

# РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОГО УСКОРЕНИЯ ПЛОСКИХ УДАРНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

## SIMULATION OF THE MAGNETICALLY ACCELERATED FLAT STRIKERS USING MAGNETOCUMULATIVE GENERATORS

*Ю. В. Власов, А. А. Агапов, А. С. Борискин, В. А. Демидов, Н. В. Егоров, С. Н. Голосов, П. Б. Репин*  
*Y. V. Vlasov, A. A. Agapov, A. S. Boriskin, V. A. Demidov, N. V. Egorov, S. N. Golosov, P. B. Repin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Подбирались параметры степенной зависимости тока от времени для магнитного ускорения пластин сечением  $5 \times 5 \text{ см}^2$  различной толщины до заданной скорости 10 км/с. При выборе параметров импульса тока учитывалось, что сторона пластины, противоположная той, на которую воздействует магнитное давление, перед соударением с мишенью должна оставаться в твердом состоянии и не должна быть возмущена гидродинамическими неустойчивостями. Параметры импульса тока находились путем решения системы уравнений, описывающих указанные выше условия и ограничения. На основе этих оценок подбирались взрывомагнитные источники, которые могут обеспечить требуемый ток.

The parameters of the power time dependence of current were selected for the plates magnetic acceleration with a  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  cross-section of different thicknesses up to the fixed velocity of 10 km/s. At the choice of the current pulse parameters, it was considered that the plate side opposite to the side affected by the magnetic pressure should be kept in the solid state before the collision with a target and it should not be perturbed by the hydrodynamic instabilities. The current pulse parameters were found by means of the solution of a system of equations that describes the conditions and limits stated above. The magneto-cumulative sources which can provide required current were selected based on these conclusions.

### Введение

Одним из способов определения параметров уравнений состояния веществ является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней пластины, движущейся со скоростью нескольких километров в секунду. Ускорение пластин до таких скоростей можно выполнить либо взрывным [1], либо электромагнитным [2] способами. Преимуществом электромагнитного способа ускорения является формальное отсутствие ограничения на конечную скорость пластины, возможность использования более широких диагностических средств и сохранения образца после опыта, а также отсутствие на нем следов дискретности инициирования взрывчатого вещества (ВВ).

### Оценка параметров импульса тока

Обычно предполагается, что импульс тока задан, и требуется определить движение пластины. Рассмотрим обратную задачу: при каком импульсе тока пластина заданных размеров из заданного материала к моменту  $t_k$  достигнет заданной скорости. При этом необходимо учитывать, что сторона пластины, противоположная той, на которую воздействует магнитное давление, перед соударением с мишенью должна оставаться в твердом состоянии и не должна быть возмущена гидродинамическими неустойчивостями. Для обеспечения требуемой точности физических измерений толщина пластин должна быть не менее 0,1 см [3].

Для того чтобы пластина перед соударением с мишенью оставалась в твердом состоянии достаточно, чтобы магнитное поле к этому моменту не проникло сквозь нее. Ускорение пластины в кон-

денсированном состоянии устойчиво при прохождении ей нескольких своих толщин [3].

Зависимость тока от времени возьмем в виде степенной функции  $I(t) = I_{\max}(t/t_k)^\alpha$ . Используя эту зависимость, можно решить задачу в явном виде. Подберем параметры  $I_{\max}$ ,  $t_k$  и  $\alpha$  этой зависимости для ускорения пластины сечением  $5 \times 5 \text{ см}^2$  заданной толщины  $\delta$  к моменту  $t_k$  окончания нарастания тока до заданной скорости  $v_k = v_{\text{треб}} = 10 \text{ км/с}$ . При этом смещение  $x_k$  пластины к моменту  $t_k$  должно быть равным  $N_{\max}\delta$ , где  $N_{\max} = 4$  – заданное число, а толщина скин-слоя  $s_k$  к этому моменту должна быть равна некоторой части  $q$  толщины пластины  $s_k = q\delta$  (далее считаем, что  $q = 1$ ). Значения  $v_k = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{k^2 F_k}{b^2 \gamma \delta}$  и  $x_k = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{k^2 S_k}{b^2 \gamma \delta} = \frac{v_k S_k}{F_k}$  вычислим и

