

## МК-ГЕНЕРАТОР С УДАРНО-ВОЛНОВЫМ КАСКАДОМ

УДК 537.639

А. М. Трубачев, А. М. Рябчун

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,  
630090 Новосибирск

В ударно-волновых МК-генераторах [1-3] сжатие магнитного потока осуществляется ударными волнами, вызывающими переход вещества из непроводящего состояния в проводящее. Оказалось, что такой метод получения сильных магнитных полей имеет некоторые преимущества по сравнению с лайнерными устройствами. Упрощается процедура введения начального магнитного потока в область сжатия, автоматически решается проблема защиты рабочего объема, и повышается устойчивость сжатия. Начальная форма области сжатия, ограниченная ударными волнами, должна быть симметричной, но эта симметрия может отличаться от круговой, что упрощает взрывную систему.

В [4] исследовалась динамика схлопывания оболочки МК-генератора. Показано, что нарушение симметрии сжатия оболочки и струи вещества, испаряющегося с поверхности лайнера, — причина преждевременного разрушения датчиков, и, следовательно, уменьшается максимальное значение регистрируемого поля. Эти явления удалось эффективно подавить применением промежуточных каскадов [5] и увеличить предельное поле [6, 7]. По нашему мнению, каскадные МК-генераторы имеют много общего с ударно-волновыми и отличаются лишь характером распределения вещества в сжимаемом объеме.

В настоящей работе обсуждаются вопросы достижения максимальных магнитных полей в МК-генераторе с ударно-волновым каскадом. Выбором параметров генератора решается задача получения максимального поля в заданном объеме при фиксированной начальной кинетической энергии лайнера, создающего ударную волну в веществе, заполняющем сжимаемую область.

1. При использовании генератора типа МК-1 для получения сверхсильных магнитных полей, после того как выбрана взрывная система, свободными остаются только два параметра: начальное магнитное поле и размер измерительного узла. В дальнейшем, используя понятие размер измерительного узла, будем иметь в виду не просто поперечный размер датчика поля или экспериментального устройства с защитой, расположенных на оси, а некоторый средний поперечный размер области сжатия к моменту окончания регистрации сигнала. Этот размер в генераторах типа МК-1 главным образом определяется отклонением от круговой симметрии сжимающейся оболочки и всегда больше геометрического размера собственно измерительного узла.

В ударно-волновом МК-генераторе появляется дополнительная степень свободы — возможность выбора параметров сжимаемой среды. Вид материала и начальная плотность  $\rho_0$  определяют ударно-волновые свойства среды, а вариация распределения начальной плотности по радиусу генератора дает возможность (в некоторых пределах) управлять эффективностью работы генератора.

В [2, 8] отмечалось, что при одинаковых начальных условиях и одинаковом текущем размере области сжатия поле в ударно-волновом генераторе оказывается меньше, чем в генераторе с лайнером, из-за уноса части потока веществом через фронт волны. По этой

же причине к концу сжатия поле в ударно-волновом генераторе оказывается выше, но в меньшем размере.

Казалось бы, что того же результата можно достичь с лайнерной системой снижением начального поля, однако обработка экспериментальных материалов [9] показывает, что только в уникальных случаях [10] удастся сжать лайнер примерно в 14 раз, а поле усилить примерно в 200 раз к концу регистрации сигнала. Интенсивные электрофизические процессы, протекающие на внутренней поверхности лайнера, и как следствие повышенные требования к прочности защиты измерительного узла являются главной причиной указанных ограничений [4].

Ударно-волновой генератор практически свободен от этих недостатков. В экспериментах [11, 12], проведенных в простейшей постановке, размер сжимаемой области изменялся примерно в 40 раз до момента разрушения датчика и определялся лишь точностью фокусировки ударных волн на датчик. Датчик поля, расположенный на оси генератора, не имел какой-либо защиты, за исключением электроизоляции. Роль защиты выполняет сам рабочий материал. Из-за конвективного перемешивания поля с веществом и формирования токового слоя значительной толщины в ударно-волновом генераторе, по-видимому, сильно подавлены неустойчивости. Об этом можно судить по рентгеновским снимкам работы [4], учитывая сходство обоих типов генераторов.

Таким образом, ударно-волновой генератор в степени защищенности измерительного узла имеет преимущество перед классическим МК-генератором. Выигрывает он также в плотности магнитной энергии к концу работы, но полная энергия в сжимаемом объеме оказывается меньше.

