

## Модель дискового взрывомагнитного генератора с магнитодинамическим формирова­телем субмикросекундного импульса тока в лайнерной нагрузке

© А.А. Базанов, А.В. Ивановский, В.Ш. Шайдуллин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: aab@elph.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 20 сентября 2013 г.)

Рассмотрена модель дискового взрывомагнитного генератора диаметром 400 мм с начальной энергоемкостью  $\sim 40$  МДж, снабженного совмещенным с ним в едином корпусе кумулятивным обострителем тока и выносным магнитодинамическим размыкателем. Расчетно показано, что указанное устройство способно создавать в динамических нагрузках с конечной индуктивностью  $\sim 10$  нГн импульс тока амплитудой до 20 мА с фронтом нарастания  $\sim 130$  нс, что обеспечивает возможность быстрого обжатия (за время  $\sim 60$  нс) легких лайнеров ( $\sim 20$ – $30$  мг) для целей генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения. Приведены результаты тестирования на соответствие эксперименту расчетной модели магнитодинамического размыкателя, являющегося критическим элементом устройства.

### Введение

В работе [1] авторами рассмотрена возможность применения для коммутации мультимегаамперных импульсов тока магнитодинамических размыкателей (МДР). Принцип их действия основан на использовании эффекта быстрого развития краевых магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей, возникающих под влиянием давления магнитного поля на искусственно вносимых в проводник размыкателя локальных неоднородностях, что приводит к рассечению проводника. При этом расчетное моделирование ограничивалось такими источниками энергии, как конденсаторные батареи (КБ) энергоемкостью 0.5–2 МДж и спиральные взрывомагнитные генераторы (СВМГ) с энергозапасом до 13.5 МДж. Однако анализ указывал на возможность использования МДР для источников энергии с существенно большим энергозапасом, способных генерировать импульсы тока амплитудой в десятки мегаампер. Кроме того, в прежней работе исследовались предельные по быстродействию возможности размыкателя, поэтому не учитывалось влияние динамически возрастающей нагрузки на режим коммутации. Настоящая работа продолжает начатое исследование. В ней рассматривается модель дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) с энергозапасом около 40 МДж, коммутируемого на лайнерную нагрузку. Этот источник, являясь компактным и относительно недорогим (но при этом одноразовым в использовании), по характеристикам сопоставим с такой крупномасштабной установкой, как РВФА-Z, построенной в „Сандийской национальной лаборатории“ США [2] для исследования процессов генерации мягкого рентгеновского излучения при быстром схлопывании оболочек.

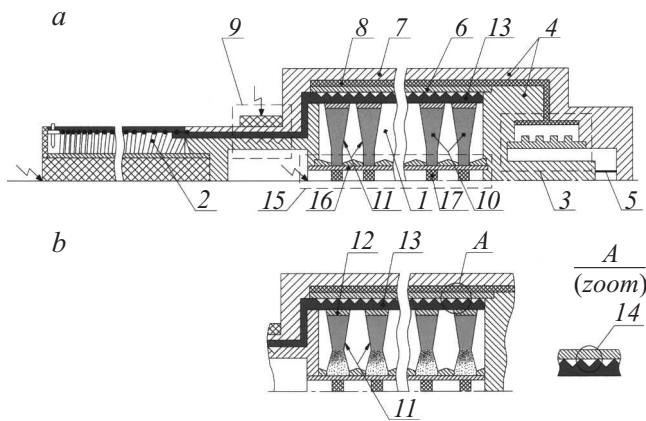
### Описание устройства

Конструктивно-компоновочное исполнение устройства представлено на рис. 1, а. Устройство содержит ДВМГ 1, запитываемый от спирального пре­дусилителя тока 2 (СВМГ), магнитодинамический размыкатель 3, соединенный с ДВМГ коаксиальной передающей линией 4, и лайнерную нагрузку 5. В качестве ДВМГ выбран хорошо известный по публикациям генератор диаметром 400 мм (см., например, [3]). ДВМГ содержит закорачивающий его осесимметричный проводник 6, размыкаемый на завершающей стадии работы ДВМГ. Закорачивающий проводник 6 установлен вблизи наружной цилиндрической стенки 7 ДВМГ и отделен от нее изолятором 8.

Работа ДВМГ осуществляется следующим образом [3]. Введенный от спирального пре­дусилителя 2 в замкнутый контур ДВМГ начальный магнитный поток захватывается контуром ДВМГ при срабатывании взрывного замыкателя 9. Затем синхронно возбуждается процесс распространения радиальной детонации (от внутреннего радиуса к наружному) во взрывчатом веществе (ВВ), заполняющем дисковые элементы 10. Расширяясь, под действием продуктов взрыва торцевые тарели 11 дисковых элементов сжимают магнитный поток в контуре (см. рис. 1, б). Энергия  $E_D$  в контуре нарастает за счет быстрого падения его индуктивности

$$E_D = (\eta\Phi_0)^2/2(L_{nD}(t) + L_D).$$

Здесь  $\Phi_0$  — начальный магнитный поток ДВМГ,  $\eta$  — коэффициент потерь магнитного потока из-за диффузии поля в токопроводящие стенки контура,  $L_{nD}(t)$  — изменение индуктивности контура в процессе его сжатия,  $L_D$  — конечная индуктивность ДВМГ, причем  $L_{nD}(t) \rightarrow 0$



**Рис. 1.** *a* — конструктивно-компоновочное исполнение устройства, *b* — ДВМГ в процессе сжатия магнитного потока.

при росте  $t$ , а  $L_D \ll L_{nD}(0)$ . Когда детонация выходит на утолщенные металлические стенки  $12$  дисковых элементов, они, разгоняясь, ударяют по изолятору  $13$ , имеющему кольцевые угловые проточки  $14$ . В результате в местах расположения угловых проточек формируются кумулятивные струи, разрушающие закорачивающий проводник  $6$ . Накопленная в ДВМГ электромагнитная энергия перебрасывается в МДР  $3$  (происходит переключение тока).

