

Модель детонационного МГД-генератора с T-слоем

В.А. Деревянко, В.В. Деревянко,
ИВМ СО РАН, КрасГУ, г.Красноярск,
derevyanko@cc.krascience.rssi.ru

20 марта 2000 г.

Аннотация

Рассмотрена схема детонационного МГД-генератора с T-слоем. Проведено численное моделирование работы генератора при таких давлениях газа в канале, когда T-слой можно считать объемным излучателем. Показана работоспособность схемы и существенное влияние радиационных потерь на характеристики генератора.

1 Введение

Изучение МГД-генераторов с T-слоем позволило выделить к настоящему времени ряд проблем, присущих этому типу преобразователей. Решение их позволит, возможно, определить, является ли МГД-генератор с T-слоем просто красивой идеей или это рабочая схема. Проблемы эти следующие: большие потери на излучение в T-слое, имеющем высокую температуру, устойчивость T-слоя как плазменного поршня и большие затраты энергии на инициирование T-слоя.

T-слой представляет из себя плазменный поршень в потоке "холодного" толкающего газа и имеет стабилизированную температуру $\sim 10^4$ К. С одной стороны, такая температура обеспечивает ему высокую электропроводность, с другой — обуславливает огромные радиационные потери, вследствие которых в процессе работы МГД-генератора на поддержание температуры T-слоя расходуется до 30% генерируемой энергии. При малых давлениях в потоке газа (~ 10 атм) излучение T-слоя носит объемный характер и характеристики генератора (состав газа, давление в потоке, величина внешнего магнитного поля) однозначно определяют характерный "стабилизированный" размер T-слоя. Если исходить из разумного предположения, что размер T-слоя поперек канала не может превышать его размера вдоль потока, то сразу получается ограничение на ширину канала и, следовательно, на мощность генератора. Расчеты показали, что при работе с инертными газами (аргон, гелий) мощность генератора с T-слоем может достигать 100 МВт, а при работе на продуктах сгорания, имеющих высокую излучательную способность, не может превышать нескольких сотен киловатт. Таким образом, излучение определяет предельную мощность генератора. Повышение мощности возможно путем резкого увеличения давления газа в канале. Как было показано в [2], при этом излучение из T-слоя становится поверхностным (излучение запирается), относительные затраты энергии на поддержание температуры T-слоя значительно уменьшаются, а характерный размер определяется уже не излучательными характеристиками газа, а тепловой мощностью потока и величиной магнитного поля. Появляется возможность создавать генераторы мощностью в несколько гигаватт, при этом оптимальным рабочим газом становятся как раз продукты сгорания, имеющие высокие коэффициенты поглощения.

Эффект запираения излучения проявляется при давлениях ≥ 100 атм. Естественно, что необходимость создания таких давлений в потоке газа ставит вопрос о технической возможности реализации такого генератора, если исходить из идеологии сжигания топлива в камере сгорания и последующего истечения продуктов сгорания через сопло в МГД-канал. Однако известно, что

в детонационных трубах получение потока с давлением в несколько сотен атмосфер не представляет трудностей. Попытки использовать детонационный режим сгорания в МГД-генераторах уже предпринимались [1], однако они не привели к успеху, главным образом из-за того, что не удалось обеспечить достаточную проводимость в потоке рабочего газа. Использование эффекта Т-слоя позволяет по-новому взглянуть на эту идею. И первый вопрос, на который нужно ответить, это: позволяет ли детонационный режим сгорания обеспечить эффективное преобразование энергии в канале МГД-генератора с Т-слоем в режиме запирающего излучения. Положительный ответ на этот вопрос позволит говорить в дальнейшем о технических характеристиках генератора и возможных схемных решениях. Тем не менее уже сейчас в рамках известных проблем МГД-генератора с Т-слоем следует обозначить некоторые направления дальнейших исследований чтобы понять, не противоречат ли они идеологии детонационного МГД-генератора с Т-слоем.