Можно объединить преимущества обеих систем, заполняя сжимаемый объем рабочим материалом не целиком, а частично. Тогда на первых этапах генератор будет работать с высоким коэффициентом преобразования кинетической энергии лайнера в магнитную как классический, а на последних — как ударно-волновой.

2. Рассмотрим осесимметричную задачу обжатия магнитного поля в МК-генераторе с ударно-волновым каскадом. Цилиндрическая область с радиусом  $r_0$ , осевым магнитным полем  $B_0$  заполнена непроводящим материалом начальной плотности  $\rho_0(r)$ . Лайнер с массой  $M$  на единицу длины, внутренним радиусом  $r_0$  и плотностью материала  $\rho_l$  с начальной скоростью  $u_0$  сжимает среду. Отошедшая от лайнера цилиндрическая ударная волна переводит среду в проводящее состояние и сжимает магнитное поле.

В дальнейшем принимаем следующие, упрощающие задачу обстоятельства: а) схождение лайнера и ударной волны к центру симметрично, б) граница раздела среда — лайнер неразрывна, в) материал лайнера несжимаем, г) среда пакуется ударной волной от плотности  $\rho_0(r)$  до одинаковой плотности  $\rho$ , которая в дальнейшем не меняется, д) проводимость в рабочей среде появляется только после ее полного сжатия в ударной волне, е) в широком диапазоне параметров задачи диффузионными потерями потока из области сжатия можно пренебречь [8]. С учетом этих замечаний поле в области сжатия будет зависеть только от ее размера:

$$b = \exp \left( -2 \int_1^{x_f} \alpha(x)/x dx \right). \quad (2.1)$$

Здесь  $x = r/r_0$  — координата;  $x_f = r_f/r_0$  — положение фронта ударной волны;  $b = B/B_0$  — поле в области сжатия;  $\alpha(x) = 1 - \rho_0(x)/\rho = u/D$ ;  $u$  и  $D$  — массовая и волновая

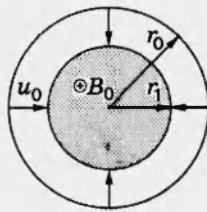


Рис. 1

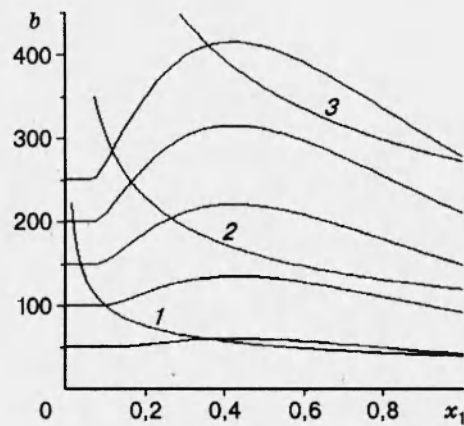


Рис. 2

скорости в ударной волне.

Поле (2.1) при  $\alpha = \text{const}$  совпадает с результатом [2], а при  $\alpha = 1$  — с классическим пределом  $b = x_f^{-2}$ .

Уравнение движения фронта волны получается из уравнения Эйлера интегрированием по радиусу с нулевым давлением на внешней границе лайнера, с давлением  $p_f = \rho_0(x_f)uD + B^2/(2\mu_0)$  во фронте ударной волны, из условия неразрывности течения на границе среда — лайнер и имеет вид

$$v_f^2 = \frac{\rho_l w}{\rho x_f^2} \frac{\ln(1+m)}{\ln((x_l/x_f)^2(1+m/x_l)\rho_l/\rho)}, \quad (2.2)$$

где  $w$  — вспомогательная функция:

$$\frac{dw}{dx_f} = \frac{2}{x_f} \left\{ \frac{b^2 \alpha(x_f)}{\epsilon} + \frac{w[1 - \alpha(x_f)]}{\ln((x_l/x_f)^2(1+m/x_l)\rho_l/\rho)} \right\};$$

$$x_l^2 = 1 + 2 \int_1^{x_f} \alpha(x) x dx; \quad (2.3)$$

$v_f = u_f/u_0$  — массовая скорость во фронте волны;  $x_l = r_l/r_0$  — положение внутренней границы лайнера;  $m = M/(\pi r_0^2 \rho_l)$ ;  $\epsilon = \epsilon_{k0}/\epsilon_{m0} = [\mu_0 \rho_l u_0^2 \ln(1+m)]/B_0^2$  — отношение кинетической энергии лайнера  $\epsilon_{k0}$  к магнитной  $\epsilon_{m0}$  в начале сжатия.

**3.** Поставленная задача отличается от аналогичной, сформулированной в [8], характером распределения вещества в сжимаемой области  $\rho_0 = \rho_0(r)$ . В принципе подбором этого распределения можно в некоторых пределах управлять как формой импульса магнитного поля, так и тепловыделением в сжимающем поле слое. Однако в дальнейшем будем полагать исходную плотность материала  $\rho_0$  постоянной при  $r < r_1$  и  $\rho_0 = 0$  при  $r_1 < r < r_0$ , так как указанное распределение просто реализуется на практике (рис. 1).

Численные расчеты были проведены для ударно-волнового генератора [11, 12], характеристики которого приведены в таблице. Начальные параметры задачи (2.1)–(2.3), такие как  $m$ ,  $r_0$ ,  $\epsilon$  и др., задаются в момент времени, когда окончилась детонация заряда взрывчатого вещества, и в расчетах изменяются вблизи значений, характерных для генератора [11, 12].

$r_0$ , мм	$M$ , кг/м	$u_0$ , км/с	$\epsilon_{к0}$	$\epsilon_{т0}$	$B_0$	$B$	$B/B_0$	$\epsilon + 1$	$B_0^*$	$B^*$	Лите- ратура
			Дж/м		Тл				Тл		
126	5,1	2,1	$10^7$	$8 \cdot 10^4$	4	360	90	125	$3,5 \div 4,5$	700	[11, 12]
139	9	4,0	$8 \cdot 10^7$	—	$5 \div 100,16$	$500 \div 1300$	$50 \div 190$	—	9-12	1800	[4-7]
147	6,2	1,54	$0,72 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^4$	2,78	323	116	138	3	500	[13]

На рис. 2 приведен результат расчета коэффициента усиления магнитного поля  $b = B/B_0$  при различных значениях параметра  $\epsilon$ . Горизонтальная ось  $x_1 = r_1/r_0$  — коэффициент заполнения сжимаемой области генератора рабочим материалом ( $x_1 = 1$  соответствует случаю, когда сжимаемая область заполнена пористым материалом целиком). Рабочий материал — алюминиевая пудра марки ПАП-1 плотностью  $\rho_0 = 0,44$  г/см<sup>3</sup>.

Семейство кривых усиления построено с интервалом в 50 единиц, начиная с  $\epsilon = 50$ . Коэффициент усиления достигает максимума при  $x_1 = 0,4-0,5$ , и его положение слабо зависит от  $\epsilon$ . Относительная величина максимума растет вместе с  $\epsilon$ .

С уменьшением  $x_1$  усиление снижается и кривые выходят на горизонтальный участок. Этот участок описывает работу генератора в идеальных условиях, т. е. при сохранении потока и энергии. Лайнер не достигает центральной области, заполненной пористым материалом, а  $b = \epsilon + 1$ . Усиление снижается также, если сжимаемая область заполняется пористым материалом целиком.

Кривые усиления поля построены в предположении, что ударная волна отражается от поля, а поле достигает максимального значения. Однако нужно иметь в виду, что размер области сжатия может оказаться реально недостижимым из-за конечных размеров измерительного узла или неточности фокусировки ударных волн на ось системы и преждевременного разрушения датчика. Чтобы учесть влияние этого фактора, на рис. 2 проведены линии 1-3, соответствующие минимальному размеру области сжатия  $0,1r_0$ ,  $0,05r_0$ ,  $0,03r_0$ . Тем самым очерчивается рабочий диапазон параметров:  $x_1 \cong 0,4 \div 0,5$ , минимальный размер области сжатия определяется конструктивными особенностями, а значение  $\epsilon$  выбирается так, чтобы рабочая точка располагалась ниже линии минимального размера.

Из рис. 2 видно, что при  $\epsilon > 100$  усиление поля может быть более чем в 1,5 раза выше по сравнению с усилением поля классического генератора в приемлемом для эксперимента размере (датчик  $0,03r_0 \div 0,05r_0$ ).

4. Использованное представление данных удобно для выбора части начальных параметров генератора независимо от его конструктивных особенностей. Однако, чтобы определить стартовое магнитное поле, а следовательно, и конечное в конкретной ситуации, необходимо задать кинетическую энергию лайнера в начале сжатия.