Применение кумулятивного (а не электровзрывного, как часто практикуется [4]) способа размыкания контура ДВМГ позволяет использовать относительно толстый закорачивающий проводник  $6$ , препятствующий диффузии через него магнитного поля и тем самым избежать появления медленно нарастающего предимпульса тока на МДР, способного ухудшить его работу.

Следует отметить, что, хотя взрывные кумулятивные коммутаторы хорошо известны (см., например, [5]), их совмещение в едином устройстве с ДВМГ считалось нецелесообразным, так как кумулятивные участки оказываются фрагментированными по дисковым элементам. Как следствие, их количество на единицу длины разрушаемого проводника сокращается, что должно приводить к уменьшению быстродействия кумулятивного размыкателя из-за снижения скорости нарастания его сопротивления в процессе разрушения проводника. В данном случае, как это следует из работы [1] и изложенных далее результатов расчетного моделирования, к кумулятивному размыкателю тока не предъявляется требование высокого быстродействия. Именно это позволяет совместить взрывной кумулятивный размыкатель с ДВМГ и, тем самым, сэкономить на количестве ВВ. Однако, в принципе, ничто не препятствует устанавливать его отдельно, последовательно с ДВМГ. Это никак не скажется на результатах расчетного моделирования при условии, что индуктивность контура останется неизменной.

## Основные характеристики предусилителя и ДВМГ

Известно, что СВМГ оптимизируют таким образом, чтобы они имели экспоненциальную форму нарастания тока. На практике форма тока в той или иной степени всегда отклоняется от экспоненты по разным причинам: влияние диффузионных потерь магнитного потока [6], влияние нагрузки, конструктивные особенности и т.п. В этой ситуации универсальным способом охарактеризовать быстродействие СВМГ является определение эффективного времени нарастания тока через отношение интеграла тока к квадрату его амплитуды  $(I_{mp})^2$ :

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{2 \int_0^{t_m} I(t)^2 dt}{I_{mp}^2}. \quad (1)$$

Нетрудно убедиться, что для генераторов с идеально экспоненциальной кривой тока это определение совпадает с временем его нарастания в „ $e$ “ раз. Для этого достаточно подставить в (1) выражение (2) для интеграла тока  $J$  „идеального“ СВМГ:

$$J = \int_0^{t_m} \left( I_0 \exp \left[ \frac{t}{\tau_e} \right] \right)^2 dt = \frac{(I_{mp}^2 - I_0^2) \tau_e}{2} \approx \frac{I_{mp}^2 \tau_e}{2}. \quad (2)$$

Здесь  $I_0$  — начальный ток предусилителя,  $\tau_e$  — время нарастания тока в „ $e$ “ раз. Предусилитель обычно запитывается от КБ, причем  $I_0 \ll I_{mp}$ .

Таким образом, при использовании эффективного времени нарастания тока предусилителя интеграл действия тока определяется формулой (2), в которой  $\tau_e = \tau_{\text{eff}}$ .

Интеграл действия тока характеризует степень разрушающего воздействия электромагнитного поля на узлы ДВМГ. Введение магнитного потока не должно вызывать нарушение работы центрального инициирующего узла  $15$ , размещенного вдоль оси ДВМГ в цилиндрической тонкостенной металлической трубе  $16$  (рис. 1, *a*). В работе [7] показано, что критерий устойчивости полых цилиндрических проводников к электродинамическим нагрузкам, создаваемым давлением магнитного поля, имеет вид

$$\frac{1}{2} \mu \int_0^t H(t)^2 dt \leq \Sigma_y \delta \sqrt{\frac{\rho}{Y}}, \quad (3)$$

где  $H(t)$  — напряженность магнитного поля на поверхности проводника,  $\delta$  — его толщина,  $\mu$  — магнитная проницаемость,  $\Sigma_y$  — предел текучести,  $\rho$  — плотность материала проводника,  $Y$  — модуль Юнга. Однако в ДВМГ давление магнитного поля не воздействует непосредственно на трубу узла инициирования. Имеет место опосредованное воздействие: сначала происходит торцевое сдавливание тонкостенных медных тарелок (толщиной 1–2 mm) преимущественно в области внутреннего диаметра  $d$  дисковых элементов. Давление с

тарелей передается на содержащееся между ними ВВ, что может приводить к деформации трубы 16 в местах расположения средств иницирования 17. Как результат — возможное нарушение их работы и вероятность самопроизвольного подрыва ВВ.

Учитывая сказанное, а также то, что  $H(t) = I_P(t)/d$ , критерий (3) следует переписать в форме

$$J = \int_0^{t_m} I_P(t)^2 dt \leq \lambda(\Sigma_y, \delta, \rho, Y)d^2. \quad (4)$$

Здесь  $I_P(t)$  — ток предусилителя,  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности, являющийся функцией, указанных в уравнении (3) постоянных, который также может зависеть от способа соединения дисковых тарелей с угловыми вставками 18. Вид функциональной зависимости в общем случае не совпадает с тем, что следует из уравнения (3). На практике коэффициент  $\lambda$  для каждого исполнения узла иницирования определяют экспериментально.

Напряжение на входе ДВМГ в процессе его запитки не может превышать максимально допустимого значения напряжения предусилителя  $U_{mp}$  (хотя сам по себе многоэлементный ДВМГ, как правило, способен выдерживать на входе большие напряжения, чем предусилитель). При форме нарастания тока, близкой к экспоненциальной, это означает

$$U_{mp} \geq \frac{I_{mp}L_0(d)}{\tau_{\text{eff}}}, \quad (5)$$

где  $L_0(d)$  — начальная индуктивность ДВМГ, зависящая от внутреннего диаметра дисковых элементов (помимо прочих размеров, которые мы считаем фиксированными для выбранного типа ДВМГ).