Вторая, из обозначенных, проблема — устойчивость плазменного поршня в потоке толкающего газа. Она до сих пор не решена, хотя попытки численного моделирования двумерной структуры Т-слоя в потоке вязкого толкающего газа в магнитном поле предпринимались. Делались попытки и экспериментального определения критерия непроницаемости плазменного поршня, но и они не дали пока однозначного ответа. При анализе схемы МГД-генератора с Т-слоем предполагалось, что по аналогии с дугами высокого давления Т-слой будет обтекаться потоком толкающего газа как цилиндрическая дуга. Из этого предположения исходили во всех оценках мощности генератора, считая, что ширина МГД-канала не может превышать характерного размера "стабилизированного" Т-слоя (т.е. диаметра дуги). В этих же самых предположениях детонационный МГД-генератор с Т-слоем позволяет получить значительно больше мощности в единичном канале. Во-первых, как уже говорилось, в режиме запертого излучения перестраивается структура Т-слоя и его характерный размер увеличивается. Во-вторых, с увеличением давления в потоке пропорционально растут тепловая и электрическая мощности МГД-генератора. Оценки показывают, что электрическая мощность детонационного МГД-генератора может достигать нескольких гигаватт. Наибольшие трудности здесь, по-видимому, будут связаны с необходимостью достижения предельных величин внешнего магнитного поля.

Рассмотрим теперь проблему инициирования Т-слоев. Здесь два аспекта. Первый, это первоначальный пробой газа, обеспечивающий дальнейший вклад энергии в поток газа. В МГД-генераторах с Т-слоем с камерой сгорания в канале имеются относительно холодные приэлектродные области с высокой электрической прочностью. Для их пробоя к электродам необходимо прикладывать напряжение в (5-10)кВ. После пробоя, напряжение на электродах падает до нескольких сотен вольт и остается таким в процессе разогрева Т-слоя. Все это накладывает определенные требования на источник инициирования и синхронизацию его работы, снижая КПД вклада энергии. В детонационном МГД-генераторе задача пробоя решается просто — за фронтом детонационной волны имеется зона хемопроводимости, обеспечивающая автоматический пробой при входе ее на электроды генератора, к которым приложено напряжение. Поскольку зона хемопроводимости имеется и в прилегающих к электродам областях, то собственно о пробое речи не идет; напряжение, приложенное к электродами, обеспечивает сразу разогрев Т-слоя. В этом смысле детонационный МГД-генератор отличается от традиционного в лучшую сторону. Второй аспект инициирования, это собственно затраты на первоначальный разогрев Т-слоя до уровня, обеспечивающего его подхват и окончательное формирование уже за счет энергии потока. Здесь, по сравнению с обычной схемой, ничто не меняется. Следует только отметить, что с увеличением давления и плотности потока газа, абсолютные затраты энергии на инициирование также возрастут. В любом случае, работающий МГД-генератор с Т-слоем (детонационный или с обычной камерой сгорания) должен черпать энергию на инициирование Т-слоев из потока. Учитывая большие количества энергии на нагрев Т-слоя (от сотен кДж до десятков МДж), а также время вклада этой энергии в нагреваемый объем газа (несколько сотен микросекунд) следует признать, что единственно приемлемым накопителем такой энергии может быть индуктивность. Конкретно индуктивность (или часть индуктивности) электромаг-

нита, обеспечивающего внешнее магнитное поле. Поэтому, в дальнейшем придется рассматривать параметрический режим работы детонационного МГД-генератора и тогда определяться с частотой и формой генерируемого тока. Пока же, рассчитывая детонационный режим горения газа в канале, необходимо определить хотя бы частоту работы детонационной камеры сгорания, поскольку именно это определит скважность работы единичного МГД-канала и, следовательно, необходимое количество одновременно работающих каналов. В работе [1] указывалось, что детонационная камера сгорания работала с частотой 100 Гц и это дает основание надеяться на создание в будущем детонационного МГД-генератора с Т-слоем, генерирующего переменный электрический ток. Пока же необходимо пройти основные этапы решения этой задачи и первый из них — показать принципиальную работоспособность детонационного МГД-генератора с Т-слоем; второй этап — промоделировать детонационный МГДГ с большим давлением в канале и запертым излучением; и третий — изучить параметрический режим работы.