На рис. 3 приведены результаты расчета конечного магнитного поля в МК-генераторе в зависимости от начального поля при нескольких значениях кинетической энергии лайнера и различной степени заполнения сжимаемой области пористой средой. Сплошные линии соответствуют степени заполнения  $x_1 = 1$ , пунктирные  $x_1 = 0,4$ , кривые 1, 1' отвечают энергии лайнера  $0,5 \cdot 10^7$  Дж/м, 2, 2' —  $10^7$  Дж/м, 3, 3' —  $2 \cdot 10^7$  Дж/м. Вдоль указанных кривых конечное поле растет с уменьшением начального поля, но лишь до тех пор, пока конечный размер области сжатия остается больше размера измерительного узла. Нарушение указанного условия приводит к преждевременному разрушению датчика, а связь между начальным и конечным полем при различных значениях  $x_1$  имеет линейную зави-

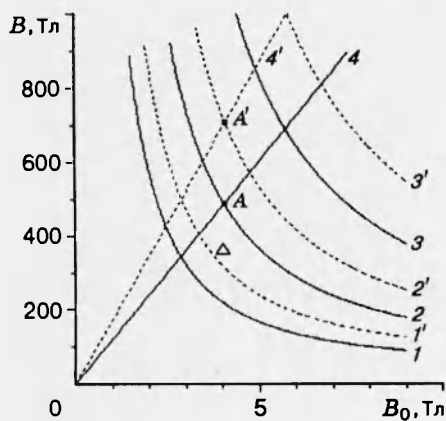


Рис. 3

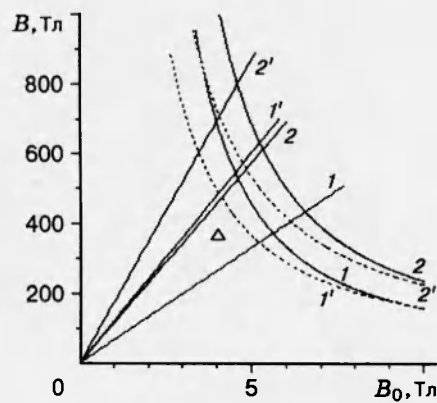


Рис. 4

симось, которая на рис. 3 изображена прямыми 4, 4', выходящими из начала координат. Размер измерительного узла равен  $0,05r_0$ . Оптимальное начальное поле определяется по точке пересечения прямой и кривой соответствующей энергии. Для генератора [11, 12] оптимальное начальное поле примерно 4Тл независимо от степени заполнения рабочей области. Конечное магнитное поле  $\approx 400 \div 450$  Тл при  $x_1 = 1$  и  $\approx 600 \div 700$  Тл при  $x_1 = 0,4$  (точки А и А').

Для того чтобы выяснить влияние других параметров на конечное поле, проведена серия расчетов с фиксированной энергией лайнера и переменными величинами  $\rho_0, m$ . На рис. 4 приведена зависимость начальное поле — конечное поле при различных исходной плотности сжимаемого материала и степени заполнения. Кривые 1 и 1', 2 и 2' отвечают степени заполнения  $x_1 = 1$  и 0,4, линии 1' и 2' построены для плотности  $\rho_0 = 0,44$  г/см<sup>3</sup>, а 1 и 2 — для плотности, большей в 1,5 раза. Размер датчика во всех случаях  $0,05r_0$ . Прямые помечены теми же цифрами, что и соответствующие им кривые. Видно, что с ростом начальной плотности сжимаемого материала максимум поля снижается и смещается в сторону больших начальных полей.

В экспериментах [11, 12] сжимаемая область заполнялась алюминиевой пудрой целиком. Результат экспериментов на рис. 3, 4 показан треугольником. Близость положения точки к соответствующим границам свидетельствует о качественном совпадении экспериментальных результатов с расчетными. Однако можно заметить, что лишь подбором оптимальных параметров ударно-волнового каскада конечное магнитное поле можно увеличить примерно в 2 раза без изменения взрывной системы.

5. Оценки, проведенные в п. 4, показывают, что использование ударно-волнового каскада в качестве второй ступени МК-генератора приводит к улучшению его эксплуатационных характеристик, таких как конечное поле, а если учесть сходство с генератором [4], то и стабильность результатов.

В связи с этим любопытно оценить, какой выигрыш в конечном поле можно получить, если применить ударно-волновой каскад в известных системах [4-7, 13].

В таблице приведены параметры генераторов, которые использовались для получения сверхсильных магнитных полей.

В расчетах дополнительно принято: размер каскада  $x_1 = 0,4$ , наполнитель — алюминиевая пудра плотностью  $\rho_0 = 0,44$  г/см<sup>3</sup>. Размер датчика во всех случаях  $0,05r_0$ .