решения уравнения движения пластины под действием магнитного поля  $H(t) = kI(t)/b$ . Здесь

$$F_k = \int_0^{t_k} I^2(t) dt \sqrt{b^2 - 4ac} \text{ – интеграл действия тока}$$

$$\text{к моменту } t_k, S_k = \int_0^{t_k} F(t) dt = \int_0^{t_k} dt \int_0^t I^2(\xi) d\xi \text{ – пс}$$

вторной интеграл действия тока к этому моменту,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $b$  – плотность материала пластины, ее толщина и ширина,  $k$  – коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного поля на поверхности пластины по сравнению с  $I/b$  из-за краевых эффектов [4]. Значение для толщины скин-слоя при нелинейной диффузии  $s_k = f \cdot \frac{H(t_k)}{H_c} \sqrt{\frac{\rho_0 t_k}{\mu_0}}$  вычислим:

$$\text{по формуле из [5] при } f = 1. \text{ Здесь } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/л} \text{ – магнитная постоянная, } \rho_0 \text{ – удельное сопротивление материала пластины при нормальных условиях, } H_c \text{ – поле, при котором электропроводность вещества уменьшается до половины своего первоначального значения (критическое поле).}$$

Параметры импульса тока найдем путем решения системы трех уравнений  $v_k = v_{\text{треб}}$ ,  $x_k = N_{\max}\delta$ ,  $s_k = q\delta$ , описывающих указанные выше условия и ограничения. Расписывая эту систему в явном виде и решая ее относительно неизвестных

$$I_{\max}, t_k \text{ и } \alpha, \text{ получим: } \alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu_0^2 q^2 H_c^2 \delta}{2\rho_0 v_{\text{треб}} \gamma} - 1 \right)$$

$$t_k = \frac{2N_{\max}\delta}{v_{\text{треб}}} (\alpha + 1), I_{\max} = \frac{v_{\text{треб}} b}{k} \sqrt{\frac{\gamma(2\alpha + 1)}{\mu_0 N_{\max} (\alpha + 1)}}$$

Оценки по этим формулам показали, что для ускорения медных пластин требуется источник, способный формировать импульс тока  $\sim 30 \text{ МА}$  с

длительностью от 2 до 30 мкс. Для ускорения алюминиевых пластин требуемый ток уменьшается до  $\sim 15 \text{ МА}$  (рис. 1). Результаты магнитогидродинамических (МГД) расчетов подтверждают данные оценки, а также позволяют уточнить глубину проникновения магнитного поля в проводник и распределение удельной тепловой энергии (либо температуры) по его толщине (рис. 2).

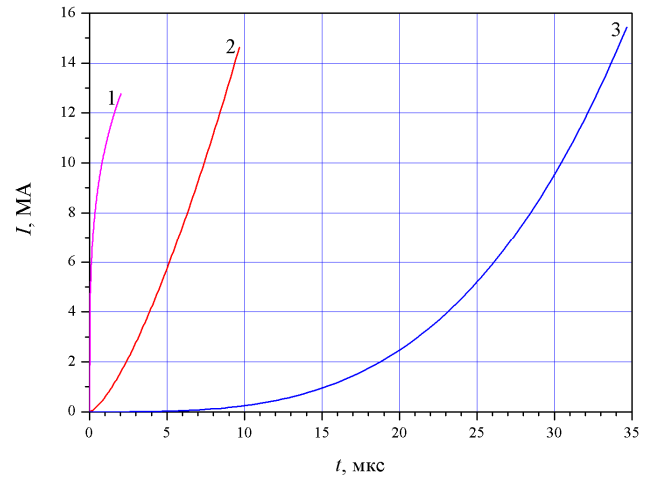


Рис. 1. Зависимость тока от времени для ускорения пластины из алюминия толщиной 0,2 см (1), 0,5 см (2) и 1 см (3) до скорости 10 км/с при ее смещении, равном четырем толщинам, и толщине скин-слоя, равном толщине пластины и  $k = 1$

