

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. М. Кондратенко, Е. Ф. Лебедев, В. Е. Осташев,  
К вопросу об эффективности преобразования энергии  
во взрывном МГД-генераторе, *ТВТ*, 1984, том 22,  
выпуск 2, 407–409

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru  
подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

6 ноября 2024 г., 09:07:59



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Сергеев О. А., Мень А. А.* Теплофизические свойства полупрозрачных материалов. М.: Стандарты, 1977. 288 с.
2. *Stern F. Appl. Opt.*, 1964, v. 3, № 1, p. 111.
3. *Гершуи А. А.* Тр. ГОИ, 1936, т. 11, в. 99, с. 43.
4. *Гершуи А. А.* Избранные труды по фотометрии и светотехнике. М.: Гостехиздат, 1958, 548 с.
5. *Спэрроу Э. М., Сесс Р. Д.* Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 293 с.
6. *Зигель Р., Хауэлл.* Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
7. *Оцисик М. Н.* Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 616 с.

УДК 621.313.522:622.215.2

### К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВО ВЗРЫВНОМ МГД-ГЕНЕРАТОРЕ

*Кондратенко М. М., Лебедев Е. Ф., Осташев В. Е.*

Мощные импульсы электромагнитной энергии могут быть получены во взрывном МГД-генераторе при преобразовании кинетической энергии потока продуктов детонации (ПД) [1].

При подрыве заряда ВВ с запасом химической энергии  $W_{ВВ}$  расширяющиеся холодные ПД проталкивают через МГД-канал электропроводный плазменный сгусток, совершая работу против действующих на сгусток пондеромоторных сил. При работе МГДВ-генератора на нагрузку в ней выделяется энергия  $Q_R$ . Так как полная энергия сгустка составляет лишь малую часть всей энергии взрывного потока, то очевидно, что увеличение эффективности работы МГДВ-генератора возможно при обмене энергией между ПД и ударно нагретым электропроводным газом.

Явление обмена энергией в МГДВ-генераторе обнаружено в [2], где описаны режимы преобразования с направленной передачей энергии от продуктов детонации к плазменному сгустку, взаимодействующему с поперечным магнитным полем.

В [3, 4] на основе проведенных исследований показано, что эффективность преобразования энергии  $\eta = Q_R/W_{ВВ}$  в МГДВ-генераторе зависит, в частности, от специфики процессов сильного (при параметре  $R_m$  магнитогидродинамического взаимодействия порядка единицы) нестационарного взаимодействия электропроводного газа с магнитным полем. Цель данной работы — исследование влияния процесса обмена энергией между продуктами детонации и плазменным сгустком на эффективность преобразования энергии в МГДВ-генераторе.

Экспериментальное исследование проводилось на модели линейного взрывного МГД-генератора ВГ-10 [4], состоящего из МГД-канала сечением  $5 \times 10 \text{ см}^2$  и взрывной камеры. Сплошные медные электроды имели ширину 10 см и длину 1 м. Магнитное поле в канале  $B_0$  изменялось от 0 до 4,4 Т, начальное давление аргона  $p_0 = 0,67\text{--}6,7 \text{ кПа}$ . Использовались заряды гексогена массой 40 г.

Скорость фронта ударной волны на входе в МГД-канал изменялась в пределах 7,5–5,3 км/с (газодинамическое затухание скорости по длине канала не превышало 10% при  $p_0 = 6,7 \text{ кПа}$ ). Длина плазменного сгустка  $l_n$  составляла в среднем 6–10 см, значения магнитного числа Рейнольдса  $Re_m^{l_n}$  и параметра взаимодействия  $R_m$  при  $B_0 = 3 \text{ Т}$  и  $l_n = 8 \text{ см}$ , определенные по длине сгустка и эффективной электропроводности потока, составляли соответственно 0,7–0,9 и  $\approx 0,7$ . Проводились измерения индуцированных токов и напряжений на нагрузке поясами Роговского и делителями напряжений, деформации индуцированного магнитного поля системой магнитных зондов, а также скоростная фоторегистрация плазмы в канале камерой СФР.

Исследование динамики процесса преобразования энергии в генераторе проводилось при вариации параметра  $R_m$  путем изменения величин  $B_0$  и  $p_0$ . Измерения полного индуцированного тока короткого замыкания при увеличении  $B_0$  обнаруживают явление насыщения тока при  $R_m \approx 1$  (рис. 1). При дальнейшем увеличении  $B_0$  форма тока трансформируется и наблюдаются пульсации и рост тока к концу зоны МГД-взаимодействия. Такие нелинейные электродинамические процессы в МГД-канале регистрируются также и магнитными зондами как распады однородного плазменного сгустка на несколько токовых слоев. Фоторегистрация течения плазмы также показывает, что в электропроводном газе при  $R_m \approx 1$  возникают значительные газодинамические возмущения и формируются движущиеся по сгустку зоны с различными значениями температуры и плотности тока. Время развития распадных процессов и связанных с ними токовых пульсаций совпадает с временем нагрева плазмы током (инкремент перегретой неустойчивости) и описывается зависимостью