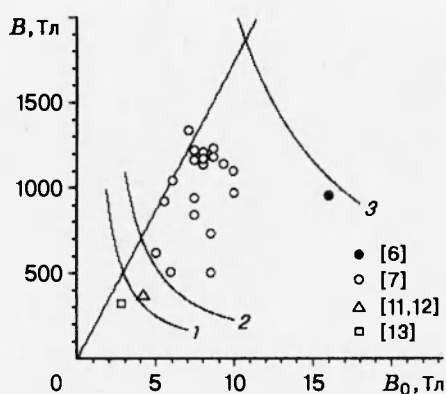


Рис. 5

Результаты расчетов и экспериментов представлены на рис. 5. Кривая 1 относится к генератору [13], 2 — [11, 12], 3 — [4–7], прямая — линия датчика. Видно, что для всех трех устройств существует возможность увеличить конечное магнитное поле, если использовать ударно-волновой каскад и удачно выбрать начальные параметры генератора. Необходимые начальное  $B_0^*$  и ожидаемое конечное  $B^*$  поля приведены в таблице.

В заключение отметим следующее. Использование ударно-волнового каскада в качестве последней ступени классического МК-генератора представляется достаточно выгодным. Несколько меньшая эффективность усиления каскада по сравнению с лайнерным устройством компенсируется продлением времени регистрации сигнала. В оценках мы сознательно ограничились конечным размером области сжатия  $0,05r_0$ , что близко к размерам, реализованным в [7, 13]. На самом деле этот размер будет определяться лишь точностью схождения ударной волны к оси системы, так как датчик не требует механической защиты и может иметь сколь угодно малый размер, а следовательно, расчетная граница достижимых полей поднимется еще выше. С другой стороны, использованная ударная адиабата сжимаемого вещества отличается от реальной. Учет сжимаемости среды за фронтом ударной волны приведет к снижению границы достижимых полей. Чтобы как-то учесть этот фактор и создать некоторый запас прочности, мы ограничились в расчетах указанным конечным размером области сжатия.

Авторы благодарят Е. И. Биченкова и С. Д. Гилева за полезные замечания и советы, сделанные при выполнении данной работы.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (код проекта RB0000) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-02-04022).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 762706 СССР. Магнитокумулятивный генератор / Е. И. Биченков, Н. Г. Скоробогатых, А. М. Трубачев // Открытия. Изобретения. 1982. Т. 1.
2. Гилев С. Д., Трубачев А. М. Получение сильных магнитных полей ударными волнами в веществе // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, вып. 15. С. 914–917.
3. Nagayama K. New method of magnetic flux compression by means of the propagation of shock-induced metallic transition in semiconductors // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38, N 2. P. 109.

4. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И. и др. Исследование динамики схлопывания оболочки магнитно-кумулятивного генератора сверхсильных магнитных полей // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам. Новосибирск, 1983. М.: Наука, 1984.
5. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И. и др. Каскадный магнитно-кумулятивный генератор сверхсильных магнитных полей // Там же.
6. Pavlovskii A. I., Kolokolchikov N. P., Tatsenko O. M., et al. Reproducible generation of multimegagauss magnetic fields // Megagauss Physics and Technology: Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics, Washington, 1979. N. Y.; L., 1980.
7. Pavlovskii A. I., Vykov A. I., Dolotenko M. I., et al. Limiting value of reproducible magnetic fields in cascade generator MC-1 // Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. 4th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics, Santa Fe, 1986. N. Y.; L., 1987.
8. Трубачев А. М. Ударно-волновые МК-генераторы. Оценка предельных возможностей метода // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т гидродинамики. 1988. Вып. 88. С. 132-147.
9. Trubachev A. M. Effect of flux losses in MC-generator // Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. 4th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics, Santa Fe, 1986. N. Y.; L., 1987.
10. Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of very high magnetic fields by implosion // J. Appl. Phys. 1960. V. 31, N 3.
11. Гилев С. Д., Трубачев А. М. Использование ударных волн для генерации сверхсильных магнитных полей // Электромеханические преобразователи энергии. Киев: Наук. думка, 1986.
12. Bichenkov E. I., Gilev S. D., Riabchun A. M., et al. Shock-wave method for generation of megagauss magnetic fields // Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. 4th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics, Santa Fe, 1986. N. Y.; L., 1987.
13. Goto T., Miura N., Nakao K., et al. Megagauss field generation for application to solid state research // Ibid.

*Поступила в редакцию 27/III 1995 г.*

---