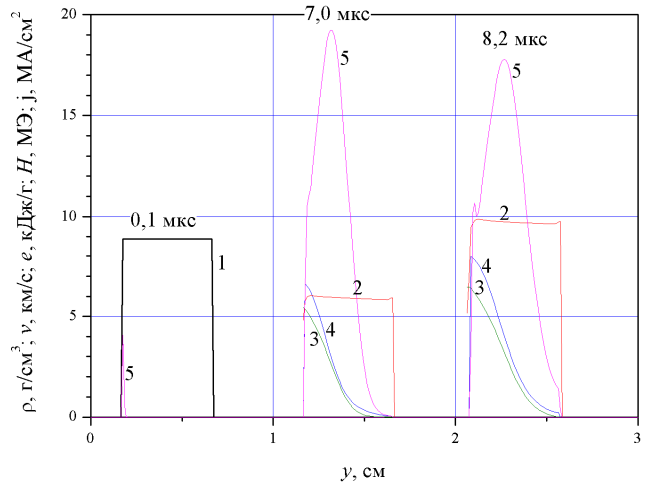


Рис. 2. Расчетные положения медной пластины толщиной 0,5 см при ее ускорении степенным импульсом тока с параметрами:  $I_{\max} = 26 \text{ МА}$ ,  $t_k = 8,3 \text{ мкс}$  и  $\alpha = 1,07$  и распределения физических величин по толщине пластины через 0,1 мкс, 7,0 мкс и 8,2 мкс после начала воздействия магнитного давления: 1 – плотность, 2 – скорость, 3 – напряженность магнитного поля, 4 – удельная внутренняя энергия, 5 – плотность тока

Если предполагать, что передающая линия к узлу ускорения пластин аналогична использованной в устройстве [6] для запитки одновиткового соленоида (рис. 3), то индуктивность нагрузки составит 20–30 нГн. Импульсы тока с такими параметрами в таких нагрузках можно получить с помощью взрывомагнитных генераторов (ВМГ) [7]. Наиболее часто используются два типа ВМГ: спиральные и дисковые (ДВМГ). ДВМГ могут обеспечить запас по току примерно в 2 раза по сравнению с требуемыми значениями, что позволит использовать коммутацию тока для сокращения длительности импульса. Недостаток ДВМГ – сложность конструкции: для их запитки требуется предусилитель – спиральный ВМГ. Еще более сложным устройством является ДВМГ с размыкателем тока. Поэтому вначале исследовались возможности устройств на основе спиральных генераторов.

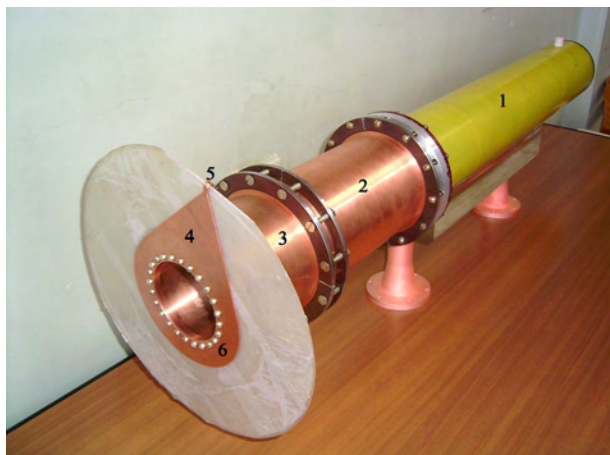


Рис. 3. Внешний вид взрывомагнитного устройства [6] для запитки одновиткового соленоида. 1 – спиральный генератор типа ВМГ-100; 2 – размыкатель тока, 3 – коаксиальная передающая линия, 4 – шинная передающая линия, 5 – одновитковый соленоид, 6 – переход от коаксиальной к шинной линии

