

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВЧАТОГО  
ВЕЩЕСТВА МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*Е. Ф. Лебедев, В. Е. Осташев, Г. А. Швецов  
(Москва, Новосибирск)*

**Введение**

Около 25 лет назад осуществлены первые эксперименты по прямому преобразованию энергии взрыва в энергию мощных импульсов электрического тока магнитогидродинамическим методом. Модельная схема такого преобразователя в линейном варианте с кондукционным током изображена на рис. 1.

При подрыве заряда ВВ 1 расширяющиеся практически неэлектропроводные продукты детонации 2 проталкиваются через МГД-канал электропроводный плазменный или металлический сгусток 3. При его движении в поперечном поле  $B$  на электродах 4 канала генерируется разность потенциалов. При наличии внешней электрической нагрузки  $R_2$  в ней выделяется электрическая энергия  $Q_R$ . Отбор энергии от потока сопровождается торможением электропроводного сгустка, а при сильном взаимодействии с магнитным полем наблюдается также торможение неэлектропроводного поршня продуктов детонации. В таком процессе поршень продуктов детонации совершает работу против ponderomotorных сил, действующих непосредственно на электропроводный сгусток.

Импульс электрической энергии во внешней нагрузке  $Q_R$  обеспечен энергией  $W_E$ , освобождающейся при детонации заряда ВВ, и запасом электромагнитной энергии в объеме МГД-канала  $W_0$ , при посредстве которой осуществляется генерация электрической энергии. В соответствии с количеством независимых энергетических параметров, определяющих величину генерируемой энергии  $Q_R$ , введем безразмерные величины  $\eta = Q_R/W_E$  и  $f = Q_R/W_0$ . Первая из них характеризует эффективность преобразования энергии, а вторая, назовем ее коэффициентом генерации электрической энергии, определяет величину  $W_0$ , необходимую для генерации в нагрузку импульса энергии  $Q_R$ . Очевидно, что  $\eta = f \cdot W_0/W_E$ .

Исторически первой схемой эффективного импульсного МГД-преобразователя химической энергии взрывчатого вещества был взрывоманитный или магнитокумулятивный (МК) генератор [1, 2]. В этом генераторе захват и сжатие магнитного потока, созданного в рабочем объеме

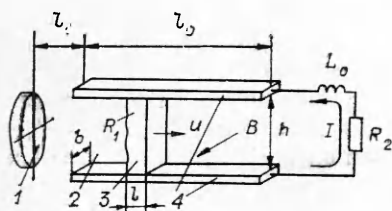


Рис. 1. Схема линейного МГД-преобразователя.

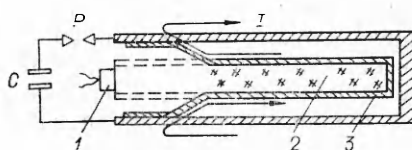


Рис. 2. Схема плоского МК-генератора.

1 — детонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — металлическая кассета.

при разрядке батареи конденсаторов, осуществляются металлическим лайнером, ускоряемым при взрыве заряда ВВ (рис. 2). Сочетание высокой электропроводности металлического лайнера с тем, что продукты детонации совершают работу на ранней стадии расширения, обуславливает высокие значения выходных параметров МК-генераторов [3, 4]: электрический ток в нагрузке составляет  $\approx 3 \cdot 10^8$  А (четыре МК-320 на одну нагрузку); магнитное поле в индуктивной нагрузке  $\approx (10 \div 100)$  Т; коэффициент генерации энергии в схеме с захватом магнитного потока  $\sim 10^6$ ; эффективность преобразования химической энергии взрывчатого вещества в электромагнитную энергию  $\approx (20 \div 30)\%$ ; мощность выделения энергии  $\approx 5 \cdot 10^{11}$  Вт (без коммутации нагрузки); весогабаритные характеристики устройства  $\approx 100$  Дж/см<sup>3</sup>,  $\approx 10^7$  Вт/см<sup>3</sup>,  $\approx 50$  Дж/г.

Основной недостаток, затрудняющий использование МК-генераторов в широкой практике электрофизического эксперимента, состоит в полной уничтожаемости устройства в каждом пуске.

В отличие от магнитокумулятивного, взрывной импульсный МГД-генератор является сохраняемым преобразователем энергии взрывчатого вещества. Сохраняемость конструкции обеспечивается умеренными значениями начального магнитного поля в МГД-канале (5—8 Т) и высокой степенью расширения продуктов детонации. Удельные энергетические характеристики устройства при этом ухудшаются до 2—5 Дж с 1 см<sup>3</sup> рабочего объема МГД-канала, а удельная мощность — до  $10^4$ — $10^5$  Вт/см<sup>3</sup> [5, 6]. Уменьшение удельных параметров — необходимая плата за новое эксплуатационное качество — неразрушаемость конструкции взрывного МГД-генератора, позволяющее, в частности, реализовать частотно-периодический режим его работы.

#### Некоторые результаты расчетных исследований моделей импульсного МГД-преобразователя

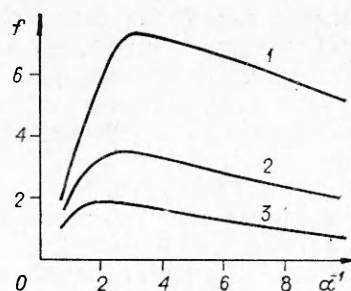
Начнем изложение этих вопросов с рассмотрения таких режимов течения, когда электропроводная среда практически не претерпевает деформаций и торможения вследствие магнитогидродинамического воздействия. В такой постановке  $\eta \rightarrow 0$  и параметром, характеризующим энергетические свойства преобразователя, является коэффициент генерации  $f$ .

В работе [7] рассматривалось движение с постоянной скоростью недеформируемой проводящей жидкости в МГД-канале со сплошными электродами, замкнутыми накоротко на входе и выходе. В предположении равенства индуцированных токов в обеих нагрузках<sup>1</sup> получено распределение магнитного поля вдоль области воздействия. Если магнитное число Рейнольдса потока  $Re_m = \mu_0 \sigma u l \gg 1$  ( $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma$  — электропроводность плазмы), то магнитное поле на входе в канал полностью вытесняется ( $B = 0$ ), а на выходе из канала удваивается ( $B = 2B_0$ ). В этом случае пондеромоторное давление, действующее на поток, достигает экстремальной величины, равной  $2B_0^2/\mu_0$ . Мощность преобразования кинетической энергии потока ограничена величиной  $2B_0^2 \cdot u/\mu_0$ , а энергия, отбираемая от потока за время его пролета МГД-канала, — величиной  $4W_0$ .

На той же модели в работе [9] рассматривались вопросы генерации электрической энергии во внешнюю омическую нагрузку, включенную на входе и выходе из электродной системы. Показано, что при наличии электрической нагрузки полное вытеснение магнитного поля на входе в канал и реализация в нагрузке максимальной энергии  $4W_0$  достигаются только в идеально секционированной электродной системе при условии, что  $Re_m(1 - K) \gg 1$  ( $K$  — коэффициент нагрузки).

<sup>1</sup> Данное предположение, строго говоря, не корректно и приводит к ошибочным оценкам величин мощности и энергии, переданной в нагрузку (подробнее см. [8]).

Рис. 3. Зависимость коэффициента генерации энергии  $f$  от  $\alpha^{-1}$  для  $N=50$  (1), 20 (2), 10 (3) [13].



В работах [10, 11] энергетические характеристики взрывного генератора определялись с использованием результатов, полученных в [7]. Однако в работах [7, 9] решалась стационарная задача, а взрывной импульсный МГД-генератор — система существенно нестационарная.

Другой подход к анализу энергетических характеристик импульсного МГД-преобразователя сформулирован в [12]. Поскольку во взрывном генераторе  $l \ll l_0$  (см. рис. 1) и электропроводный сгусток по предположению недеформируем, задача может быть сведена к рассмотрению модели со сосредоточенными параметрами. Из уравнения, описывающего изменение магнитного потока в схлопывающемся контуре  $R_1$  — электрод —  $L_0$  —  $R_2$  — электрод, получена зависимость электрического тока в контуре от времени, параметра  $\alpha = R_2/\mu_0 u$  и отношения  $N$  начальной индуктивности канала генератора к конечной индуктивности системы  $L_0$ .

В работе [12] показано, что при  $Re_M \gg 1$  в омической нагрузке за время взаимодействия  $l_0/u$  выделяется энергия, максимум которой достигается при  $\alpha = 0,5$  и равен  $W_0 \cdot \ln N$ . Отмечается, что оптимальная величина энерговыделения во внешнюю цепь возрастает при увеличении во времени сопротивления внешней нагрузки, которое может осуществляться, в частности, вследствие ее джоулева разогрева.