$$\tau_p \sim \rho_1 u^2 \sigma / j^2 \sim \rho_1 / \sigma B_0^2, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  — плотность ударно нагретого газа. Сильное поперечное взаимодействие токовых зон с магнитным полем приводит к неоднородному распределению плотности газа в сгустке и формированию в нем волн сжатия и разрежения, взаимодействующих с газом ПД на контактной поверхности. Интенсивность этого газодинамического взаимодействия (обмена энергией) зависит прежде всего от значения параметра  $R_m$  и увеличивается при уменьшении длины плазменного сгустка. В процессе обмена энергией между сгустком и поршнем ПД наблюдается рост местной электропроводности потока вследствие быстрого джоулева прогрева газа и локализации тока в узких слоях. (Аналогичные явления наблюдались, по мнению авторов, в [5] — эффект  $T$ -слоя.)

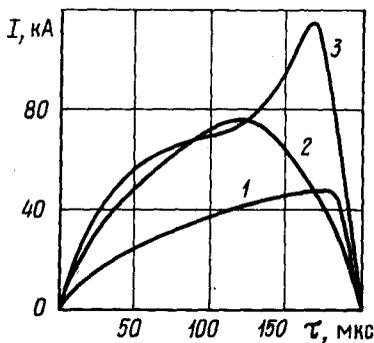


Рис. 1

Рис. 1. Осциллограммы индуцированного тока короткого замыкания в линейном МГДВ-генераторе ВГ-10 (рабочий газ — аргон,  $p_0=0,93$  кПа,  $l_n=6$  см) при различных значениях параметра МГД-взаимодействия: 1 —  $B_0=1,2$  Т и  $R_m=0,11$ ; 2 — 1,7 и 0,23; 3 — 3,0 и 0,70

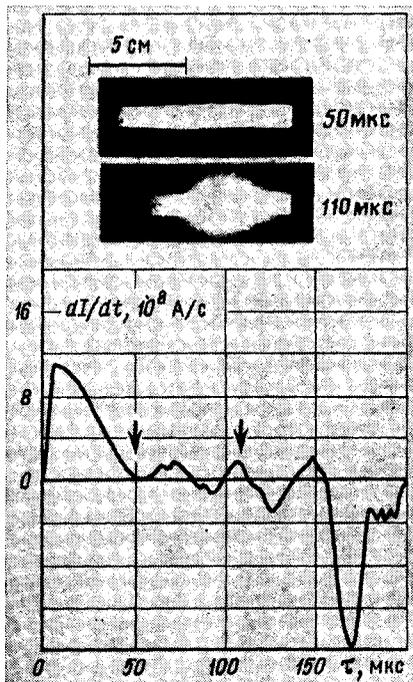


Рис. 2

Рис. 2. Скоростные фотографии плазменного сгустка в МГД-канале и типичная осциллограмма производной тока короткого замыкания в режиме  $B_0=2,3$  Т,  $R_m=0,56$ . Рабочий газ — аргон,  $p_0=0,67$  кПа,  $l_n=10$  см

На рис. 2 показаны типичные фотографии плазменного сгустка при однородном распределении плотности тока в начале МГД-канала ( $\tau=50$  мкс) и с развитым токовым слоем в области контактной поверхности в конце канала ( $\tau=110$  мкс), время возникновения которого соответствует моменту всплеска тока, регистрируемого поясом Роговского. Период токовых пульсаций совпадает с временем распространения звуковых возмущений по плазменному сгустку и составляет в среднем  $\tau_a \approx 50$  мкс. Возникновение и развитие токовых слоев как следствие обмена энергией во взрывном потоке и джоулевой диссипации приводит к увеличению эффективности преобразования энергии холодного поршня продуктов детонации.

Рассмотрим влияние механизма обмена энергией на эффективность МГД-преобразования энергии слоистого потока. Известно [2], что оценка эффективности преобразования может быть получена в случае  $Re_m < 1$  по величине джоулевых потерь в плазме ( $Q_R \approx Q_{дж}$ ) при согласовании генератора с оптимальной нагрузкой ( $k = R_n/R_n + R_i \approx 0,5$ )

$$\eta = \frac{Q_{дж}}{W_{ВВ}} = \int_0^{\tau_0} \sigma E^2 V_n \frac{d\tau}{W_{ВВ}} = \int_0^{\tau_0} \sigma u^2 B^2 (1-k)^2 V_n \frac{d\tau}{W_{ВВ}} \approx \frac{1}{2} Re_m I_n \frac{W_0}{W_{ВВ}}, \quad (2)$$

где  $\tau_0 = l_0/u$  — длительность импульса тока МГДВ-генератора.

Из (2) следует, что определяющее влияние на  $\eta$  оказывает предельно допустимая величина энергии магнитного поля  $W_0 = (B_0^2/2\mu_0) V_0$  в объеме МГД-канала  $V_0$ ,

так как параметр  $Re_m^I$  достаточно консервативен в широком диапазоне измерения  $p_0$  и  $R_m$ .