### Устройство на основе спирального ВМГ

Ток  $\sim 15$  МА в нагрузке  $\sim 60$  нГн с характерным временем нарастания (в  $e$  раз на конечной стадии)  $\sim 30$  мкс можно получить с помощью спирального генератора типа ВМГ-240 [7]. Тем не менее, расчеты с учетом роста индуктивности нагрузки и спада магнитного давления при разлете пластин показали, что этот ВМГ слишком тихходный для ускорения пластин до скоростей  $\sim 10$  км/с при заданных ограничениях на смещение и толщину скин-слоя, а его конечный ток слишком

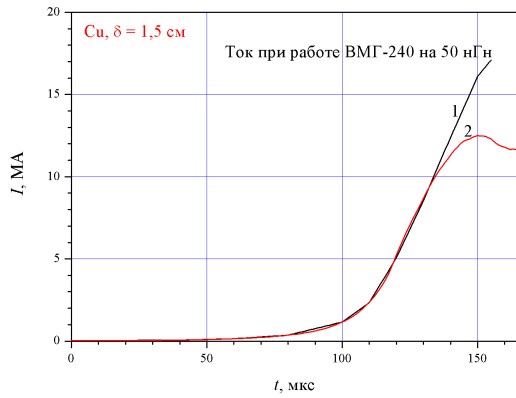
мал для использования коммутации. В то же время ВМГ-240 может обеспечить ускорение пластин из алюминия до скоростей  $\sim 4$  км/с, а из меди – до 3 км/с (рис. 4) что представляет интерес, как для отработки технологии, так и для получения физических данных ввиду относительной простоты устройства.

### Устройство на основе ДВМГ с размыкателем тока

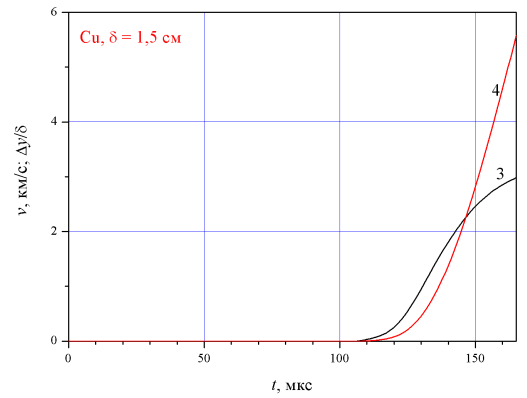
Согласно оценкам по прямоугольному импульсу тока (грубое приближение для тока в нагрузке индуктивного накопителя после коммутации), для ускорения медных пластин сечением  $5 \times 5$  см<sup>2</sup> до скорости 10 км/с при заданных ограничениях требуется ток 21 МА. Для ускорения пластин из алюминия при тех же ограничениях требуется ток 12 МА. Длительность импульса тока пропорциональна толщине пластин. При этом, чтобы магнитное поле не проникало сквозь пластины к моменту окончания воздействия импульса тока, толщина медных пластин должна быть не менее 0,1 см. Длительность импульса тока для пластины такой толщины равна 0,8 мкс. Для ускорения пластин из алюминия до скорости 10 км/с требуется ток 12 МА, толщина пластин должна быть не менее 0,08 см, а длительность импульса тока для пластины такой толщины равна 0,65 мкс.

Такие импульсы тока можно получить при коммутации тока дисковых ВМГ. Поэтому рассматривалась возможность ускорения пластин током, полученным при коммутации тока многоэлементных дисковых генераторов и последующего дожатия магнитного потока после коммутации. Работа ДВМГ в данном режиме исследовалась ранее на примере коммутации тока двухэлементного ДВМГ диаметром 400 мм взрывным размыкателем тока, расположенным над дисковыми элементами [8, 9].