В работах [8, 13] рассматривалась та же модель преобразователя. Однако более точный и последовательный анализ привел авторов к выводу, что в импульсном МГД-преобразователе энергия, переданная в омическую нагрузку, может существенно превысить значения, полученные в [12]. Показано, что для фиксированного коэффициента перестройки  $N$  существует оптимальное  $\alpha = (R_1 + R_2)b/\mu_0 u h$ , при котором генерируемая энергия достигает максимума (рис. 3).

В работе [8] указывается, что процесс развития электрического тока в нагрузке может быть представлен происходящим в две стадии. В первой ток генерируется при движении электропроводного сгустка в электродной системе. Во второй электромагнитная энергия, запасенная в индуктивности  $L_0$  к концу первой фазы, диссипируется на внешнем сопротивлении  $R_2$ . Отмечается, что наиболее эффективное преобразование энергии толкающего поршня в электрическую энергию имеет место, когда в первой фазе процесс осуществляется при  $\alpha \ll 1$ , а во второй — при  $\alpha \gg 1$ .

В [14] приводится описание метода расчета магнитокумулятивных генераторов, позволяющего устанавливать такую зависимость между параметрами цепи генератора, при которой в омической цепи, изменяющейся во времени, происходит выделение максимальной энергии. Выводы этой части работы сходны с выводами [12].

В работе [15] утверждается, что лучшим с точки зрения эффективности преобразования местом подключения внешней электрической нагрузки является выход электродной системы. В этом случае устройство в течение всего времени процесса МГД-взаимодействия работает с отрицательным реактивным сопротивлением, а индуцированное магнитное поле оказывает подмагничивающее воздействие, поскольку совпадает по направлению с начальным магнитным полем. На этот вывод ссылаются авторы [8] при выборе места подключения нагрузки.

В [16] предельные возможности импульсного МГД-преобразователя по генерации электрической энергии в омическую нагрузку исследовались средствами вариационного анализа, что позволило авторам обобщить многочисленные решения этой задачи. В работе показано, что

оптимальное управление преобразователем осуществляется с применением ключа, размыкающего замкнутую вначале внешнюю нагрузку по истечении некоторого времени  $t^*$  от начала процесса. Получены соотношения, определяющие оптимальную связь между  $t^*$  и величиной внешней нагрузки. Показано, что при симметричном подключении внешней нагрузки (на входе и выходе из канала) предельный уровень энергии, генерируемый устройством, превышает тот, который реализуется при подключении нагрузки только на выходе из электродной системы. Так, например, при  $Re_M \gg 1$  и коэффициенте перестройки  $N \approx 10$  (отметим, что для взрывного МГД-генератора характерны, по-видимому, значения  $N \leq 10$ ) максимальная энергия, генерируемая во внешнюю омическую нагрузку за время пролета электропроводным сгустком МГД-канала, составляет  $\sim 2W_0$ . Использование размыкателя внешней нагрузки и симметричное ее подключение позволяют при тех же условиях реализовать абсолютный экстремум энергии в нагрузке, равный  $W_0N$ .

В работе [17] осуществлена систематизация оптимальных режимов работы импульсного МГД-преобразователя (в модели со сосредоточенными параметрами при постоянной скорости движения недеформируемого электропроводного сгустка) в зависимости от магнитного числа Рейнольдса, характера и величины внешней нагрузки.

В [18] в развитии выводов, сделанных в [16], показано, что для взрывных МГД-генераторов с плазменным электропроводным сгустком при  $Re_M \leq 1$  применение ключа во внешней нагрузке нецелесообразно ввиду значительных джоулевых потерь в плазме. По этой же причине энергия, генерируемая устройством во внешнюю омическую нагрузку, не превышает значения  $0,6 W_0$ , а реализация энергии, накопленной к концу взаимодействия в индуктивности  $L_0$  внешней цепи, практически нецелесообразна, так как не превышает  $0,06 W_0$ . Из сказанного следует, что взрывной МГД-генератор должен разрабатываться как источник периодического действия не только потому, что является источником сохраняемым, но и потому, что единственный импульс энергии не воспроизводит затрат на создание магнитного поля. По данным, содержащимся в [18], ни в одном из экспериментов с моделями взрывных генераторов, течение электропроводного газа в которых характеризуется значением  $Re_M \leq 1$ , не была превышена выходная энергия  $0,6 W_0$ .

#### **Эффективность преобразования химической энергии ВВ в импульсном МГД-устройстве**

В первых расчетных работах [15, 19, 20] изучение этих вопросов проводилось, в основном на линейных моделях, описанных выше, с тем отличием, что снималось условие постоянства скорости электропроводного сгустка. При этом дифференциальное уравнение для электрического тока дополнялось уравнениями для скорости и координаты центра масс рабочего тела, а эффективность преобразования  $\eta$  определялась, как отношение генерируемой энергии к начальной кинетической энергии  $W_k$  электропроводного сгустка.

В работе [19] подробно исследовалась система основных уравнений, описывающих работу импульсного МГД-преобразователя, однако конкретных решений не приведено. Отмечается, что в широком диапазоне комбинаций начальных данных (числа  $Re_M$ , коэффициента нагрузки  $K$ ,  $W_0/W_k$ ) можно полностью преобразовать кинетическую энергию рабочего тела. В обсуждении результатов сделан вывод, что наиболее существенные погрешности постановки связаны с пренебрежением газодинамическими процессами, благодаря которым информация о взаимодействии передается от проводящего фронта к неэлектропроводному толкающему газу.

Авторам [15] удалось получить аналитическое решение задачи и подробно его исследовать при вариации коэффициента нагрузки и отношения времени импульса  $t_k$  к времени торможения  $t_r$  электропроводного сгустка. При увеличении  $t_k/t_r$   $\eta$  монотонно возрастает, оптимальное

значение  $K$  смещается от 0,5 к единице. Ясно, что при  $K = 1$ , когда диссипация электромагнитной энергии локализована во внешней цепи, может быть достигнуто значение  $\eta = 1$ .

В работе [20] отмечается, что оптимизация импульсного МГД-преобразователя должна строиться таким образом, чтобы одновременно достигались высокие значения  $\eta = Q_R/W_E$  и  $f = Q_R/W_0$ . При малых  $\eta$  приходится работать с большими зарядами ВВ; при малых  $f$  для получения нужных значений  $Q_R$  необходимо использовать громоздкие источники начальной магнитной энергии. В работе показано, что для исследуемой модели преобразователя при увеличении  $\eta$  от 0 до 1  $f$  монотонно уменьшается и зависит от коэффициента перестройки индуктивности и характера изменения во времени сопротивления нагрузки.

Первым исследованием, в котором применительно к импульсному взрывному МГД-генератору учитывалась роль толкающего неэлектропроводного газа, была работа [21]. В ней предполагалось, что электропроводный сгусток невесом, несжимаем, имеет постоянную длину и электропроводность. Траектория движения сгустка определялась воздействием на него пондеomotorной силы, с одной стороны, и неэлектропроводного толкающего газа — с другой. Описание электродинамической части соответствовало [7]. Торможение электропроводного сгустка сопровождалось перестройкой газодинамических параметров на контактной поверхности. Возмущение параметров в толкающем поршне распространялось вверх по потоку от контактной поверхности в виде волны сжатия, которая в зависимости от интенсивности МГД-взаимодействия могла трансформироваться в ударную волну. Это возмущение вовлекает во взаимодействие с магнитным полем неэлектропроводный газ продуктов детонации.

Авторами [22] рассматривалась сходная по постановке задача. Высокоскоростной газовый поток с ударной волной (число Маха фронта  $M \sim 20$ ) генерировался при разлете сильно сжатого и нагретого слоя совершенного газа, параметры которого устанавливались при мгновенной детонации некоторой массы взрывчатого вещества. В отличие от [21], электродинамическая часть задачи построена на основе закона изменения магнитного потока. Газ за фронтом ударной волны считался совершенным, электропроводность его — спитцеровской. Особенность результата решения задачи состоит в следующем. Если  $Re_M$ , определяемое по параметрам электропроводного сгустка на входе в электродную систему, мало и разогрев сгустка индуцированным током незначителен, интенсивность МГД-взаимодействия мала. Это выражается в малом уровне выделенной во внешнем сопротивлении электрической энергии ( $f \sim \sim Re_M$ ) и отсутствии глубоких перестроек параметров толкающего газа (отраженная ударная волна не формируется). Если же осуществляется перегрев [23] электропроводного сгустка, процесс взаимодействия интенсифицируется: достигается  $Re_M \simeq 1$ , в толкающем газе формируется отраженная ударная волна, эффективность преобразования энергии газа, вовлеченного во взаимодействие, значительно возрастает. Следует отметить, что в обоих вариантах решения задачи полная эффективность преобразования не превышала 1%, поскольку за время процесса во взаимодействие вовлечена малая пространственная часть толкающего газового поршня.