Выражения (2), (4), (5) позволяют найти максимально допустимый ток  $I_{mp}$  запитки ДВМГ от предусилителя:

$$I_{mp} = \left[ \frac{2U_{mp}\lambda d^2}{L_0(d)} \right]^{1/3}. \quad (6)$$

Учитывая закон сохранения магнитного потока, а также принимая во внимание его частичные потери в процессе компрессии ДВМГ и коммутации двух размыкателей, нетрудно убедиться, что амплитуда импульса тока в нагрузке  $I_{Wm}$  составит

$$I_{Wm} = \frac{\eta\eta_1\eta_2}{L_D + L_C + L_T + L_W} \sqrt[3]{2\lambda [dL_0(d)]^2 U_{mp}^{1/3}}. \quad (7)$$

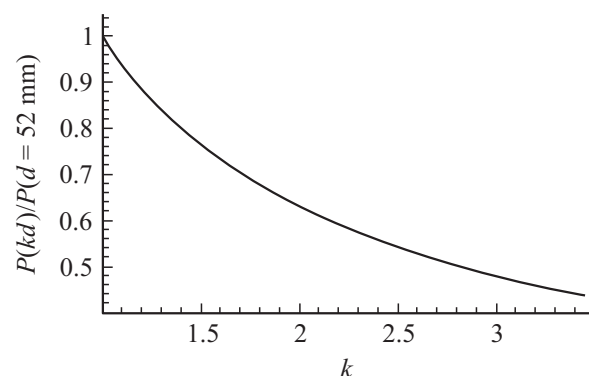
Здесь  $\eta, \eta_1, \eta_2$  — коэффициенты сохранения магнитного потока для ДВМГ, кумулятивного и магнитодинамического размыкателей соответственно,  $L_C$  — индуктивность полости под установку изолятора 8 (рис. 1, а),  $L_T$  — индуктивность передающей линии,  $L_W$  — индуктивность нагрузки, которую на этапе аналитических оценок будем считать постоянной и равной величине,

достигаемой при десятикратном радиальном обжатии лайнера  $L_{Wm}$ .

Поскольку  $L_0(d)$  имеет слабую логарифмическую зависимость от  $d$  (так как геометрия ДВМГ коаксиальна), то, как следует из (7), амплитуда импульса тока в нагрузке  $I_{Wm}$  возрастает с увеличением внутреннего диаметра дисковых элементов примерно пропорционально  $d^{2/3}$ . Это происходит из-за существенного увеличения допустимого значения тока  $I_{mp}$ , вводимого в ДВМГ при возрастании диаметра  $d$ , в силу условия (4) и формулы (6). Предельным является значение  $d$ , соответствующее максимальному значению тока  $I_{mp}$ , который способен генерировать предусилитель (СВМГ) на нагрузку  $L_0(d)$  (т.е. на индуктивность ДВМГ) так, чтобы при этом обеспечивалось условие (5). Формулы (5), (7) устанавливают также влияние электропрочности СВМГ на предельную величину тока  $I_{Wm}$  в нагрузке. Как видно, с ростом  $U_{mp}$  ток возрастает пропорционально  $(U_{mp})^{1/3}$ .

Отметим, что нарушение работы ДВМГ на стадии предварительной запитки возможно не только в случае нарушения критериев (4) и (5), но и подрыва основного заряда ВВ под воздействием давления магнитного поля, а также в случае механического разрыва контактных соединений контура ДВМГ на внутреннем радиусе. Увеличение внутреннего диаметра дисковых элементов способствует снижению всех этих угроз, так как с увеличением  $d$  давление магнитного поля падает. Действительно, магнитное давление  $P \propto H^2 \propto (I_{mp}/d)^2$ , из (6)  $I_{mp} \propto \{d^2/L_0(d)\}^{1/3}$  и, следовательно,  $P \propto \{d \ln(L_0(d))\}^{-2/3}$ . Как указывалось, зависимость  $L_0(d)$  слабо влияет на результат. Кривая относительного падения давления с учетом зависимости  $L_0(d)$  для выбранного типа ДВМГ приведена на рис. 2. Таким образом, увеличение внутреннего диаметра дисков способствует не только увеличению амплитуды тока в нагрузке, но и повышению устойчивости ДВМГ к воздействию ударных электродинамических нагрузок.

Для определения диаметра узла иницирования ДВМГ и количества дисковых элементов, необходимых



**Рис. 2.** Кривая относительного падения предельно допустимого давления магнитного поля на внутреннем диаметре дисковых элементов при его увеличении в  $k$  раз по сравнению с типовым значением  $d = 52 \text{ mm}$ .

для достижения заданной амплитуды импульса тока  $I_{Wm}$  в нагрузку, нужно подставить в систему уравнений (6) и (7) соотношения

$$L_0(d) = nL_e(d), \quad (8)$$

$$L_D = \frac{\mu}{2\pi} n\Delta l \ln \left( \frac{D + 2\delta_1}{D} \right), \quad (9)$$

$$L_C = \frac{\mu}{2\pi} n\Delta l \ln \left( \frac{D + 2\delta_1 + 2\delta_2}{D + 2\delta_1} \right) \quad (10)$$

и решить ее относительно неизвестных параметров  $n$  и  $d$ . Здесь  $n$  — количество дисков,  $L_e(d)$  — индуктивность, приходящаяся на один дисковый элемент ДВМГ,  $\Delta l$  — расстояние между центрами дисков,  $D$  — диаметр дискового элемента,  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — толщины изоляторов 8 и 13 (рис. 1, а) соответственно. Заметим, что в соответствии с законом сохранения магнитного потока при  $n \rightarrow \infty$  ток в нагрузке ограничен величиной  $I_{Wm \max} = L_e I_{mp} \eta / (L_{1D} + L_{1C})$ , где  $L_{1D}$  и  $L_{1C}$  — индуктивности изоляторов 13 и 8 на длине  $\Delta l$  (рис. 1, а). Причем чем больше дисков и меньше их внутренний диаметр  $d$ , тем меньшее значение  $\eta$  имеет генератор из-за возрастания омических потерь в контактных соединениях. Поэтому при ограниченной величине тока предусилителя  $I_{mp}$  не всегда возможно достичь желаемой амплитуды импульса тока в нагрузке сколь велико не было бы количество дисковых элементов ДВМГ. В этом случае система уравнений (6)–(10) не имеет физически значимого решения. Легко убедиться, что аналогичный вывод можно сделать для случая, когда взрывной кумулятивный размыкатель вынесен за пределы ДВМГ.