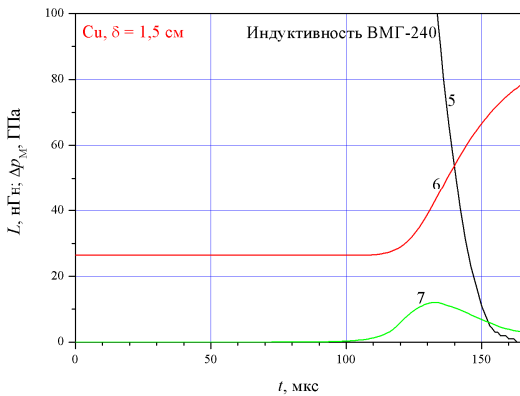
Рассмотрено две известные конструктивные схемы ДВМГ с размыкателем [9]: размыкатель (взрывной или электровзрывной) расположен над дисковыми элементами (рис. 5), и взрывной размыкатель (ВРТ) расположен вне объема ДВМГ (рис. 6). Экспериментально проверена возможность синхронного подрыва до 25 дисковых зарядов [7], поэтому в расчетах количество дисковых элементов  $n$  в устройстве не превышало 25. Зависимость сопротивления ВРТ от времени считалась известной из ранее проведенных экспериментов.



Ток. 1 – работа ВМГ-240 на 50 нГн [7], 2 – расчет



3 – скорость, 4 – смещение в толщинах пластины



5 – индуктивность ВМГ, 6 – индуктивность нагрузки ВМГ, 7 – разность магнитных давлений

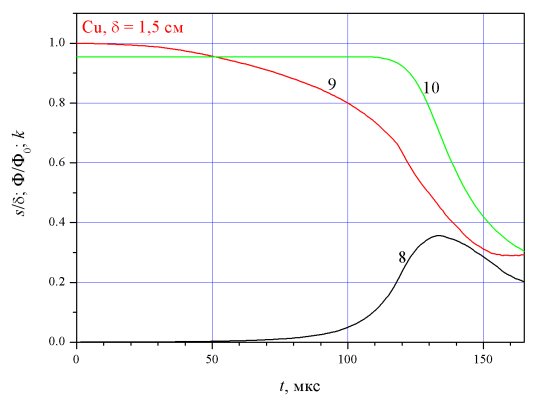
8 – толщина скин-слоя в толщинах пластины, 9 – коэффициент сохранения магнитного потока, 10 – коэффициент  $k$ 

Рис. 4. Результаты расчета ускорения медных пластин толщиной 1,5 см и шириной 5 см

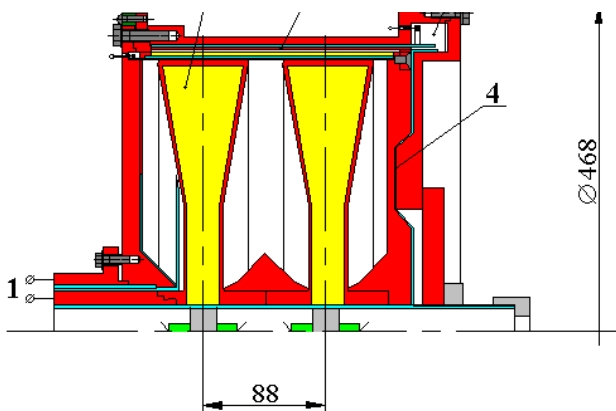


Рис. 5. ДВМГ с размыкателем тока, расположенным над дисковыми элементами. 1 – электроды от спирального ВМГ, 2 – дисковый ВМГ, 3 – ВРТ, 4 – замыкающий ключ, 5 – нагрузка

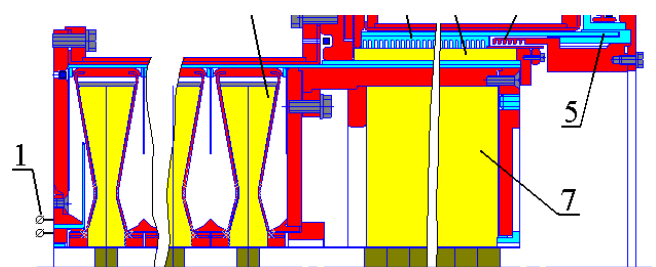


Рис. 6. ДВМГ с размыкателем, расположенным вне объема генератора. 1 – электроды от спирального ВМГ, 2 – дисковый ВМГ, 3 – ребристая преграда ВРТ, 4 – замыкающий ключ, 5 – нагрузка, 6, 7 – заряды ВВ

Расчеты показали, что, используя  $n$ -элементный ДВМГ с зарядами взрывчатого вещества (ВВ) диаметром 240 мм (ДВМГ240) [7] с размыкателем тока, не удастся достигнуть требуемой скорости при заданных ограничениях даже для пластин из алюминия.

Используя  $n$ -элементный ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм (ДВМГ480) [7] с ВРТ, расположенным над дисками, удастся достигнуть требуемой скорости как для алюминиевых (при  $n = 5$ ), так и для медных пластин (при  $n = 15$ , рис. 7).

3 мм требуемая скорость в таком устройстве обеспечивается при  $n = 20$ , токе запитки ДВМГ480, равном 9 МА, и коммутации тока с линейной плотностью 0,22 МА/см (рис. 8), что не выходит за пределы достижимых значений этих величин.

### Заключение

Проведенные расчеты показали, что спиральные ВМГ слишком тихоходны для ускорения пластин до скоростей  $\sim 10$  км/с при заданных ограничениях на смещение и толщину скин-слоя, а их конечный ток слишком мал для использования коммутации. Тем не менее, спиральный ВМГ типа ВМГ-240 может обеспечить разгон пластин из алюминия до скоростей  $\sim 4$  км/с, а из меди – до 3 км/с, что может представлять интерес, как для отработки технологии, так и для получения физических данных ввиду относительной простоты устройства. Для ускорения пластин до скоростей  $\sim 10$  км/с необходимо использовать ДВМГ с размыкателями тока.

Рассмотрено две известные конструктивные схемы ДВМГ с размыкателем. Расчеты показали, что, используя ДВМГ240 с размыкателем, не удастся достигнуть требуемой скорости при заданных ограничениях даже для пластин из алюминия. Используя ДВМГ480 с размыкателем, можно достигнуть требуемой скорости как для алюминиевых (при количестве дисков  $n = 5-10$ ), так и для медных пластин (при  $n = 15-20$ ).

Полученные результаты можно рассматривать в качестве исходных данных для разработки редакции эксперимента по ускорению плоских пластин до скоростей  $\sim 10$  км/с, в рамках которой необходимо будет выполнить двумерные МГД расчеты применительно к конкретному устройству.

### Список литературы

1. Трунин Р. Ф. Сжимаемость металлов при высоких давлениях ударных волн // Высокие плотности энергии: Сборник научных трудов. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 1997. С. 253–270.
2. Lemke R. W., Knudson M. D., Harjes C. H., Davis J. P., Bliss D. E., Pointon T. D. and Mehlhorn T. A. Shockless acceleration of flyer plates at multimegabar magnetic pressures on the Z-machine / In: Megagauss X // Ed. M. von Ortenberg. – Berlin: Humboldt University at Berlin. 2005. P. 403–405.
3. Ивановский А. В. Высокоскоростные плоские ударники, ускоряемые током взрывом магнит-