В работе [18] исследованы свойства импульсного МГД-преобразователя на примере квазистационарной модели. На основе представлений о механизме преобразования энергии неэлектропроводного потока предложен следующий подход к определению полной эффективности преобразования энергии через эффективности отдельных стадий процесса. Электрическая энергия, выделяющаяся во внешней нагрузке, составляет некоторую часть  $\eta_1$  работы, совершаемой потоком против пондеomotorных сил. Неэлектропроводный газ, вовлеченный во взаимодействие, на совершение этой работы затрачивает некоторую часть  $\eta_2$  своей полной энергии. Отношение этой энергии к полной внутренней энергии всего

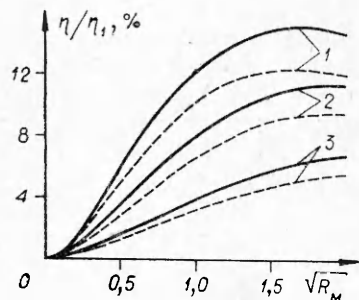


Рис. 4. Зависимость эффективности преобразования энергии потока от параметра МГД-взаимодействия  $R_M$  для различных чисел Маха и относительных длин разгонного участка [18].

$l_1/l_0$ : 1 — 0, 2 — 1, 3 — 4. —  $M=10$ ; - - -  $M=5$ .

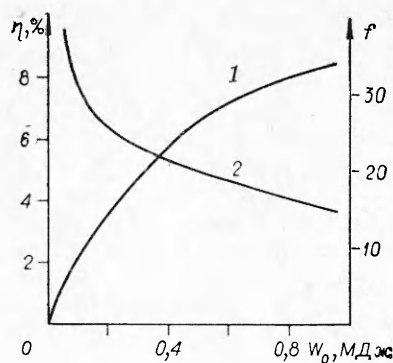


Рис. 5. Зависимость эффективности преобразования энергии  $\eta$  (1) и коэффициента генерации  $f$  (2) от величины начальной электромагнитной энергии в рабочем объеме спирального генератора МК-320 [24].

потока характеризует эффективность  $\eta_2$  вовлечения неэлектропроводного газа во взаимодействие. Полная внутренняя энергия потока, в свою очередь, составляет только часть  $\eta_1$  энергии, освобождающейся при детонации заряда ВВ. Таким образом, полная эффективность преобразования энергии  $\eta$  может быть представлена в виде  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$ .

В обсуждении результатов решения задачи в работе [18] отмечается:

1) для любого значения параметра МГД-взаимодействия  $R_M$ , определяемого по скорости и плотности неэлектропроводного газового поршня, генерируемая во внешнюю нагрузку электрическая мощность не превышает 20% мощности газового потока;

2) коэффициент  $\eta_3$ , характеризующий способность неэлектропроводного газа совершать работу против поперечных сил, не превышает значения 0,5. Максимум  $\eta_3$  достигается при  $R_M \approx 1$ ;

3) при увеличении относительной длины разгонного участка  $l_1/l_0$  (см. рис. 1) для фиксированных значений  $R_M$   $\eta$  уменьшается, поскольку увеличивается пространственная часть газа, не вовлеченная во взаимодействие (рис. 4);

4) мощность генератора, оптимизированного по  $\eta$ , почти на порядок меньше величины, реализуемой в режиме с  $\eta \approx 0$ , т. е. при  $R_M \ll 1$ ;

5) при увеличении  $\eta$  коэффициент генерации  $f$  уменьшается (аналогичный результат получен в экспериментах с МК-генераторами [24]) (рис. 5);

6) если максимальное значение КПД взрывной камеры  $\eta_1$  оценить величиной 40—60% [13, 25], то предельное значение эффективности преобразования химической энергии заряда ВВ в электрическую в линейной схеме взрывного импульсного МГД-генератора должно составлять 6—9%.

На основе полученных результатов в [18] впервые сформулированы необходимые условия реализации экстремальных значений эффективности преобразования энергии неэлектропроводного газа в импульсном МГД-преобразователе:  $W_0/W_E \sim 1$ ,  $R_M \approx 1$ , относительная длина участка формирования потока  $l_1/l_0 \approx 0$ , внешняя электрическая нагрузка генератора оптимальна.

Более совершенные математические модели взрывного МГД-преобразователя исследуются в [26, 27]. В этих работах решается задача о радиальном разлете заряда конденсированного ВВ, инициируемого вдоль оси, и последующем аксиально-симметричном расширении потока газа с ударной волной в однородном осевом магнитном поле. Уравнения радиационной магнитной гидродинамики, описывающие одномерные дви-

жения газа, решаются численно. В [27] показано, что в отсутствие магнитного поля учет излучения слабо влияет на характер течения в целом, однако существен при вычислении температуры (а следовательно, и электропроводности) ударно-нагретого газа. При торможении потока в магнитном поле индуцированный электрический ток локализуется вблизи границы продуктов детонации, а не распределен по всей ширине электропроводного слоя. Основываясь на данных, приводимых в работах [26, 27], можно показать, что в расчетных моделях цилиндрических взрывных генераторов достигаются высокие значения эффективности преобразования энергии взрыва в электромагнитную энергию, составляющие 40—60%.

Во всех рассмотренных выше моделях предполагалось, что в процессе МГД-взаимодействия электропроводная среда сохраняет устойчивость. Однако в действительности поперечное воздействие на среду приводит к ее деформации, что определенным образом влияет на эффективность преобразования энергии. Рассмотрим для иллюстрации некоторые примеры.

В работах [28, 29] описаны результаты исследования взаимодействия сжимаемого электропроводного газа с поперечным магнитным полем при  $Re_M \ll 1$ . В них показано, что при достижении условия  $R_M \simeq 1$  в потоке электропроводного газа формируется отраженная ударная волна (волна торможения). Заторможенный при переходе через эту волну газ частично шунтирует внешнюю электрическую нагрузку.

Иначе осуществляется процесс взаимодействия, если значительной оказывается также и деформация поперечного магнитного поля ( $Re_M \sim 1$ ). В потоке слабоионизованного газа вследствие перегретой неустойчивости возникает область с высокой электропроводностью, которая в дальнейшем определяет динамику взаимодействия всего потока с магнитным полем. Этот слой, образовавшись, проталкивается менее электропроводным потоком через поперечное магнитное поле, чем обеспечивается диссипация энергии в слое, поддерживающая его существование. Это высокотемпературное самоподдерживающееся образование получило название температурных слоев (Т-слоев) и достаточно подробно исследовано как теоретически [30, 31], так и в эксперименте [32, 33]. Образование Т-слоев в потоке слабопроводного газа позволяет интенсифицировать процесс МГД-взаимодействия и тем самым увеличить эффективность преобразования энергии потока.

При увеличении плотности энергии, диссипируемой в Т-слое, возможна реализация таких режимов, когда Т-слой теряет устойчивость и распадается на несколько слоев [34]. Процесс размножения Т-слоев приводит к ограничению уровня взаимодействия движущегося потока с магнитным полем в сравнении с тем уровнем, который мог быть достигнут при локализации диссипируемой в канале энергии в единичном слое.

Анизотропия МГД-взаимодействия, обусловленная эффектом Холла, при  $R_M \simeq 1$  также приводит к ограничению эффективности преобразования энергии потока [35, 36] (происходит отрыв потока от анода и как следствие этого — размыкание цепи протекания электрического тока).

Во взрывном МГД-генераторе толкающий неэлектропроводный поршень продуктов детонации имеет массовую плотность, на 2—3 порядка превышающую плотность ударно-нагретого газа. При торможении электропроводного сгустка в магнитном поле на контактной поверхности создаются условия для развития неустойчивости Релея — Тейлора, приводящей к значительному уменьшению электропроводности ударно-нагретого газа вследствие его перемешивания с продуктами детонации [37].

Как отмечается в работе [38], предельные возможности плоского МК-генератора по преобразованию энергии определяются не только потерями магнитного потока из-за диффузии магнитного поля в проводник, но и процессом захвата потока в короткозамкнутых полостях, образу-

ющихся при смыкании неровных поверхностей проводников. Искривление поверхностей проводников проявляется при таких величинах магнитных полей, когда давление магнитного поля превосходит предел их прочности.

