов их нагрузки на параметры рассмотренных ранее устройств ALT-1,2 и проектов устройства ALT-3 с лайнерами:

$$R_f=40\text{мм}, \Delta_{Al}=3\text{мм}, R_{ino}/R_{imp} \sim 4;$$

$$R_f=30\text{мм}; \Delta_{Al}=4.14\text{мм}, \Delta_{Al+Cu(W)} = 3.0 + 0.34(0.16) \text{ мм}, R_{ino}/R_{imp} = 27.$$

2. Рассмотрены устройства типа ALT-3 с Cu- и Cu/W-лайнерами: ($R_f=20\text{мм}, \Delta_{Cu}=2.0\text{мм}; \Delta_{Cu+W} = 1.75 + 0.25\text{мм}; R_{imp} = 1.0-0.7 \text{ мм}, R_{ino}/R_{imp} = 18-26$).

Токи в этих лайнерах могут достигать 55МА (толщина Cu-фольги 0.15мм), а магнитные давления 4.5Мбар, - что дает возможность получать безударные давления в меди и вольфраме до 15 и 20 Мбар ($R_{ino}/R_{imp}=26$).

Давления $P_{ex}(t) < 0.4\text{Мбар}$ на наружную поверхность исследуемых слоев лайнеров имеют двухволновую структуру, которая влияет на скорость $v_{in}(t)$ их внутренней границы и наиболее выражена в устройствах без ВЗТ.

В устройствах без ВЗТ достигаемые давления снижаются не сильно, но пики напряжения на ФРТ растут существенно - на 100-120кВ.

При толщине Cu-фольги 0.12мм можно получать почти те же давления, но при существенно меньших пиках напряжения на ФРТ - на 90кВ.

3. Приведенные результаты могут представлять интерес для исследований изэнтропического сжатия материалов до давлений 20 Мбар – при магнитной имплозии цилиндрических лайнеров в экспериментах с ДВМГ диаметром 0.4м.

**СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ**