

УДК 537.639

МК-ГЕНЕРАТОРЫ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
ЭКСПЕРИМЕНТА *

А. М. Трубачев

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

К настоящему времени проведено большое число экспериментов по получению сверхсильных магнитных полей в диапазоне $1 \div 15$ МГц путем быстрого сжатия магнитного потока проводящей оболочкой. Эксперименты проводились в разнообразных условиях. Были испытаны различные схемы введения начального магнитного потока, способы ускорения лайнера, его материал и конструкция и т. д. [1–12].

Нужно отметить, что проведение взрывного эксперимента по магнитной кумуляции — достаточно трудоемкая задача и требует специфических условий, поэтому такие эксперименты доступны лишь ограниченному числу лабораторий. В то же время отсутствует методика, кроме интуиции авторов, для однозначного выбора стартовых параметров генератора, позволяющих получить максимальное поле с помощью конкретного устройства, что приводит к непроизводительным затратам усилий. Результаты различных лабораторий выглядят разрозненными, а из-за отличающихся условий экспериментов их трудно сравнивать между собой.

В настоящей работе систематизируются опубликованные результаты по получению сверхсильных магнитных полей. Предлагается методика подбора начального магнитного поля генератора, позволяющая за небольшое число шагов выбрать оптимальные условия эксперимента.

В [13] впервые сделана попытка найти параметры, по которым удалось бы объединить экспериментальные результаты по магнитной кумуляции. В качестве таких параметров были выбраны: $b = B_m/B_0$ — реально полученное в эксперименте усиление поля, B_m , B_0 — конечное и начальное магнитные поля; ε — отношение кинетической энергии лайнера к магнитной в сжимаемом объеме в начале сжатия. Представление экспериментальных данных в этих переменных отличается крайней простотой, а результаты оказались достаточно интересными, чтобы продолжить их анализ.

Эффективность работы реального МК-генератора будем в дальнейшем сравнивать с идеальным, в котором сжатие поля осуществляется без потерь потока проводящей цилиндрической оболочкой. В этом случае из условия сохранения потока и энергии следует, что коэффициент усиления поля $b = B_m/B_0$ и радиус внутренней полости лайнера $x = r/r_0$ к моменту его остановки полностью определяются отношением кинетической энергии лайнера к магнитной в начале сжатия:

$$b = \varepsilon + 1; \quad (1)$$

$$x = (\varepsilon + 1)^{-1/2}. \quad (2)$$

На рис. 1 прямой линией изображена зависимость (1).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда (грант № RB0000) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-02-04022).

Усиление поля b полностью определяется энергетическими параметрами генератора и растет вместе с ϵ лишь до тех пор, пока радиус внутренней полости лайнера x остается больше поперечного размера расположенных на оси измерительного узла или экспериментального устройства $x_d = r_d/r_0$ (r_d — радиус датчика). При условии $x = x_d$ коэффициент усиления поля достигает предельной величины $b = x_d^{-2}$ и в дальнейшем с ростом ϵ не меняется. Следовательно, усиление генератора в этой области изменения параметра ϵ связано лишь с возможностью геометрической перестройки сжимаемого объема к моменту разрушения датчика.

Таким образом, кривая усиления генератора в зависимости от ϵ состоит из двух участков — наклонного при малых ϵ и горизонтального при больших. Уровень выхода кривой на горизонтальный участок зависит от размера x_d . В реальных условиях из-за неустойчивости сжатия оболочки и иных процессов, приводящих к преждевременному разрушению датчика, указанный размер не достигается, а вместо него фигурирует некоторый эффективный размер сжимаемой области к моменту окончания регистрации сигнала.

Сводные результаты обработки экспериментов по магнитной кумуляции представлены на рис. 1, где точки 1 — результаты экспериментов [7], 2 — [2-6], 3 — [1, 2], 4 — [8], 5 — [9], 6 — [10], 7 — [11], 8 — [12]. Приведены результаты экспериментов, для которых удалось оценить величину ϵ .

В проведенной обработке данных были использованы только два глобальных параметра: b и ϵ . Естественно, что при таком подходе утрачены индивидуальные особенности конкретных экспериментов. Построенная диаграмма не несет прямой информации об уровне рабочих полей и самих устройствах, однако удивителен тот факт, что, несмотря на большое разнообразие конструкций генераторов и различие начальных условий по магнитному полю и энергии лайнера, расположение точек на диаграмме имеет достаточно хорошо выраженные закономерности.

Если усреднить результаты по всем экспериментам, то полученная кривая усиления магнитного поля будет иметь характерный вид, сходный с кривой усиления идеального генератора. Особенно хорошо это сходство выражено внутри групп экспериментов (рис. 2).

На начальном участке (рис. 1) до $\epsilon \approx 50 \div 60$ экспериментальные точки близко прижимаются к прямой, а в некоторых случаях располагаются

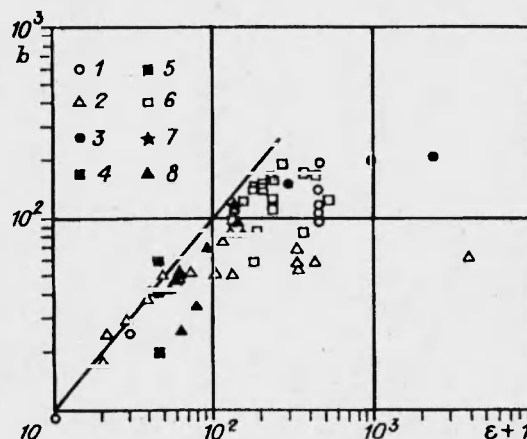


Рис. 1

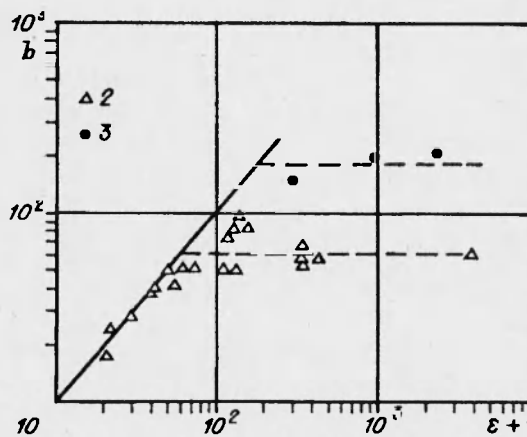


Рис. 2

даже выше ее, при этом все авторы отмечают факт значительных потерь (до 80 %) магнитного потока из области сжатия. Если в процессе сжатия не нарушается симметрия лайнера, то его кинетическая энергия используется практически полностью, а минимальный размер области сжатия из-за потерь потока должен быть меньше, чем дает соотношение (2), но больше размеров измерительного узла. При работе в этой области параметров возможно получение более или менее устойчивых результатов, а также наблюдение эффекта отражения лайнера от магнитного поля.

Положение части точек, лежащих существенно ниже прямой в указанном диапазоне ϵ , можно объяснить следующим образом. Статистика опубликованных результатов не является полной. Если не ставится вопрос о повторяемости результатов, то публикуются лучшие, т. е. происходит предварительная авторская фильтрация данных. Известно, как легко в магнитно-кумулятивном эксперименте получить отрицательный результат, поэтому все этажи, проходящие ниже прямой, доступны. Границей доступных коэффициентов усиления поля является верхняя огибающая, проходящая по экспериментальным точкам.

При $\epsilon \geq 60$ точки отходят от прямой и располагаются в широкой горизонтальной полосе $b \approx 60 \div 200$. Можно заметить, что внутри полосы эксперименты, проведенные в различных лабораториях, объединяются в более узкие полосы с различным средним уровнем. Так, для точек 2 $b \approx 60$, а для точек 3 $b \approx 180$ (рис. 1, 2, штриховые линии). По-видимому, этот факт является следствием конструктивных особенностей применяемых генераторов.

Работа генераторов в области больших ϵ характеризуется лишь частичной утилизацией кинетической энергии лайнера к моменту окончания записи сигнала с датчика. Предельное усиление связано не с энергетическими параметрами генератора, а с его физическим состоянием — развитием неустойчивости сжатия оболочки, перегревом и испарением ее и как следствие преждевременным разрушением датчика. К концу записи сигнала эффективный размер области, занятой полем, перемешанным с веществом, достигает своего предельного значения, большего размера измерительного узла. Вместе с ним и коэффициент усиления поля, определяемый в основном возможностями геометрической перестройки, достигает максимального значения, практически не зависящего от ϵ . Так как на этом участке основную роль играют случайные процессы, то и результаты оказываются нестабильными. Усиление защиты датчика приводит в некоторых пределах к увеличению максимального регистрируемого поля, но легко заметить, что во всех экспериментах усиление не превосходит $b \approx 200$.

Из поведения экспериментальной кривой усиления следует, что для получения наибольшего магнитного поля с помощью конкретной системы нужно подбирать параметр ϵ таким образом, чтобы рабочая точка разместилась в области перехода наклонного участка кривой усиления в горизонтальный. При таком подборе ϵ , возможно, удастся совместить повторяемость результатов с максимальным для данной взрывной системы усилением и конечным полем. В этой области кинетическая энергия лайнера должна быть практически полностью использована к моменту разрушения датчика.

Однако большинство экспериментов не удовлетворяют сформулированным условиям. В качестве примера рассмотрим эксперименты [1, 2] (точки 3, рис. 1, 2). В таблице приведены параметры генераторов.

Обращает на себя внимание слишком большое различие значений b и ϵ , особенно в последних двух случаях. Если принять, что на горизонтальном участке коэффициент b не зависит от начального поля или ме-

Эксперимент	B_0 , кГс	B_m , МГс	$b = B_m/B_0$	ϵ	B_0^1 , кГс	B^m , МГс
LA1	90	14,3	158	300	127	20
LA2	20	4	205	2315	67	13,7
LA3	31	6,1	197	964	68	13,5

няется слабо, то в соответствии со сказанным выше нужно изменять B_0 до тех пор, пока не выполнится условие $\epsilon \approx b$. В таблице приведены необходимые для этого начальное поле \bar{B}_0^1 и ожидаемое конечное поле B^m в оптимальных условиях. Видно, что выигрыш в поле может оказаться значительным, даже если учесть, что b может несколько уменьшаться с ростом начального поля.

Наиболее представительной является серия экспериментов [8–10]. Ценность ее заключается в том, что во всех случаях использовалась одна и та же взрывная система, т. е. кинетическая энергия лайнера одинакова во всех экспериментах, а менялись конструкция генератора и начальное магнитное поле. Начальное поле менялось в широком диапазоне ($B_0 \approx 50 \div 160$ кГс), поэтому имеется возможность качественно оценить влияние уровня рабочих полей на коэффициент усиления.

При высоком уровне стартового поля термические процессы, сопровождающие сжатие лайнера, протекают более интенсивно и включаются раньше, чем при работе в слабом поле. Следовательно, регистрация сигнала прекращается при большем размере сжимаемой области и меньшем коэффициенте усиления поля. Так, в [9] приведено два эксперимента (точки 5) и показано, что при заданной в начале сжатия величине $\epsilon \approx 46$ ($B_0 = 160$ кГс) усиление однокаскадного генератора $b \approx 20$ при относительно слабой защите измерительного узла. Одна из точек 5 располагается много ниже прямой и принадлежит горизонтальному участку кривой усиления. В этом убеждают повторяемость эксперимента и рентгенограммы сжимаемой оболочки, приведенные в [9]. При наиболее прочной защите усиление генератора $b \approx 40$ (рис. 1, вторая точка 5). Положение этой точки на диаграмме показывает, что усиление генератора практически достигло предела и дальнейшее усиление защиты увеличением ее размеров может привести снова к снижению b .

В тех же условиях в трехкаскадном генераторе [8] получено усиление поля $b \approx 59$ (рис. 1, точка 4). Точка лежит существенно выше прямой усиления генератора без потерь. Этот факт, неожиданный на первый взгляд, объясняется присутствием промежуточных экранов между лайнером и зоной датчика. Возможность существования такого явления связана со сбросом части магнитного потока в стенки сжимаемой области и была описана в [13, 14].

В следующей серии экспериментов с каскадными генераторами [10] менялось начальное магнитное поле в пределах $50 \div 100$ кГс, что соответствует изменению параметра ϵ в диапазоне $130 \div 500$ (рис. 1, точки 6). Примерно в половине всех экспериментов получено среднее усиление поля $b \approx 150$. Однако здесь уже видно, что точки отходят от прямой усиления идеального генератора и располагаются с большим разбросом вдоль горизонтальной прямой ($b \approx 150$), т. е. их расположение не попадает в оптимальную область по величине ϵ . Если принять во внимание, что в эксперименте [8] точка 4 расположилась даже немного выше прямой, то, увеличив несколько начальное поле в этих экспериментах, можно надеяться попасть в область необходимых для получения максимального поля условий. По нашей оценке, это соответствует диапазону начальных полей $90 \div 120$ кГс и конечных $13 \div 15$ МГс.

В эксперименте [11] (точка 7, рис. 1) для ускорения лайнера вместо взрывчатого вещества использовалось магнитное поле. Так как в момент старта скорость лайнера и магнитное поле в сжимаемой области не определены, то для оценки ϵ выбиралась промежуточная фаза сжатия, когда скорость лайнера стабилизировалась. Приведенный к началу сжатия параметр $\epsilon \approx 137$, а реально полученное усиление поля $b \approx 116$. К сожалению, это пока единственная точка, и трудно судить, как поведет себя кривая усиления для этого типа генератора при изменении начального поля в ту или иную сторону, однако складывается впечатление, что эксперимент проведен практически в оптимальных условиях.

Экспериментальные точки на диаграмме рис. 1 перекрывают широкий диапазон изменения параметра ϵ , но нужно иметь в виду, что это эксперименты с разными генераторами. Массив однородных экспериментов [8–10] накрывает наиболее интересную с точки зрения получения максимальных полей область параметра ϵ ($50 \div 200$) лишь фрагментарно. Точный ход зависимости реально достижимого коэффициента усиления от ϵ для конкретной конструкции генератора по-прежнему неизвестен, но даже имеющиеся разрозненные данные позволяют выбрать оптимальный диапазон начальных условий достаточно эффективным образом.

После того как для работы выбрана конструкция генератора, все его параметры (размеры, кинетическая энергия лайнера и др.) заданы и в процессе эксперимента не меняются. Для выбора необходимой величины единственного свободного параметра — начального магнитного поля — можно предложить следующую последовательность действий. В предварительной серии экспериментов с практически произвольным начальным полем определяются кинетическая энергия лайнера и магнитная энергия в начале сжатия, находится коэффициент усиления поля b и вычисляется параметр ϵ . Из диаграммы видно, что усиление $b \approx 200$ является предельным для всех устройств, поэтому в следующей серии экспериментов начальное поле нужно выбрать так, чтобы параметр ϵ не превосходил этой величины, являющейся для него верхней границей. Одновременно тем самым определяется нижняя граница для начального поля. Нижняя граница для параметра ϵ и верхняя для начального поля определяются из условия $\epsilon \approx b$, где b — максимальный из коэффициентов усиления серии экспериментов.

Таким образом, в предварительной серии экспериментов устанавливается интервал значений параметра ϵ ($b < \epsilon < 200$), в котором нужно работать, чтобы получить максимально возможное поле. Например, из диаграммы видно, что значение $b \approx 100$ достаточно типично, что приводит к отличию начального поля на верхней и нижней границах в $\sqrt{2}$ раз. Этот интервал уже достаточно узок, чтобы обследовать его простым перебором начальных полей или иным способом, контролируя положение рабочей точки по диаграмме.

Таким образом, путем анализа результатов по получению сверхсильных магнитных полей установлено эмпирическое ограничение на коэффициент усиления поля в МК-генераторах существующих конструкций ($b \leq 200$). Для выбора оптимального режима работы МК-генератора необходимо подбирать начальное магнитное поле так, чтобы отношение кинетической энергии лайнера к магнитной в начале сжатия удовлетворяло условию $\epsilon \approx b \leq 200$, в противном случае использование кинетической энергии лайнера неэффективно. Значительная доля экспериментальных результатов, приведенных на рис. 1, не удовлетворяет сформулированному условию. Частично ситуация объясняется проблемой введения начального магнитного потока в замкнутую металлическую оболочку, которая была решена лишь в последнее время применением новых принципов в

конструкции генераторов [8, 15, 16], в связи с чем становится актуальной задача о правильном выборе начальных параметров МК-генератора.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Herlach F. Megagauss magnetic fields // Repts Progr. in Phys. 1968. V. 31, N 1.
3. Herlach F., Knoepfel H. Megagauss fields generated in explosive-driven flux compression devices // Rev. Sci. Instrum. 1965. V. 36, N 8.
4. Herlach F. Flux loss on energy balance in magnetic flux-compression experiments // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N 11.
5. Herlach F., Knoepfel H. Results and limitations of cylindrical flux compression experiments // Proc. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments, Frascati, 1965. Brussels, 1966.
6. Di Gregorio C., Herlach F., Knoepfel H. Simple flux compression devices with a small explosive charge // Ibid.
7. Brin A., Besancon J., Champetier J., et al. Magnetic field compression // Ibid.
8. 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 Field Generation and Related Topics, Washington, 1979. N.Y.; L., 1980.
9. 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 родственными экспериментам, Новосибирск, 1983. М.: Наука, 1984.
10. Pavlovskii A. I., Bykov A. I., Dolotenko M. I., et al. Limiting value of reproducible magnetic field in cascade generator MC-1 // Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. 4th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Santa Fe, 1986. N.Y.; L., 1987.
11. Goto T., Miura N., Nakao K., et al. Megagauss field generation for application to solid state research // Ibid.
12. Erber T., Latal H. G., Kennedy J. E., et al. Analysis of flux compression experiments // Acta Phys. Austr. 1972. V. 36, N 2-4.
13. Trubachev A. M. Effect of flux losses in MC-generator // Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. 4th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Santa Fe, 1986. N.Y.; L., 1987.
14. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М. Ударно-индуцированные волны проводимости в электрофизическом эксперименте // ПМТФ. 1989. № 2. С. 132-145.
15. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М. Ударно-волновые МК-генераторы // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 1983. М.: Наука, 1984.
16. Nagayama K., Mashimo T. Magnetohydrodynamic study of flux compression by the propagation of shock-compressed conductive region in semiconductors // Там же.