Таким образом, приведенные примеры указывают на несовершенство существующих расчетных моделей, описывающих работу импульсного взрывного генератора, и важность учета реальных процессов, определяющих эффективность преобразования энергии.

### Экспериментальные исследования взрывных МГД-генераторов

Первые сведения о создании взрывных МГД-генераторов мощных импульсов электрического тока содержались в работе [39]. В ней отмечалось, что взрывной генератор является сохраняемым, компактным устройством, допускающим многократное использование. Достоинства генератора: высокие удельные параметры импульса энергии во внешней нагрузке ( $\sim 1$  Дж/см<sup>3</sup>,  $10^4$ — $10^5$  Вт/см<sup>3</sup>), простота устройства, возможность длительного хранения, работы в периодическом режиме при смене зарядов, практически мгновенная готовность к действию. В 1967 г. импульсный взрывной МГД-генератор запатентован в США [40].

Первые систематические исследования таких генераторов осуществлены фирмой MHD, Research I пс. В работах [5, 41, 42] представлены результаты экспериментов на трех установках различного масштаба. Максимальные значения мощности электрического импульса в нагрузке (280 МВт), эффективности (1,6%) и тока (430 кА) получены на установке с габаритами канала  $20 \times 15 \times 78$  см при начальном магнитном поле 2,8 Т.

При детонации заряда гексогена с плотностью  $1,7$  г/см<sup>3</sup> и разлете продуктов детонации в ударной трубе, заполненной рабочим газом (воздух, аргон, гелий), генерируется поток с ударной волной, скорость фронта которого достигает значений  $10$ — $12$  км/с при начальном давлении рабочего газа  $1$ — $10$  торр [5]. Таким образом, при длине электродов МГД-канала  $1$  м длительность импульса тока в нагрузке составляет около  $10^{-4}$  с.

В работах [10, 43] исследовалось влияние способов создания высокоскоростного потока, эффективно взаимодействующего с магнитным полем в МГД-канале. Опробованы заряды ВВ различного физического состава и формы, в том числе заряды, близкие к кумулятивным. В экспериментах показано, что лучшие результаты по генерации электрической энергии достигаются при внесении в заряд ВВ легкоионизирующейся присадки. В результате оптимизации способа внесения присадки, ее количества и формы заряда установлено, что оптимальным с точки зрения мощности генератора является плоский заряд с нанесением присадки на его поверхность, обращенную к рабочему объему. Оптимальное количество присадки —  $1,5$ — $2\%$  массы заряда.

Исследование пространственной структуры электропроводности потока показало, что в головной части практически неэлектропроводных продуктов детонации располагается слой электропроводного газа ( $\sigma \approx \approx 10^3$  См/м) длиной  $1$ — $2$  см [5, 10].

В опытах по генерации электрической энергии проводилась оптимизация величины омической нагрузки и места ее присоединения к электродам МГД-канала. Подключение нагрузки на выходе из канала оказалось наиболее предпочтительным [5]. При оптимизации устройств различного масштаба по величине нагрузки обнаружено, что в оптимальных режимах выполняется соотношение  $R_2(b/h) \approx 5$ — $6$  мОм [41]. В работе [5] намечены пути повышения эффективности преобразования энергии во взрывном МГД-генераторе: увеличение начального магнитного поля  $B_0$  и длины канала, более полное использование энергии, освобождающейся при детонации заряда ВВ.



Важными с точки зрения возможностей практического использования взрывного МГД-генератора явились эксперименты, в которых осуществлена запитка импульсных ламп подсветки, используемых для накачки лазеров [44].

В работе [43] описаны опыты по получению серии импульсов при подрыве зарядов с частотой 90 Гц. Эксперименты показали, что уже во втором импульсе энергия, выделяющаяся в нагрузке, была на порядок меньше энергии первого импульса. Авторы считают, что этот эффект объясняется не загрязненностью канала после первого импульса, а тем, что в паузе между импульсами не удавалось откачать рабочий объем до давления, близкого к начальному.

В работе [45] сообщалось о том, что на основе проведенных исследований осуществлена комплексная разработка взрывного генератора, включающего взрывную камеру, канал, вакуумное оборудование, системы подрыва, перезарядки и магнита. Выполнены предварительные оценки весогабаритных характеристик генераторов на полезную энергию 0,2–1 МДж. Результаты анализа в статье не приводятся.

Изучение процессов преобразования энергии во взрывном генераторе получило дальнейшее развитие в работах [11, 21, 46]. По мнению авторов, применение взрывного МГД-генератора окажется практически целесообразным при следующих условиях:

- получение эффективности преобразования энергии около 8%;
- обеспечение эффективной работы генератора при давлении в канале около  $10^5$  Па.

Аналитические исследования, выполненные в этих работах, показали, что при достижимых в настоящее время значениях индукции магнитного поля генератор может удовлетворительно работать без дорогого вакуумного оборудования в атмосфере остаточных газов различных составов (в том числе и продуктов детонации) при быстрой готовности к повторному пуску.

Экспериментальная проверка части выводов осуществлена на макете, предназначенном для проведения прочностных испытаний конструкции генератора. Макет представлял собой две трубы диаметром 0,46 и длиной 1,5 м. Между этими трубами встык монтировалась взрывная камера в виде стального кольца. В опытах с зарядами массой 1 кг, разлет которых происходил в рабочий газ при начальном давлении  $\sim 10^5$  Па, показано, что конструкция ударной трубы допускает многократное использование, а скорость генерируемого потока ( $\sim 5$  км/с) достаточна для организации эффективного взаимодействия его с поперечным магнитным полем в МГД-канале.

Опыты по генерированию электрической энергии проведены на модели двойного линейного МГД-генератора с симметричным разлетом продуктов детонации (рис. 6). Корпуса секций канала выполнены из стали и облицованы изнутри пластмассой. Использовался заряд массой 0,1 кг. Присадка  $CsNO_3$  наносилась на поверхность (2,5 г) и в объем заряда (5 г). В таблице, взятой из работы [21], представлены результаты пяти пусков для одной из секций канала генератора. В трех пусках коэффициент преобразования химической энергии заряда ВВ превысил 4%. Максимальное зарегистрированное значение энергии, выделившейся в нагрузке, — 11,8 кДж, мощности — 200 МВт.

Разлет продуктов детонации в этих экспериментах не симметричен, так как генератор плоской волны, обеспечивавший инициирование, устанавли-

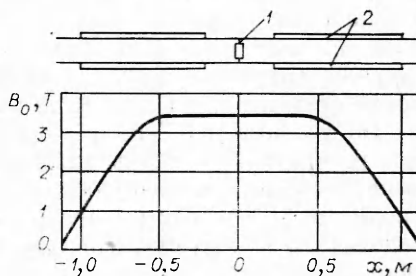


Рис. 6. Схема двойного линейного МГД-генератора [11, 21].

1 — заряд ВВ; 2 — электроды МГД-канала.

Номер опыта	Рабочий газ	Начальное давление, торр	Масса заряда, кг	Нагрузка, МОм	$\eta$ , %
14	He	3,0	0,1	8,42	5,7
15		2,5	0,1	8,22	4,1
16	80% Ar+20% He	3,5	0,1	4,89	4,3
17		270	0,14	8,22	0,8
19		3,9	0,1	8,22	1,1

вался на одну из поверхностей заряда, а не в плоскости его симметрии. Вследствие этого характеристики одной секции канала оказались заметно хуже характеристик другой секции (в таблице приводятся лучшие результаты). В этой связи необходимо отметить, что приводимые авторами [21] значения эффективности преобразования завышены вдвое, так как при вычислении  $\eta$  в расчет принималась только половина массы заряда ВВ.

Единичный эксперимент при начальном давлении, близком к атмосферному (см. таблицу, опыт 17), не дает оснований для утверждения, что при увеличении начального давления эффективность преобразования энергии резко ухудшается, тем более, что в работе не содержится указаний на близость нагрузки (8,22 мОм) к оптимальной. Важность оптимизации нагрузки наглядно иллюстрируется при сопоставлении опытов 14, 16 и 19.

В работе [18] изложены результаты экспериментального исследования процессов, определяющих эффективность преобразования энергии во взрывном МГД-генераторе. Модель линейного генератора ВГ-10 состояла из стеклотекстолитового МГД-канала постоянного сечения ( $5 \times 10$  см) и сохраняемой взрывной камеры. Сплошные медные электроды канала имели длину 1 м и ширину 10 см. Магнитное поле однородно по всей длине области взаимодействия и достигало величины 5,3 Т.

В части опытов электропроводность потока обеспечивалась стужком ударно-нагретого газа ( $l \approx 3$  см) за фронтом ударной волны ( $U \approx 7,5$  км/с). Температура, давление и электропроводность газа составляли соответственно 15 800 К, 580 кПа,  $1,2 \cdot 10^4$  См/м, параметры Холла и МГД-взаимодействия  $R_M$  при  $B_0 = 1$  Т — 0,03 и 0,44. Магнитное число Рейнольдса  $Re_M \approx 3$ . Таким образом, в установке достигнуты условия, при которых возможна реализация МГД-взаимодействия с заметной трансформацией поля газодинамических и электродинамических параметров.

При исследовании зависимости предельного индуцированного тока от величины начального магнитного поля  $B_0$  обнаружено насыщение тока при полях, соответствующих  $R_M \geq 0,5$  (рис. 7, 2). В режимах с насыщением фоторегистрограммы потока регистрировали распад электропроводного стужка на слои, которые отмечены также в пространственном распределении плотности электрического тока.

Исследование структуры возмущения потока в целом как результата его взаимодействия с магнитным полем показало, что токовая зона совпадает с зоной свечения и располагается внутри области, охваченной возмущением давления (рис. 8). Этот факт является иллюстрацией модели механизма преобразования энергии потока во взрывном МГД-генераторе, согласно которой во взаимодействие с магнитным полем вовлекается неэлектропроводный газ продуктов детонации.

На установке ВГ-10 проводились также исследования работы взрывного генератора, когда электропроводность головной части потока обеспечивалась легкоионизирующейся присадкой нитрата цезия, наносимой в количестве 2% массы заряда на его торцевую поверхность. Чтобы сосредоточить электропроводность потока в слое продуктов детонации с присадкой, в качестве рабочего газа выбран воздух при начальном давлении 5 торр. При этом скорость фронта ударной волны, как и в опытах с

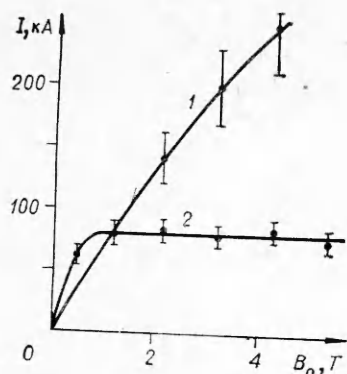


Рис. 7. Зависимость предельного индуцированного электрического тока от величины приложенного магнитного поля [18].

1 — воздух,  $p=5$  торр (заряд ВВ с присадкой  $\text{CsNO}_3$ ); 2 — аргон,  $p=5$  торр.

аргоном, равнялась 7,5 км/с, длина электропроводного слоя газа  $\sim 3$  см. Авторы [18] считают, что ионизация присадки осуществляется термически при перемешивании газов на контактной поверхности вследствие неустойчивости Релея — Тейлора, а также электронной теплопроводности с поверхности ударно-нагретого газа.

Исследования зависимости тока короткого замыкания от величины приложенного магнитного поля  $B_0$  показали, что предельный индуцированный ток возрастал почти линейно при изменении  $B_0$  до 4,3 Т и достигал 250 кА (см. рис. 7, 1), что втрое превышало предельный ток в опытах с аргонем без присадки. Полученный результат авторы объясняют более высокой массовой плотностью электропроводного сгустка продуктов детонации в сравнении с ударно-нагретым газом, вследствие чего равные значения параметра МГД-взаимодействия  $R_m \sim B_0^2 / \rho$  достигаются при различных значениях магнитного поля.

В заключительной части работы [18] приводится зависимость эффективности преобразования энергии  $\eta$  от отношения  $W_0/W_E$  (рис. 9), построенная по совокупности всех экспериментальных результатов, полученных при исследовании линейных моделей импульсных взрывных МГД-генераторов подобного типа. Анализируя характер этой зависимости, авторы делают вывод о возможности достижения в линейном устройстве  $\eta \approx 4 \div 5\%$  при  $W_0/W_E \approx 30 \div 50\%$ . При этом отмечается, что электрическая энергия, генерируемая в нагрузку, составит лишь десятую часть магнитной энергии  $\bar{W}_0$ , при посредстве которой осуществляется преобразование энергии, освобождающейся при детонации заряда ВВ.

В работе [13] анализируется вопрос о том, является ли оптимальным с точки зрения использования во взрывном МГД-генераторе способ создания потока газа, который использован в экспериментах, описанных выше. В качестве альтернативы предлагаются способы получения высокоскоростных потоков ионизированного газа на основе различных схем кумуляции энергии. Показано, что взрывная ударная труба с цилиндрическим кумулятивным трубчатом зарядом ВВ производит при начальном давлении рабочего газа  $\sim 10^5$  Па поток продуктов детонации с характерной скоростью 10 км/с, электропроводностью более  $10^4$  См/м и кинетической энергией до 40% энергии детонации заряда (рис. 10). Эти параметры значительно превышают аналогичные для течений, получаемых при разлете плоского заряда ВВ с присадкой.

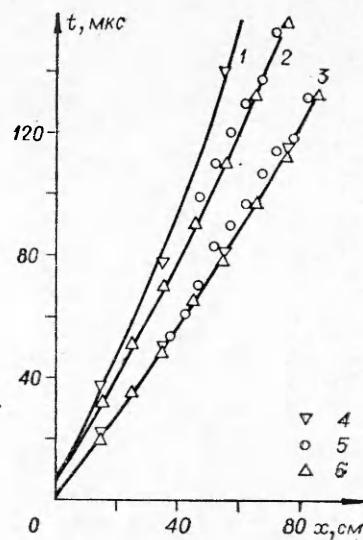


Рис. 8. Пространственно-временная диаграмма движения характерных фронтов течения в МГД-канале установки при  $B_0=3,2$  Т [18].

1 — фронт волны торможения; 2 — контактная поверхность; 3 — фронт ударной волны; 4 — данные по датчикам давления; 5 — по индукционным магнитным зондам; 6 — по фоторегистратору.

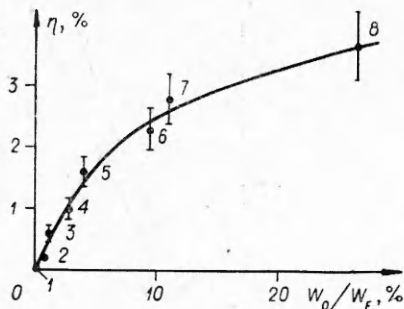


Рис. 9. Эффективность преобразования химической энергии ВВ в линейных моделях взрывных МГД-генераторов [18].

1 — [6]; 2 — [5], канал  $2,5 \times 2,5 \times 46$  см; 3 — [18]; 4 — [5], канал  $2,5 \times 10 \times 46$  см; 5 — [42]; 6 — [18];  $B_0 = 3,2$  Т; 7 — [21]; 8 — [18],  $B_0 = 5,3$  Т.

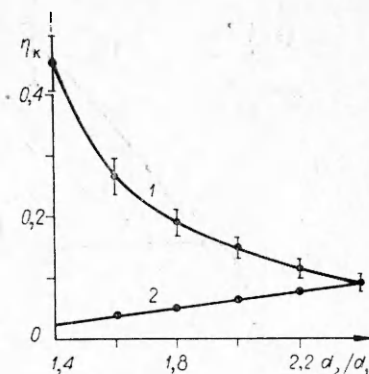


Рис. 10. Зависимость эффективности преобразования химической энергии заряда ВВ в кинетическую энергию потока от отношения внешнего диаметра трубчатого кумулятивного заряда  $d_2$  к диаметру кумулятивной выемки  $d_1$  [13]. 1 — заряд ВВ в оболочке; 2 — заряд без оболочки.

С целью определения предельных энергетических характеристик линейного МГД-генератора, работающего на газокумулятивных струях, проведена серия экспериментов с модельными генераторами с габаритами МГД-каналов  $18 \times 35 \times 300$  и  $35 \times 35 \times 350$  мм. Приложенное магнитное поле  $B_0$  изменялось от 5 до 25 Т. Заряд массой 150 г находился в стальной оболочке. Эксперименты ставились в воздухе при нормальных условиях. На омической нагрузке выделена энергия, соответствующая 5% энергии детонации и почти вдвое превышающая начальный запас электромагнитной энергии  $W_0$  ( $f \approx 1,75$ ). Более высокие значения  $\eta$ , по мнению авторов [13], могут быть получены при использовании ячеистого кумулятивного заряда. Необходимо отметить, что вследствие высокого давления в газокумулятивной струе характерные значения величин магнитных полей, при которых реализуется  $\eta \geq 5\%$ , должны составлять более 20 Т. В настоящее время представляется проблематичным создание квазистационарных магнитных полей таких величин в характерных объемах МГД-каналов (1—10 л) сохраняемого типа.

Наиболее перспективным направлением в создании магнитных систем МГД-генераторов является использование сверхпроводников. Применение сверхпроводящих магнитных систем (СПМС) во взрывном генераторе повышает степень его автономности от внешних электрических цепей, улучшает весогабаритные характеристики устройства. Величины индукции магнитных полей, достижимые в современных СПМС (6—8 Т), хорошо согласуются с параметрами взрывных течений в смысле реализации высоких значений эффективности преобразования энергии потока. Одной из основных проблем, стоящих на пути использования СПМС во взрывных генераторах, является защита магнитной системы от нестационарных индуцированных полей, которые могут вывести обмотку магнита из сверхпроводящего состояния.

Первые эксперименты со взрывным генератором, в котором использовалась СПМС, описаны в работе [6]. Течение в МГД-канале с размерами  $49 \times 17 \times 590$  мм создавалось при детонации 15 г гексогена с присадкой пикрата калия. Индукция магнитного поля в канале равнялась 1,35 Т, энергия, выделенная в нагрузке, — 20 Дж, мощность — 1 МВт. В процессе проведения эксперимента в течение нескольких суток магнитная система работала в режиме «замороженного» тока при отключенном источнике питания. При этом не обнаружено сколько-нибудь заметного уменьшения величины магнитной индукции. Система успешно выдержала транспортировку и ударные нагрузки, обусловленные взрывом зарядов ВВ.

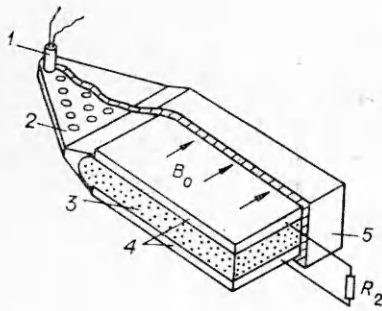


Рис. 11. Схема взрывного МГД-генератора [47].

1 — детонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — заряд ВВ с добавками магнитных частиц; 4 — электроды; 5 — корпус.

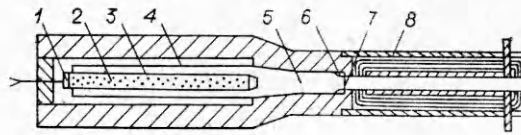


Рис. 12. Схема взрывного МГД-генератора с самовозбуждением [49].

1 — детонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — металлическая кассета; 4 — герметичный контейнер; 5 — успокоительная камера; 6 — сопло; 7 — диафрагма; 8 — МГД-канал.

Оригинальный способ создания магнитного поля в МГД-канале взрывного генератора предложен в патенте [47] (рис. 11). Особенность конструкции этого генератора состоит в том, что пространство между электродами заполнено не газом, а взрывчатым веществом с добавками магнитных частиц. При изготовлении такого заряда магнитные частицы (75—85% объема заряда) ориентируют во внешнем магнитном поле так, чтобы они создавали поперечное магнитное поле. При подрыве заряда ВВ по нему распространяется плоская детонационная волна. Газ за фронтом этой волны в зоне химической реакции нагрет и частично ионизован, что обеспечивает электропроводность движущегося потока продуктов детонации. Поперечное магнитное поле создается непродетонировавшей частью заряда с магнитными добавками и электрическим током в цепи нагрузки  $R_2$ . Движение сгустка электропроводного газа в этом поле сопровождается генерацией электрической энергии во внешнюю нагрузку.

Для рассматриваемой схемы характерна низкая ( $\sim 10^{-4} \div 10^{-2}\%$ ) эффективность преобразования энергии детонации в электрическую энергию, обусловленная малыми значениями магнитного поля ( $\sim 0,1-1$  Т) и электропроводности потока (1—100 См/м [48]), сосредоточенной в узкой зоне химической реакции за фронтом детонационной волны. Обсуждая вопрос о целесообразности применения этого генератора, равно как и любой другой схемы МГД-преобразователя, уничтожаемого в каждом пуске, по нашему мнению, необходимо в каждом случае конкретного применения сравнивать его с МК-генератором.

В работе [49] предложена схема частично разрушаемого генератора с самовозбуждением магнитного поля (рис. 12). Разрушаемая часть генератора представляет собой герметичный контейнер, в котором располагается металлическая кассета, наполненная взрывчатым веществом. Контейнер заполняется газом (воздухом, аргоном) до давления 1 МПа. Правый торец контейнера заглушен разрушаемой диафрагмой. При инициировании заряда ВВ детонатором кассета раскрывается и создает течение газа с ударной волной. При нагнетании ударно-нагретого газа в успокоительную камеру в газе, по оценкам авторов [49], устанавливаются следующие равновесные параметры:  $P \approx 300$  МПа,  $T \approx 2,1 \cdot 10^4$  К,  $\sigma \approx 2,2 \cdot 10^4$  См/м. После разрыва диафрагмы плазма истекает через сопло в МГД-канал генератора, работающего в режиме с самовозбуждением магнитного поля. Когда величина индукции магнитного поля в канале достигает насыщения, в цепь генератора включается внешняя электрическая нагрузка. Мощность, генерируемая в нагрузку, составляет 62,5 МВт на 1 см<sup>2</sup> поперечного сечения выходного сопла, а полная эффективность преобразования энергии — 7%. Генератор работает в миллисекундном диапазоне длительности выходного импульса. Интервал между импульсами энергии определяется временем замены разрушаемой части генератора — контейнера с зарядом ВВ, соплом и диафрагмой.

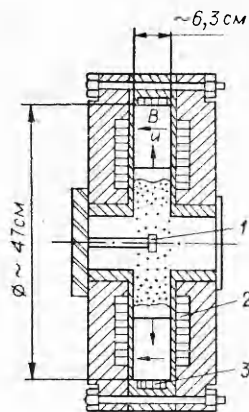


Рис. 13. Схема дискового взрывного МГД-генератора [50].

1 — заряд ВВ; 2 — обмотки магнита; 3 — катушка индукционного токосъема.

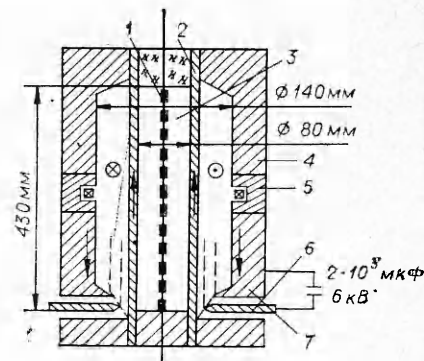


Рис. 14. Схема взрывного МГД-генератора с газообразным ВВ [51].

1 — взрывающаяся проволока (детонатор); 2 — алюминиевый лайнер; 3 — смесь  $2H_2+O_2$ ; 4 — стальной корпус; 5 — датчик тока; 6 — контакты; 7 — замыкающая система.

В работе [11] высказано предположение, что увеличение эффективности перевода химической энергии заряда ВВ в энергию потока достигается в дисковой схеме генератора, когда разлет продуктов детонации осуществляется аксиально-симметрично в осевом магнитном поле. К другим преимуществам дисковой (цилиндрической) схемы взрывного МГД-генератора перед линейной схемой можно отнести:

- фактическое отсутствие взрывной камеры;
- отсутствие импульса отдачи при подрыве заряда и воздействий потока на стенки канала;
- простоту создания осевого магнитного поля;
- меньшие магнитные поля рассеяния;
- возможность получения высоких напряжений на электрической нагрузке.

По-видимому, первые экспериментальные исследования дисковой схемы взрывного МГД-генератора описаны в работе [50]. Осесимметричное течение в канале установки (рис. 13) создавалось при детонации и разлете заряда гексогена массой 10 г в рабочий газ с давлением 0,1—1 кПа. Скорость фронта ударной волны расширяющегося плазменного кольца составляла  $\sim 5$  км/с, эффективные значения  $Re_m < 0,1$ . Попытки авторов увеличить электропроводность плазмы подбором рода рабочего газа, его давления, применением более мощного ВВ, оптимизацией количества присадки в заряде к желаемому результату не привели. Исследования, представленные в [37], показали, что причиной низкой электропроводности плазменного кольца является перемешивание неэлектропроводного газа продуктов детонации с ударно-нагретым газом, происходящее вследствие неустойчивости Релея — Тейлора. Несмотря на малый уровень деформации магнитного поля, в опытах по генерации электрической энергии энергосъем осуществлялся индукционным способом. Максимальное напряжение на омической нагрузке 100 Ом составило всего 8 В. Анализируя результаты исследований авторы [50] приходят к выводу о бесперспективности дисковой схемы взрывного генератора. На наш взгляд, полученный результат следовало предвидеть, и он не является достаточным основанием для столь категоричного вывода.