В расчетной модели использовался предусилитель с выходным током  $I_{mp} = 12.4$  мА. Допустимое напряжение в его контуре и индуктивность передающей линии полагались равными:  $U_{mp} = 33$  кВ,  $L_T = 8$  нН (заметим, что значение  $U_{mp}$  было намеренно занижено, чтобы иметь запас по электропрочности, учитывая „не идеальность“ реального СВМГ, в действительности изоляция витков СВМГ обычно выдерживает напряжение труба-спираль до  $\sim 50$  кВ). Основываясь на реально проектируемых конструкциях лайнерных нагрузок, было принято, что  $L_{Wm} \approx 10$  нН. Исходя из имеющихся работок, толщины изоляторов 13, 8 (рис. 1, а) были взяты равными соответственно  $\delta_1 = 10$  мм,  $\delta_2 = 5$  мм. Расстояние между центрами дисков составляло  $\Delta l = 61.4$  мм, диаметр дискового элемента  $D = 414$  мм. Коэффициент потерь магнитного потока ДВМГ полагался равным  $\eta \approx 0.6$  ([3,8]), значения  $\eta_1 \approx \eta_2 \approx 0.9$ . Параметр  $\lambda$  определялся на основе имевшихся экспериментальных данных. Для типовой конструкции узла инициирования ДВМГ он составляет  $\lambda \approx 3.7 \cdot 10^7$  А<sup>2</sup>с/см<sup>2</sup>.

Предварительные аналитические оценки при указанных выше параметрах системы привели к следующим результатам. Для того чтобы в нагрузке получить импульс тока амплитудой 22 мА, ДВМГ должен иметь

двенадцать дисковых элементов с внутренним диаметром  $d$ , равным 90 мм. Его начальная индуктивность составляет  $L_0 = L_e n = 8.86$  нН12  $\approx 106$  нН, конечная —  $L_D \approx 7$  нН (см. (9)). Индуктивность полости под установку изолятора 8 (рис. 1, а) —  $L_C \approx 3.4$  нН (см. (10)). Ток ДВМГ в момент окончания сжатия контура —  $I_{md} = (I_{mp} L_0 \eta / L_D) \approx 114$  мА.

Оценим предельно допустимое быстродействие взрывного размыкателя, совмещенного с ДВМГ в заданной конфигурации при вышеприведенных параметрах устройства. Известно, что надежная работа взрывного кумулятивного размыкателя обеспечивается, если погонное напряжение  $U_V$  вдоль его длины в процессе коммутации не превышает 6 кВ/см [9] (получение больших напряжений возможно, но усложняет исполнение устройства и повышает риски). Следовательно, должно выполняться условие

$$n\Delta l U_V \geq (L_C + L_T) \left( \frac{dI_S}{dt} \right)_{\max}, \quad (11)$$

где  $I_S(t)$  — ток, переключаемый в МДР. При разрыве контура индуктивного накопителя энергии (ДВМГ) импульс тока, поступающего на вход МДР, с достаточной точностью можно представить в форме

$$I_S(t) = I_{ms} \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{t_f} \right)^2 \right] \right), \quad (12)$$

если считать зависимость сопротивления взрывного размыкателя от времени линейной [1]. В этом случае имеем

$$\left( \frac{dI_S(t)}{dt} \right)_{\max} = \frac{I_{ms}}{t_f} \sqrt{\frac{2}{e}}. \quad (13)$$

В (12) и (13)  $t_f$  — характерное время нарастания тока,  $I_{ms}$  — амплитуда тока, переключаемого в МДР

$$I_{ms} = \frac{I_D L_D \eta_1}{L_D + L_C + L_T}. \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (11), находим

$$t_f \geq \frac{(L_C + L_T) I_D L_D \eta_1}{(L_D + L_C + L_T) n \Delta l U_V} \sqrt{\frac{2}{e}} \approx 0.86 \mu\text{e}. \quad (15)$$

Время  $t_f$  связано со средней скоростью нарастания сопротивления кумулятивного размыкателя  $R_t = \langle \langle \frac{dR}{dt} \rangle \rangle$  соотношением (см. [1])

$$t_f = \sqrt{\frac{2L_G L_T}{(L_G + L_T) R_t}}. \quad (16)$$

Отсюда с учетом (15) имеем

$$R_t = \frac{2L_D L_T}{(L_D + L_T) t_f^2} \leq 9 \frac{\text{м}\Omega}{\mu\text{с}}. \quad (17)$$

Параметр  $t_f$  связан с характерным временем  $\tau_f$  нарастания тока на входе МДР по уровню 0.1–0.9 от максимального значения соотношением  $\tau_f \approx 1.193 t_f$ .