Целью настоящей работы было численное моделирование процессов протекающих в канале детонационного МГД-генератора с Т-слоем в приближении объемных радиационных потерь в Т-слое, изучение динамики движения газа в канале генератора и влияния параметров генератора на режим его работы.

2 Принцип работы детонационного МГД-генератора

Рассматриваемая схема ДМГД-генератора с Т-слоем представлена на рисунке 1.

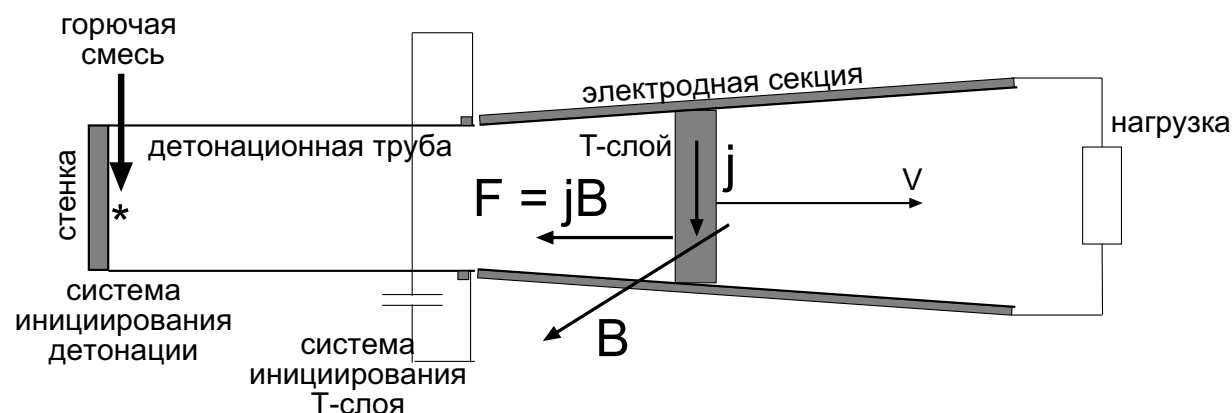


Рис. 1. Схема детонационного МГД-генератора

Канал генератора состоит из детонационной трубы и электродной секции. В обычном генераторе с Т-слоем горючая смесь сгорает в камере сгорания, а затем горячий газ подается в канал генератора. Для того, чтобы обеспечить приемлемую скорость потока, на входе в канал ставят сопло, а сам канал делают расширяющимся. В результате давление в электродной секции оказывается на порядок меньше начального давления газа в камере сгорания. В детонационном МГД-генераторе горючая смесь подается прямо в канал, поэтому камеры сгорания и сопла в нет, а давление потока газа в канале определяется только начальными параметрами горючей смеси. Горючая смесь поджигается возле торцевой стенки. В процессе горения по каналу движется детонационная волна. При распространении по каналу детонационной волны за ее фронтом образуется зона хемопроводимости, т.е. проводимости химически реагирующего газа, в которой электропроводность на два порядка выше, чем в нереагирующем газе. Наличие зоны хемопроводимости по всему поперечному сечению канала, включая пограничные слои, позволяет значительно снизить напряжение пробоя и упрощает процесс иницирования Т-слоя. В момент, когда детонационная волна достигает приэлектродной области, за ее фронтом осуществляется пробой газа и иницируется Т-слой. Температура газа в образующемся Т-слое достигает

10^4 К, поэтому газ ионизуется, становится проводящим и при движении Т-слоя по электродной секции в магнитном поле в объеме Т-слоя течет ток. При этом возникает электродинамическая сила, стремящаяся затормозить Т-слой. Т-слой начинает вести себя как поршень. Проталкивая Т-слой, газ совершает работу, часть которой идет на поддержание температуры в Т-слое, а оставшаяся часть выделяется как полезная мощность в нагрузку. При этом в процессе прохождения Т-слоя по электродной секции канала через нагрузку проходит токовый импульс, что позволяет получить синхронный с частотой следования Т-слоев переменный ток.