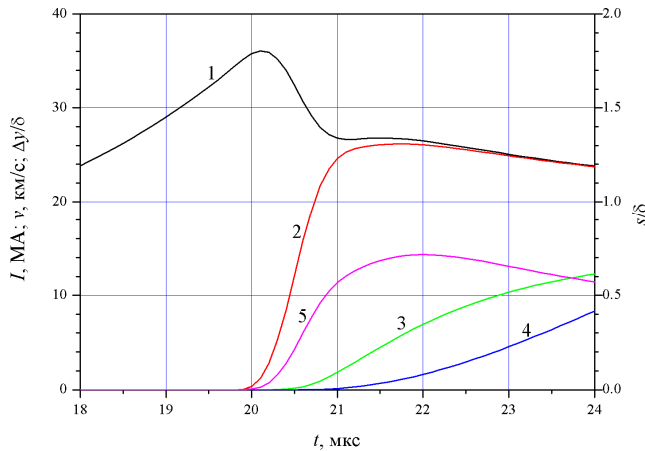


Рис. 7. Расчет ускорения пластин из меди толщиной 3 мм током 15-элементного ДВМГ480 с ВРТ над дисковыми элементами. 1, 2 – ток ДВМГ и ток в нагрузке, 3, 4 – скорость пластины и отношение смещения пластины к ее толщине, 5 – отношение толщины скин-слоя к толщине пластины

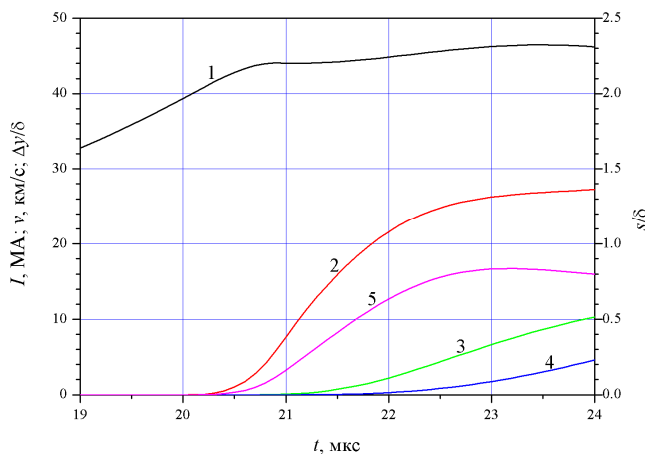


Рис. 8. Расчет ускорения пластин из меди толщиной 3 мм импульсом тока 20-элементного ДВМГ480 с ВРТ вне объема ДВМГ. Обозначения те же, что и на рис. 7

Используя 10-элементный ДВМГ480 с ВРТ вне объема ДВМГ, также удастся достигнуть требуемой скорости для алюминиевых пластин толщиной 2 мм. Для медных пластин толщиной

ных генераторов / В кн.: Труды Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» 14-18 марта 2005 г. // Под. ред. доктора технических наук А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2005. С. 506–511.

4. Pierre-Louis Hereil, Gilles Avrillaid. GEPI: an isentropic compression generator for dynamic material studies / В кн.: Труды Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» 14-18 марта 2005 г. // Под. ред. доктора технических наук А. Л. Михайлова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2005. С. 659–665.

5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Пер. с англ. М.: Мир. 1972. 391 С.

6. Boriskin A. S., Brodsky A. Ya., Vlasov Yu. V., Golosov S. N., Demidov V. A., Dimant Ye. M., Kazakov S. A., Markevtsev I. M., Moiseenko A. N.,

Romanov A. P., Selemir V. D., Tatsenko O. M., Filippov A. V., Shapovalov Ye. V. Experimental results on single-turn solenoid powering from helical MCG with current opening switch // In: Megagauss X / Ed. M. von Ortenberg. – Berlin: Humboldt University at Berlin. 2005. P. 49–53.

7. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2012. Том 1. С. 439.

8. Demidov V. A., Demin A. N., Kazakov S. A., Vlasov Yu. V., Yanenko V. A. Disk Explosive Magnetic Generator with Low Risetime in the Load / In: Proceedings of the 12th International Conference on High Power Particle Beams // Ed M. Markovits and J. Shiloh. Haifa. Israel. 1998. P. 588–590.

9. Demidov V. A. Explosive current opening switches // IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 45. No. 12 part 2, December 2017. P. 3356–3363.