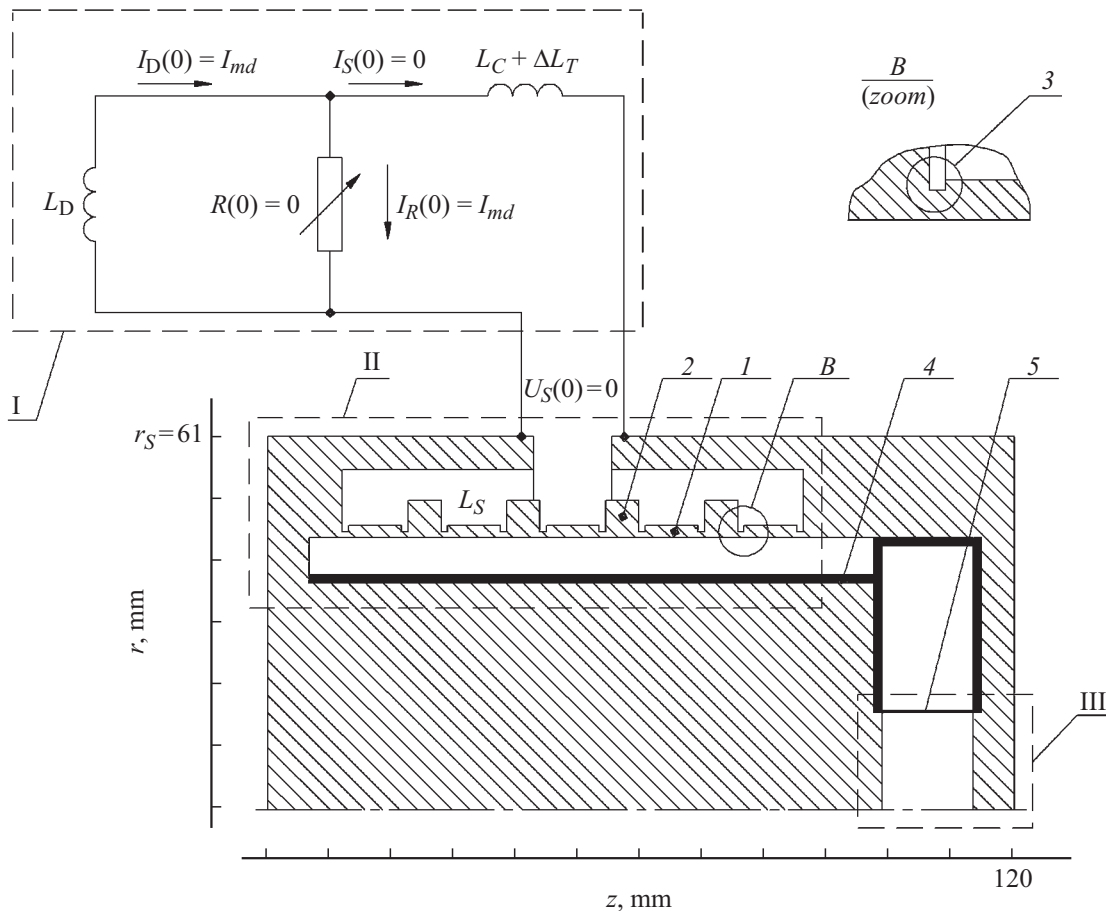


Рис. 3. Расчетная модель устройства.

Выражение (17) дает оценку максимально допустимой скорости нарастания сопротивления кумулятивного размыкателя для данной конкретной конфигурации устройства, при которой он может быть совмещен с ДВМГ (рис. 1) без риска возникновения шунтирующего пробоя. Как показано ниже, указанного быстродействия с запасом хватает для обеспечения эффективной работы МДР.

## Расчетная модель

Расчетная модель устройства представлена на рис. 3. Контур ДВМГ и передающая линия, соединяющая его с МДР, изображены в виде электрической схемы (поз. I). Состояние, показанное на рисунке, относится к начальному моменту времени, за который принимается момент окончания компрессии магнитного потока в ДВМГ (конечная индуктивность  $L_D$ ). Поскольку часть индуктивности передающей линии  $\Delta L_S = 4.4$  нГн является входной индуктивностью МДР, которая автоматически учитывается в МГД расчете, то на схему вынесено значение  $\Delta L_T$  за вычетом этой части, т.е.  $\Delta L_T = L_T - \Delta L_S = 7$  нГн. Считалось, что в процессе работы устройства индуктивность передающих шин  $\Delta L_T$  остается постоянной (возможная деформация шин под

действием давления магнитного поля не принималась во внимание). Конечный ток в контуре ДВМГ варьировал в диапазоне  $I_{md} = I_D(0) = I_R(0) = 103\text{--}125$  мА с целью проверки влияния этого фактора на быстродействие МДР. С этой же целью варьировалась скорость нарастания сопротивления кумулятивного размыкателя тока. Она задавалась линейным приближением  $R(t) = R_t t$ , где коэффициент  $R_t$  изменялся в диапазоне  $1.0\text{--}5.5$  мΩ/μс в соответствии с условием (17) для размыкателя, совмещенного с ДВМГ. Для проверки целесообразности применения выносного взрывного кумулятивного размыкателя один из расчетов был проведен с повышенным значением скорости нарастания сопротивления  $R_t = 13$  мΩ/μс. Во всех расчетах в начальном состоянии сопротивление кумулятивного размыкателя принималось равным нулю ( $R(0) = 0$ ), поэтому ток и напряжение на входе МДР отсутствовали:  $I_S(0) = 0$ ,  $U_S(0) = 0$ .

В расчетной модели предполагалось, что МДР (поз. II) выполнен в виде единого блока с нагрузкой (поз. III). Коммутационный элемент МДР шунтирует передающую линию и представляет собой, как в работе [1], проводник, состоящий из ряда последовательно установленных полых цилиндрических перемычек I (их

пять), разделенных торцевыми перегородками 2. Толщина стенки переемычек 1.3 мм. Они имеют кольцевые проточки 3 по краям размером 0.16 × 0.16 мм для усиления локальных неоднородностей, по которым происходит рассечение проводника. Для предотвращения шунтирования нагрузки продуктами разрушения проводника в передающую линию, соединяющую нагрузку с МДР, установлен изолятор 4.

Динамическая нагрузка  $L_W$  представляет собой цилиндрический лайнер 5, сжимаемый к оси под действием магнитного поля.