Оценки критического магнитного поля  $B_0^k$  могут быть получены как в случае преобразования начальной кинетической энергии одного только плазменного сгустка ( $\tau_p \sim \tau_0$ ), так и в случае многократного обмена энергией с толкающим поршнем ПД ( $\tau_p < \tau_0$ ). При условии  $\tau_p \sim \tau_0$  из (1) получаем

$$B_0^k \sim (\rho_1 / \sigma \tau_0)^{1/2} \sim (\rho_1 u / \sigma l_0)^{1/2}, \quad (3)$$

откуда

$$\eta \approx 1/2 Re_m^I W_0^k / W_{ВВ} \approx \rho_1 u^2 V_0 l_0 / W_{ВВ} l_0. \quad (4)$$

В случае многократного обмена (например при  $B_0 > B_0^k$ ) время развития распадных процессов в плазме должно быть порядка времени распространения звуковых возмущений в сгустке  $\tau_a \sim l_0 / a$ , где  $a$  — скорость звука в плазме. Для характерных режимов работы МГДВ-генератора  $u \approx 6-8$  км/с,  $T \approx 10^4$  К,  $a \approx 2$  км/с. Поэтому при  $\tau_p \sim \tau_a$  для  $B_0^k$  получаем предельное значение

$$B_0^k \sim (\rho_1 / \sigma \tau_a)^{1/2} \sim (\rho_1 a / \sigma l_0)^{1/2} \quad (5)$$

и эффективность

$$\eta \approx 1/2 Re_m^I W_0^k / W_{ВВ} \sim \rho_1 u a V_0 / 4 W_{ВВ}. \quad (6)$$

Так как в реальных МГДВ-генераторах  $l_0 \ll l_0$ , то в случае обмена энергией между сгустком и продуктами детонации при  $l_0 / l_0 > u/a$  возможно увеличение эффективности преобразования энергии.

Следует отметить, что возможность уменьшения длины плазменного сгустка  $l_0$  с целью увеличения эффективности преобразования  $\eta$  ограничена влиянием неустойчивости Рэлея — Тейлора на контактной поверхности [6] и необходимостью работы в этом случае с большими магнитными полями в соответствии с (5). С другой стороны, возможность уменьшения  $B_0^k$  при снижении начального давления  $p_0$  также ограничена падением  $\eta$  вследствие уменьшения плотности электропроводности газа  $\rho_1$ .

В качестве примера оценим эффективность преобразования  $\eta^k$  в модели линейного МГДВ-генератора ВГ-10 в режиме с обменом энергией. При использовании 40 г гексогена и начальном давлении аргона  $p_0 = 6,7$  кПа реализуется взрывное течение с параметрами  $\rho_1 \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>,  $u \approx 4,8$  км/с,  $\sigma = 10^3$  Ом<sup>-1</sup>,  $l_0 \approx 5$  см. Для эффективности преобразования при  $V_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> и  $W_{ВВ} = 200$  кДж получаем из (6) оценку  $\eta^k \approx 8\%$ . (В [4] на основе анализа предельной эффективности преобразования энергии в МГДВ-генераторе в модели несжимаемого сгустка, взаимодействующего с поршнем ПД, получена оценка  $\eta^k \approx 6-9\%$ .) Необходимое для достижения такой эффективности магнитное поле, рассчитанное по формуле (5), должно иметь значение  $B_0^k \approx 10$  Т. В связи с этим необходимо отметить, что достижение в МГДВ-генераторах на ударно нагретом газе значений  $\eta \approx 8-10\%$  представляет собой достаточно сложную техническую задачу, так как значения магнитной индукции  $B_0 \approx 8-10$  Т являются, по-видимому, близкими к предельным для сохраняемых систем.

Отметим, что оптимизация МГДВ-генератора по эффективности преобразования энергии  $\eta$  может быть решена путем газодинамической оптимизации взрывного течения по параметру  $\rho_1 u^2$  электропроводного газа и выбором условий МГД-преобразования (5), обеспечивающих экстремальные выходные параметры МГДВ-генератора.

Институт высоких температур  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
29.VI.1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jones M. S., McKinnon C. N., Blackman V. H. Proc. V Symp. Eng. Aspects MHD, Massachusetts, 1964.
2. Asinovskiy E. J., Kuznetsov Yu. A., Lebedev Ye. F. et al. Proc. XV Symp. Eng. Aspects MHD, Philadelphia, May 1976, p. IX — 7.1.
3. Буренин Ю. А., Швецов Г. А. ФГВ, 1975, т. 11, № 3.
4. Asinovskiy E. J., Lebedev Ye. F., Osteshev V. Ye. Proc. VII Int. Conf. MHD Electrical Power Generation, Massachusetts, June 1980, v. 2, p. 605.
5. Керкус Ю. А., Соколов В. С., Трышкина Н. А., Фомичев В. П. ДАН СССР, 1972, т. 211, № 1.
6. Давыдов А. Н., Лебедев Е. Ф., Перков С. А. Препринт № 1-46, М.: ИВТАН СССР, 1979.