Замена металлического лайнера МК-генератора плазменным в импульсном МГД-генераторе позволила создать сохраняемую конструкцию МГД-преобразователя. При этом вследствие значительного уменьшения электропроводности лайнера ухудшились показатели, характеризующие эффективность преобразования энергии. По этой причине привлекательной казалась идея создания сохраняемого МГД-преобразователя с ме-

таллическим лайнером. Одна из возможных конструкций такого преобразователя описана в работе [51] (рис. 14).

Лайнер в виде тонкостенной цилиндрической алюминиевой трубы установлен коаксиально цилиндрическому металлическому корпусу. Газообразная смесь  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  под давлением 6 МПа заключена внутри лайнера и инициируется вдоль оси системы. Под воздействием высокого давления продуктов взрыва лайнер получает ускорение и расширяется, претерпевая пластическую деформацию. При условии ограниченности диффузионных потерь магнитного потока существуют режимы работы устройства, при которых торможение лайнера осуществляется давлением азимутального магнитного поля. При запасе химической энергии смеси 925 кДж и начальном токе 0,8 МА максимальный ток достигал значения 4,75 МА, длительность импульса тока — 150 мкс, коэффициент усиления магнитной энергии и эффективность преобразования составляли соответственно 3 и 3,2%.

В работе [51] отмечается, что основной недостаток устройства связан с накладываемыми на скорость лайнера ограничениями, обусловленными наличием начального давления газа внутри лайнера. Предполагается, что если высокое начальное давление газообразной взрывчатой смеси создавать в расположенном внутри алюминиевого лайнера тонком стальном цилиндре, который будет разрываться под действием давления детонации, то можно будет сделать лайнер намного легче (толщиной порядка скин-слоя и разгонять его до большей скорости. Предлагаемая модификация фактически эквивалентна схеме разгона проводящего лайнера давлением продуктов детонации заряда конденсированного ВВ.

В рамках программы ПУЛЬСАР [26, 52], направленной на создание взрывного неразрушаемого индукционного МГД-генератора цилиндрического типа, проводились исследования различных способов генерации потока с высоким значением  $Re_m$ . В качестве первичного источника химической энергии использовано конденсированное ВВ. Осевое магнитное поле в МГД-канале создавалось сверхпроводящей магнитной системой с диаметром теплового отверстия 0,45 м и запасаемой энергией 0,2 МДж. Индукционная обмотка располагалась на периферии канала.

Первые эксперименты по генерации тока проведены с использованием металлического тонкостенного лайнера, аксиально-симметричное расширение которого осуществлялось под действием давления продуктов взрыва цилиндрического заряда, размещаемого и инициируемого вдоль оси магнита [52]. Время нарастания тока составляло 80 мкс, полное время импульса — более 1 мс. Основным достоинством металлического лайнера является высокая электропроводность, что позволяет получать высокие значения токов. Однако значительная масса лайнера обуславливает ряд существенных недостатков. Так, например, при его использовании ограничена возможность получения коротких ( $\sim 10^{-5}$  с) высокоэнергетических импульсов тока. При высокой длительности импульса усложняется защита СПМС от вихревых полей. И, наконец, при выходной энергии  $\sim 10^7$  Дж, когда характерный размер канала  $\sim 1$  м, применение металлического лайнера становится в практическом отношении неудобным, особенно в устройствах, работающих в частотно-периодическом режиме.

Для плазменного лайнера, напротив, характерна высокая скорость движения, что позволяет генерировать короткие импульсы энергии, простота организации течения и утилизации продуктов разлета заряда ВВ. По мнению авторов [26], при скоростях движения  $\sim 10$  км/с и джоулевым саморазогреве плазменный лайнер может конкурировать с металлическим в части возможности получения высоких значений токов. Несмотря на оптимистические оценки, в экспериментах с плазменным лайнером зарегистрирован ток, составивший 1/50 часть тока через металлический лайнер. Нереализуемость расчетных параметров, а также невозможность воспроизведения результатов при тождественных начальных условиях авторы [52] связывают с перемешиванием ударно-нагретого газа

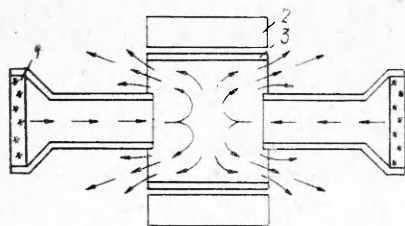


Рис. 15. Схема взрывного МГД-генератора со схлопывающимися потоками [52].

1 — взрывные генераторы плоской ударной волны; 2 — соленоидальный магнит; 3 — индукционная обмотка.

с холодным газом продуктов детонации (неустойчивость Релея — Тейлора).

Для увеличения скорости радиального истечения газа и преодоления неустойчивости предложена другая схема формирования высокоскоростного потока [26] (рис. 15). По оси МГД-канала с его торцов устанавливались взрывные линейные генераторы плоской волны. Скорость истечения газа из этих каналов составляла  $\sim 20$  км/с. При схлопывании встречных потоков происходило радиальное расширение газа со скоростью до 15 км/с. Максимальные значения тока были почти на порядок выше, чем в схеме с плазменным лайнером, генерируемым при детонации цилиндрического заряда ВВ. Таким образом, в результате исследований по созданию потока, пригодного для использования в цилиндрическом индукционном взрывном МГД-генераторе периодического действия, авторы отказались от применения металлического лайнера, а для увеличения электропроводности газового потока прибегли к кумуляции энергии.

В работе [52] отмечается, что проведенные исследования являются экспериментальной основой проектов на 2 и 10 МДж. По мнению авторов [26], сохраняемый взрывной МГД-генератор — конкурент индуктивному и емкостному накопителям при выходной энергии  $>1$  МДж и длительности импульса энергии  $\sim 10^{-5}$  с. В сравнении с емкостным накопителем взрывной генератор отличается простотой, низкой стоимостью, высокими весогабаритными характеристиками. Сочетание СПМС с генератором плазмы в конструкции взрывного МГД-генератора создает возможность получения периодических импульсов тока с длительностью  $\sim 10^{-5}$  с, чего нельзя получить в конструкции сверхпроводящего индуктивного накопителя в сочетании с взрывным коммутатором.

### Заключение

В работе рассмотрены различные практические способы реализации МГД-метода преобразования химической энергии конденсированного взрывчатого вещества в импульсы электрической энергии. Показано, что взрывные МГД-генераторы — компактные источники мощных импульсов электрической энергии — характеризуются относительной простотой, автономностью, маневренностью запуска, способны работать в частотно-периодическом режиме. Умеренные в сравнении с МК-генератором весогабаритные характеристики генератора ( $\sim 1$  Дж/г,  $\sim 1$  Дж/см<sup>3</sup>) являются необходимой платой за новое эксплуатационное качество — неразрушаемость конструкции.

К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по изучению процессов, определяющих эффективность генератора. На его основе предложен ряд проектов взрывных МГД-генераторов мегаджоульного диапазона. Существует практический опыт создания генераторов частотнопериодического действия, а также автономных устройств с использованием сверхпроводящих магнитных систем. Повышение эффективности работы взрывного МГД-генератора связано прежде всего с увеличением магнитного числа Рейнольдса потока, что может быть достигнуто, в частности, использованием различных схем кумуляции энергии взрыва. Применение во взрывном МГД-генераторе



металлического лайнера, расширяемого давлением продуктов детонации, в практическом отношении, по-видимому, бесперспективно.

Имеющиеся в литературе общие сведения о параметрах и свойствах взрывных МГД-генераторов дают основание сделать вывод о том, что этот генератор — перспективный источник мощных электрических импульсов. В определенной области параметров он может быть альтернативой применения конденсаторной батареи, индуктивного накопителя, взрывомангнитного генератора, а по ряду показателей (неразрушаемость, автономность, частотно-периодический режим работы) имеет преимущества перед ними.

*Поступила в редакцию 29/III 1982*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Биченков. Докл. АН СССР, 1967, 174, 4, 779.
2. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные поля. М.: Мир, 1972.
3. A. I. Pavlovskii, R. Z. Lyudaev et al. Proceedings of the 2-nd International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Washington, May, 1979.
4. V. K. Chernyshev, V. A. Davydov. Proceedings of the 2-nd International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Washington, 1979.
5. M. S. Jones, C. N. McKinnon, V. H. Blackman. Proceedings of the 5-th Symposium on the Engineering Aspects of MHD. Massachusetts, April 1964.
6. В. А. Кириллин, В. А. Альтов и др. Докл. АН СССР, 1969, 185, 2, 316.
7. H. J. Pain, P. R. Smy. Fluid Mech., 1961, 10, 1, 51.
8. В. В. Полудов, В. М. Титов, Г. А. Швецов. ПМТФ, 1973, 6, 41.
9. Э. И. Асиновский, Ю. А. Кузнецов. ТВТ, 1968, 6, 4, 615.
10. M. S. Jones, V. H. Blackman. Proceedings of the 2-nd International Symposium on MHD Electrical Power Generation. V. 2. Paris, July 1964.
11. C. D. Bangerter, L. R. West et al. Tech. Rep. AFAPL-TR-73-16, May 1973.
12. R. L. Conger. J. Appl. Phys., 1967, 38, 5, 2275.
13. В. М. Титов, Г. А. Швецов. ФГВ, 1980, 16, 5, 47.
14. В. А. Лобанов. ПМТФ, 1976, 1, 120.
15. О. А. Синкевич, Л. М. Крылова. Магнитная гидродинамика, 1970, 1, 28.
16. Э. И. Асиновский, В. Е. Остаев. ТВТ, 1976, 14, 5, 1079.
17. О. С. Попель, О. А. Синкевич. ТВТ, 1977, 15, 2, 385.
18. E. I. Asinovski, Ye. F. Lebedev, V. Ye. Ostashev. Proceedings of the 7-th International Conference on MHD Electrical Power Generation Massachusetts. V. 2. 1980.
19. С. Франкенталь. РТК, 1968, 6, 6, 3.
20. Ю. А. Буренин, Г. А. Швецов. ФГВ, 1975, 11, 3, 433.
21. C. D. Bangerter, B. D. Hopkins, T. R. Brogan. Proceedings of the 6-th International Conference on MHD Electrical Power Generation. V. 4. Washington, June 1975.
22. E. I. Asinovski, Yu. A. Kuznetsov et al. Proceedings of the 15-th Symposium on Engineering Aspects of MHD. Philadelphia, May 1976.
23. Г. Г. Еленин, С. П. Курдюмов. Препринт ИПМ, 1977, № 106.
24. A. I. Pavlovskii, R. Z. Lyudaev et al. Proceedings of the 2-nd International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Washington, May 1979.
25. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971.
26. T. P. Wright, L. Baker et al. Proceedings of the 2-nd International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Washington, May 1979.
27. В. П. Коробейников, В. В. Марков, Б. В. Путятин. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, 4, 133.
28. F. Sardei, K. Willeke. Plasma Physics, 1971, 13, 999.
29. С. Г. Зайцев, А. В. Михайлов, И. К. Фаворская. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, 1, 86.
30. А. Н. Тихонов, А. А. Самарский и др. Докл. АН СССР, 1967, 173, 4, 808.
31. А. А. Самарский, В. А. Дородницын и др. Докл. АН СССР, 1974, 216, 6, 1254.
32. А. Ю. Керкис, В. С. Соколов и др. Докл. АН СССР, 1973, 211, 1, 69.
33. А. И. Захаров, В. В. Клавдиев и др. Докл. АН СССР, 1973, 212, 5, 1092.
34. С. С. Кацнельсон, В. С. Славин, В. С. Соколов. — В сб.: Численные методы в физике плазмы. М.: Наука, 1977.
35. А. В. Губарев, Л. М. Дегтярев и др. Препринт ИАЭ, 1971.
36. В. А. Деревянко, В. С. Соколов. — В сб.: Аэрофизические исследования. Вып. 2. Новосибирск, ИТПМ, 1973.
37. А. Н. Давыдов, Е. Ф. Лебедев, С. А. Перков. Препринт ИВТАН, 1979. № 1—46.
38. Е. И. Биченков, В. А. Лобанов. ПМТФ, 1975, 5, 116.
39. R. C. Brumfield, E. W. Evans, C. N. McKinnon. Proceedings of the 4-th Symposium on Engineering Aspects of MHD. Berkely, April 1963.
40. R. C. Brumfield. Patent USA, cl. 310-11, May 1967.
41. M. S. Jones, C. N. McKinnon. Proceedings of the Conference on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments. Frascatty, 1965.
42. M. S. Jones, P. W. Webster et al. Proceedings of the 7-th Symposium on Engineering Aspects of MHD. Pittsburg, April 1965.

43. M. S. Jones, C. D. Bangerter et al. Tech. Rep. AFAPL-TR-67-64, August 1967.
44. M. S. Jones, A. H. Peterson, D. H. Church. Tech. Rep. AFAPL-TR-65-256, 1965.
45. O. K. Sonju, F. Teno. Proceedings of the 13-th Symposium on Engineering Aspects of MHD. Stanford, March 1973.
46. C. D. Bangerter, B. D. Hopkins, T. R. Brogan. Tech. Rep. AFAPL-TR-76-34, 1976.
47. C. N. McKinnon. Patent USA, cl. 310-11, N 3, 348, October 1967.
48. А. П. Ершов. ФГВ, 1975, 11, 6, 938.
49. S. P. Gill, D. W. Baum. Patent USA, cl. 310-11, № 3, 878, 409, 1975.
50. M. S. Jones, C. D. Bangerter et al. Tech. Rep. 669, MHD, Research Inc., 1969.
51. Р. Хан, Б. Антони и др.— В сб.: Накопление и коммутация энергии больших плотностей. М.: Мир, 1979.
52. E. C. Snare, W. P. Brooks, M. Cowan. Proceedings of the 2-nd IEEE International Pulsed Power Conference. Lubbock, 1979.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПОРОШКОВ ТИТАНА

*Е. В. Черненко, В. А. Грива, В. И. Розенбанд  
(Черноголовка)*

Изучение закономерностей воспламенения порошков переходных тугоплавких металлов имеет научное и прикладное значение. Представляет интерес исследование влияния на процесс воспламенения таких параметров, как состав газообразного окислителя, величина теплоотода, размеры образца, марка металлического порошка. Это связано с решением вопросов техники безопасности при работе с порошками переходных металлов, обладающих повышенной реакционной способностью, применение которых в промышленности неуклонно возрастает. Настоящая работа посвящена изучению воспламенения металлических порошков переходных металлов на примере порошков титана.

Для исследования воспламенения применялись два металлических блока. Первый блок с большим внутренним объемом ( $V = 200 \text{ см}^3$ ) использовался для изучения воспламеняемости порошков при различных условиях теплоотода между капсулой, полностью заполненной порошком, и окружающей средой. Величина теплоотода варьировалась изменением скорости продувки газа через металлический блок. Во втором блоке с малым внутренним объемом ( $V = 20 \text{ см}^3$ ) исследовалась воспламеняемость порошков в ограниченном объеме без продувки газа. В металлический блок, нагретый до определенной температуры в муфельной печи, вводился образец (порошок титана) в капсуле, выполненной из латунной сетки (размер ячеек 71 мкм), не препятствующей подводу газа к образцу. Время ввода образца  $\approx 2 \text{ с}$ , что значительно меньше времени наблюдаемого процесса. Температуры металлического блока и образца измерялись с помощью хромель-алюмелевых термопар, которые устанавливались на поверхности, в центре образца и на поверхности металлического блока напротив образца. Установка позволяла проводить исследования при температурах металлического блока до  $1200^\circ\text{C}$ .

Для определения коэффициента теплоотдачи между образцом и окружающей средой порошок в капсуле заменялся медным цилиндром, температура которого измерялась хромель-копелевой термопарой, установленной в центре цилиндра. На стадии прогрева вблизи температуры металлического блока, благодаря высокой теплопроводности меди, можно считать, что медный цилиндр равномерно прогрет по всему объему. В этом случае коэффициент теплоотдачи от образца в окружающую среду

$$\alpha = - \frac{V_0 c \rho}{S} \frac{1}{T_{\text{ц}} - T_{\infty}} \frac{dT_{\text{ц}}}{dt},$$

где  $V_0$ ,  $S$  — объем и площадь медного цилиндра;  $c$ ,  $\rho$ ,  $T_{\text{ц}}$  — его теплоемкость, плотность и температура;  $T_{\infty}$  — температура цилиндра, которая