Электрическая цепь ДВМГ и кумулятивного размыкателя (контур I на рис. 3) описывалась системой уравнений с сосредоточенными параметрами:

$$\begin{cases} L_D \frac{dI_D(t)}{dt} + R(t)I_R(t) = 0, \\ R(t)I_R(t) = L_T \frac{dI_S(t)}{dt} - U_S(t), \\ \bar{I}_D(t) = \bar{I}_S(t) + I_R(t), \\ R(t) = R_t t, \\ U_S(t) = -\frac{d}{dt} \left( \int_S H_\phi dS \right), \\ I_D(0) = I_{md}, \quad I_R(0) = I_{md}. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь  $U_S(t)$ ,  $I_S(t)$  — напряжение и ток на входе МДР,  $H_\phi$  — напряженность магнитного поля, входящая в систему МГД уравнений, описывающую работу МДР. Отметим, что напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$  имеет только азимутальную составляющую в силу аксиальной симметрии задачи по току.

Для расчета МДР использовалась система уравнений одножидкостной магнитной гидродинамики:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \\ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mathbf{j} \times \mathbf{H}, \\ \rho \left( \frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla q \right) = -P \text{div}(\mathbf{u}) + \frac{j^2}{\sigma}, \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j}, \\ \mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{H}), \\ P = P(T, \rho), \\ q = q(T, \rho), \quad \sigma = \sigma(T, \rho). \end{cases} \quad (19)$$

Здесь  $\rho$  — массовая плотность вещества,  $\mathbf{u}$  — скорость вещества,  $P$  — давление,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  — векторы плотности тока, магнитного и электрического полей,  $\sigma$  — электрическая проводимость,  $q$  — удельная энергия вещества (энергия в единице массы).

В расчетах были использованы уравнение состояния меди и зависимость ее проводимости от температуры и плотности из работы [10].

В силу ограниченности расчетного шага и малой толщины лайнера (микрон) по сравнению с размерами

МДР задача о его движении не могла быть решена в едином МГД приближении для всего устройства (это потребовало бы неприемлемо большого расчетного времени). Поэтому изменение положения лайнера (контур III на рис. 3) определялось отдельно на каждом расчетном шаге с использованием простейшего уравнения движения:

$$\frac{d^2 r(t)}{dt^2} = -\frac{I_W(t)^2}{mr(t)} \quad (20)$$

с начальными условиями, которые брались из МГД расчета. Здесь  $r_0$ ,  $r(t)$  — начальный и текущий радиусы лайнера соответственно,  $m$  — погонная масса лайнера. Такой подход представляется вполне оправданным, так как в данном случае исследовались закономерности формирования импульса тока, а не эффекты, связанные с процессом схлопывания лайнера.

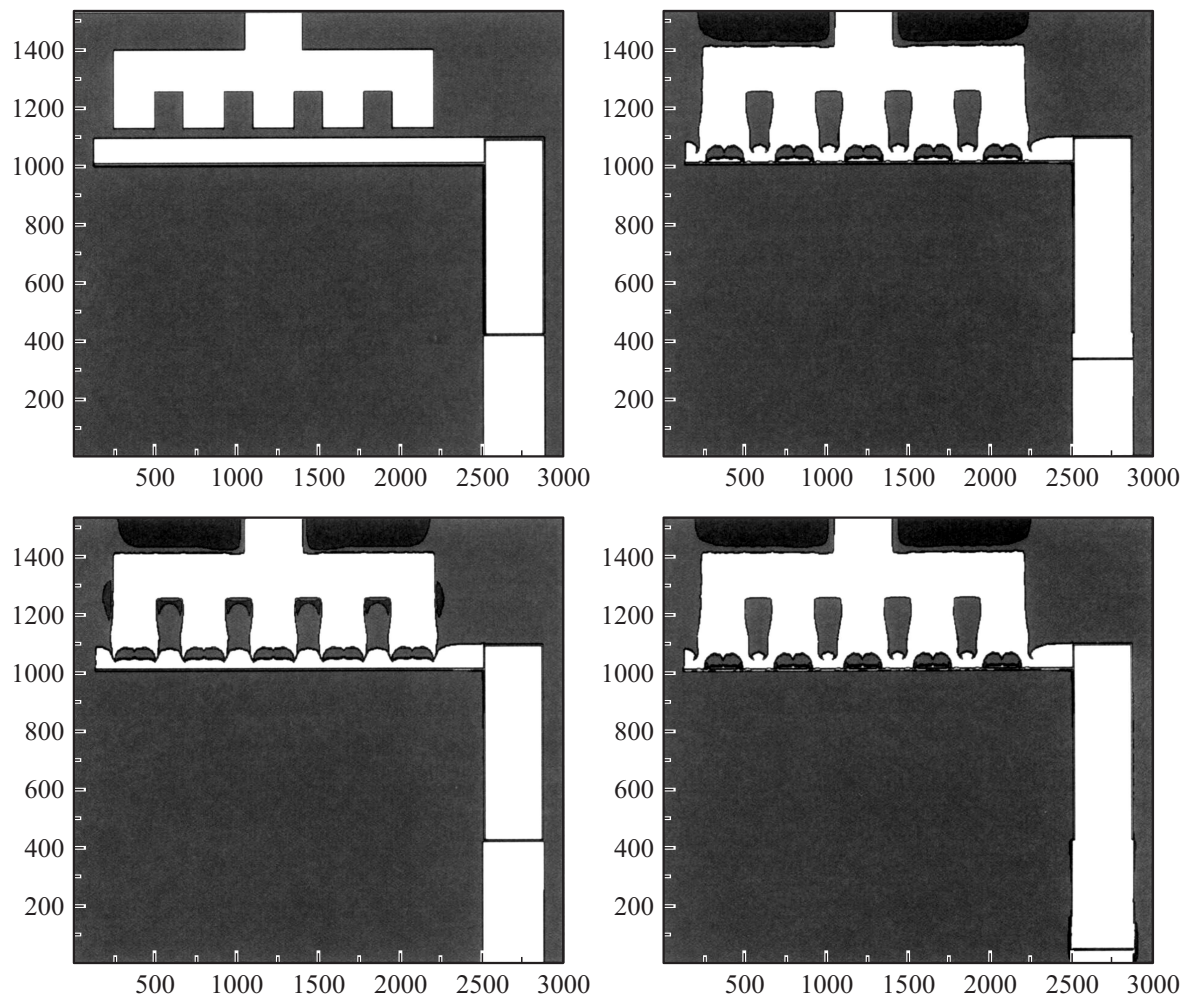
### Результаты расчетного моделирования

В табл. 1 представлены результаты расчетного моделирования процесса формирования импульса тока в нагрузке, полученные для ДВМГ, генерирующего в собственном контуре конечный ток амплитудой  $I_{md} = I_D(0) = 114$  мА. В таблице введены обозначения:  $M$  — масса ускоряемого лайнера;  $I_{Wm}$  — амплитуда импульса тока в нагрузке,  $\tau$  — фронт нарастания тока в нагрузке по уровню 0.1–0.9 от амплитудного значения,  $\tau_i$  — характерное время изменения индуктивности нагрузки в интервале 0.1–0.9 от ее величины, достигаемой в момент десятикратного обжатия лайнера. Расчетные данные приведены для лайнеров массой 17 и 25 мг при различных значениях скорости нарастания  $R_t$  сопротивления кумулятивного размыкателя. Длина лайнера составляла 15 мм, начальный радиус установки — 17 мм. Расчет завершался в момент десятикратного обжатия лайнера.

Как видно из таблицы, оптимальным с точки зрения минимизации времени схлопывания лайнера является режим, соответствующий скорости нарастания сопротивления кумулятивного размыкателя  $R_t = 2.3$  мΩ/μс.

**Таблица 1.** Результаты расчетного моделирования при варьировании скорости нарастания  $R_t$  сопротивления кумулятивного размыкателя тока

$I_D(0) = 114$ мА					
$R_t$ , мΩ/μс	$\tau_f$ , μс	$M$ , мг	$I_{Wm}$ , мА	$\tau$ , нс	$\tau_i$ , нс
1.0	3.0	17	17.6	136	65
		25	18.8	142	73
2.3	1.95	17	19	127	60
		25	20.5	133	67
5.5	1.32	17	18.5	132	66
		25	19.8	138	71
13	0.9	17	16.8	122	67
		25	18	132	76



**Рис. 4.** Результаты расчетного МГД-моделирования процесса коммутации магнитодинамического размыкателя на лайнерную нагрузку (шаг сетки 0.4 mm).

В этом режиме на входе МДР формируется импульс тока с фронтом нарастания  $\tau_f \approx 2 \mu\text{s}$ , а время схлопывания — 17 мг лайнера составляет 60 ns. Указанное значение  $R_t$  с хорошим запасом удовлетворяет условию (17), поэтому кумулятивный размыкатель может быть совмещен с ДВМГ. В выносном варианте исполнения при  $R_t = 13 \text{ m}\Omega/\mu\text{s}$  быстродействие МДР уменьшается (табл. 1). Наличие оптимума является особенностью магнитодинамического размыкателя и не характерно для размыкателей других типов (обычно быстродействие размыкателей возрастает при сокращении фронта нарастания, подаваемого на них импульса тока). Отметим также, что отклонение от оптимального значения  $\tau_f$  в пределах  $\pm 1 \mu\text{s}$  не приводит к существенному изменению характеристик МДР. Это качество позволяет надеяться на получение относительно устойчивых параметров выходного импульса при отклонениях режима коммутации кумулятивного размыкателя от оптимального.

Для проверки устойчивости параметров коммутации МДР к изменению выходного тока дискового генератора были проведены дополнительные расчеты при конечном

токе ДВМГ, равном 103 и 125 mA. Расчеты выполнены при указанном выше оптимальном значении скорости нарастания сопротивления кумулятивного размыкателя  $R_t = 2.3 \text{ m}\Omega/\mu\text{s}$ . Геометрические параметры МДР сохранились прежними. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Как следует из сопоставления табл. 1 и 2, режим коммутации МДР оказывается устойчивым к отклонениям тока ДВМГ. Причем снижение конечного тока ДВМГ от 114 до 103 mA не приводит к какому-либо

**Таблица 2.** Результаты расчетного моделирования при варьировании конечного тока ДВМГ

$R_t = 2.3 \text{ m}\Omega/\mu\text{s}, \tau_f = 1.95 \mu\text{s}$				
$I_D(0), \text{mA}$	$M, \text{mg}$	$I_{Wm}, \text{mA}$	$\tau, \text{ns}$	$\tau_i, \text{ns}$
103	17	20.2	136	60
	25	21.5	142	65
125	17	18.5	125	61
	25	19.9	133	69

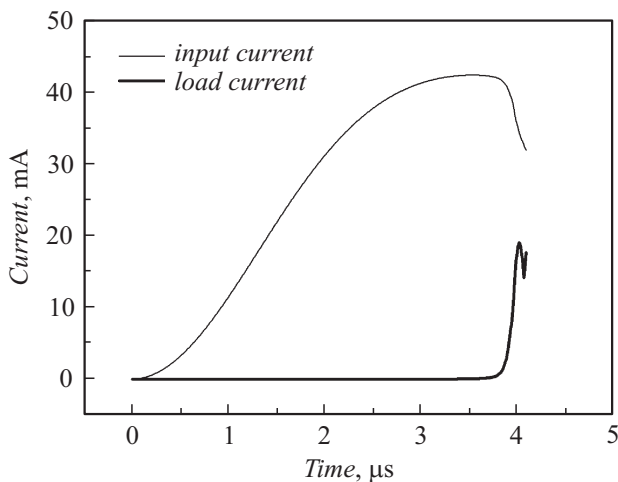


Рис. 5. Кривые переключения тока из магнитодинамического размыкателя на нагрузку.

заметному изменению времен  $\tau_i$  схлопывания лайнера. При возрастании тока до 125 mA время схлопывания увеличивается, но незначительно — на единицы наносекунд. Это позволяет ожидать от устройства высокой стабильности.

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены результаты расчетного МГД-моделирования динамики срабатывания магнитодинамического размыкателя в режиме  $I_D(0) = 114 \text{ mA}$ ,  $R_t = 2.3 \text{ m}\Omega/\mu\text{s}$  (табл. 1) при переключении тока в лайнерную нагрузку. Кривые переключения тока показаны на рис. 5 для лайнера массой 17 mg.

### Тестовый эксперимент

Для эмпирической проверки принятой модели МГД-описания МДР был выполнен тестовый эксперимент с уменьшенной в масштабе одноэлементной моделью размыкателя, аналогичный описанному в работе [1]; только коммутирующий элемент в данном случае уско-

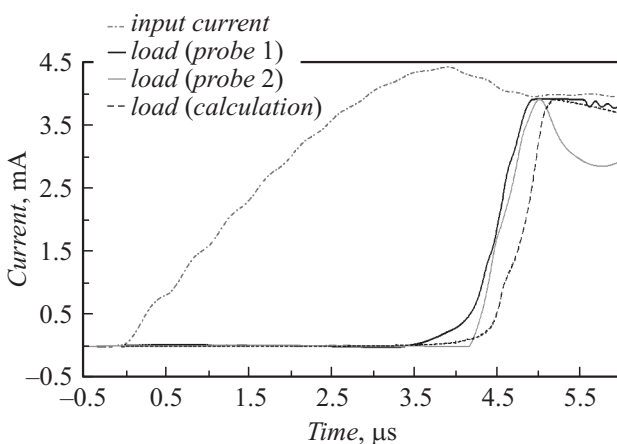


Рис. 6. Результаты контрольного эксперимента.

рялся не наружу, а радиально внутрь. Диаметр разрывающейся цилиндрической перемычки размыкателя составлял 16 mm, толщина стенки 0.5 mm. В тестовом эксперименте ДВМГ и взрывной кумулятивный размыкатель тока заменяла конденсаторная батарея установки КАСКАД. Эксперимент проводился при следующих параметрах разрядного контура: емкость конденсаторной батареи 492  $\mu\text{F}$ , индуктивность контура 22 nH, зарядное напряжение 43 kV (энергозапас 455 kJ, амплитуда разрядного тока  $\sim 4.5 \text{ mA}$ ). Нагрузка имела постоянную индуктивность  $\sim 5 \text{ nH}$ . Результаты эксперимента в графической форме представлены на рис. 6. Там же приведена расчетная кривая коммутации МДР. Как видно из рисунка, полученные экспериментальные данные совпадают с расчетом с приемлемой точностью, значительно лучшей, чем в работе [1].

### Заключение

Из результатов расчетного моделирования следует:

1. ДВМГ диаметром 400 mm с энергозапасом  $\sim 40 \text{ MJ}$ , снабженный совмещенным с ним кумулятивным обострителем тока и выносным магнитодинамическим размыкателем, способен обеспечить в лайнерной нагрузке импульс тока амплитудой  $\sim 20 \text{ mA}$  с коротким ( $\sim 130 \text{ ns}$ ) фронтом нарастания тока.
2. Расчетное время схлопывания лайнера массой 17 mg составляет  $\sim 60 \text{ ns}$  (что позволяет, например, проводить модельные эксперименты по генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения для целей отработки систем термоядерного зажигания дейтерий-тритиевых мишеней).
3. Устройство допускает разброс по величине выходного тока ДВМГ  $\sim 20\%$  и разброс по характерному времени срабатывания кумулятивного размыкателя в пределах 1–3  $\mu\text{s}$  без существенного изменения фронта нарастания и амплитуды импульса тока в нагрузке.
4. Результаты тестового эксперимента по исследованию работы магнитодинамического размыкателя показали хорошее совпадение расчета с экспериментом.

Таким образом, результаты работы указывают на возможность практической реализации подобных устройств.

Организация, финансировавшая выполнение работы, госкорпорация РОСАТОМ.

### Список литературы

[1] Базанов А.А., Ивановский А.В., Шайдуллин В.Ш. // ЖТФ. 2011. Т. 81, Вып. 7. С. 132–140.  
 [2] Spielman R.B., Stygar W.A., Seamen J.F. et al. Digest of technical papers of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, Maryland, USA. IEEE. 1997. Vol. 1. P. 709.



- [3] Протасов М.С., Чернышев В.К. и др. Быстродействующий дисковый взрывомагнитный генератор. // Тр. III Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам: Сверхсильные магнитные поля — физика, техника, применение. Новосибирск, Наука, 1984. С. 26.
- [4] Chernyshev V.K., Ivanov V.A. et al. // Proc. of 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on megagauss magnetic field generation and related topics: MEGAGAUSS-9. Moscow–St.-Petersburg: Sarov. VNIIEF, 2004. P. 310.
- [5] Буыко А.М., Васыуков В.А. et al. Proc. of 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on megagauss magnetic field generation and related topics: MEGAGAUSS-9. Moscow–St.-Petersburg: Sarov. VNIIEF, 2004. P. 752.
- [6] Демидов В.А., Жаринов Е.И., Казаков С.А., Чернышев В.К. // ПМТФ. 1981. Т. 130. № 6. С. 106–111.
- [7] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. С. 128.
- [8] Чернышев В.К., Протасов М.С., Шевцов В.А. Тр. III Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам: Сверхсильные магнитные поля — физика, техника, применение. Новосибирск: Наука, 1984. С. 23.
- [9] Proc. of 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on megagauss magnetic field generation and related topics: MEGAGAUSS-9. Part: Current pulse conditioning. Moscow–St.-Petersburg: Sarov, VNIIEF, 2004. P. 289.
- [10] Бакулин Ю.Д., Куропатенко В.Ф., Лучинский А.В. // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 1963.