3 Математическая модель

При построении математической модели детонационного МГД-генератора с Т-слоем использовался ряд допущений. Во-первых, Т-слой считался непроницаемым для потока толкающего газа. Это позволило использовать одномерную постановку задачи. Во-вторых, индуцированными магнитными полями пренебрегалось вследствие их малости по сравнению со стационарным магнитным полем, что дало возможность заменить систему уравнений Максвелла дифференциальным законом Ома для полной цепи. В-третьих, предполагалось наличие локального термодинамического равновесия, а также, что Т-слой излучает как объемный излучатель. Это позволило определять радиационные потери через спектральную функцию Планка. Кроме того, считалось, что в канале генератора присутствует газ двух видов — горючая смесь и продукты сгорания, несмешиваемые между собой невязкие идеальные газы с одинаковыми термодинамическими свойствами.

С учетом всех этих допущений движение газа в канале детонационного МГД-генератора описывалось нестационарной одномерной системой уравнений газодинамики, состоящей из уравнений переноса массы, импульса, энергии и сорта газа, правые части которых учитывали процессы распространения детонационной волны, излучения, инициирования Т-слоя и его взаимодействия с магнитным полем. В общем виде система записывалась следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = -j B_0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(u(E + p))}{\partial x} = q_{ini} + Q_0 w + q_j - q_{rad} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Y u)}{\partial x} = w, \quad (4)$$

где ρ — плотность, u — скорость, p — давление, E — энергия в единице объема, Y — доля горючей смеси, $1 - Y$ — доля продуктов сгорания, j — ток, B_0 — поперечное стационарное магнитное поле в электродной секции генератора, Q_0 — теплота сгорания горючей смеси, w — скорость реакции горения, q_{ini} — энергия инициирования Т-слоя, q_j — энергия, выделяющаяся при джоулевой диссипации, q_{rad} — радиационные потери.

При моделировании распространения детонационной волны использовалась ее простейшая модель — ударная волна, за фронтом которой протекает химическая реакция горения. Считалось, что реакция является одношаговой, необратимой и подчиняется кинетике Хэвисайда:

$$w = -\rho Y K_0 \begin{cases} 1, & T \geq T_a \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где K_0 — константа скорости химической реакции горения горючей смеси, а T_a — энергия активации горючей смеси.

Инициирование Т-слоя осуществлялось подводом в область инициирования в течение короткого промежутка времени энергии, достаточной для разогрева газа в этой области до темпера-

туры $\sim 10^4\text{К}$:

$$q_i = \begin{cases} Q_i \sin\left(\pi \frac{t-t_{ini}}{\Delta t_{ini}}\right) & 0 \leq t - t_{ini} < \Delta t_{ini} \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где Q_i — полная энергия, затраченная на инициирование, t_{ini} — момент начала инициирования Т-слоя, Δt_{ini} — время инициирования. Во времени подводимая энергия изменялась синусоидально, что имитировало разряд конденсаторной батареи.

Радиационные потери в токовом слое учитывались в приближении оптически тонкого тела ($x/\tilde{\ell} \ll 1$, где x — размер Т-слоя, $\tilde{\ell}$ — средний пробег фотона). Такое приближение оправдано тем, что в среднем размер Т-слоя в рассматриваемых режимах работы генератора составлял несколько сантиметров, а свободный пробег фотона не меньше метра. В этом случае потери энергии единицей объема вещества в единицу времени сводятся с точностью до малой величины порядка $x/\tilde{\ell}$ к испускаемой энергии, т.е. к интегральной лучеиспускающей способности J :

$$J = c \int_0^\infty \chi'_\nu U_\nu^{\text{равн}} d\nu$$

$$\chi'_\nu = \chi_\nu \left(1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)\right)$$

$$U_\nu^{\text{равн}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

$$\chi = \chi(p, T)$$

где χ — коэффициент поглощения, χ' — коэффициент поглощения, учитывающий процессы вынужденного испускания квантов, $U_\nu^{\text{равн}}$ — спектральная функция плотности равновесного излучения, введенная Планком, характеризующая количество энергии равновесного излучения частоты ν в единице объема, приходящееся на единичный интервал частот.

Величина тока, протекающего в объеме токового слоя при его взаимодействии с магнитным полем, определялась через дифференциальный закон Ома для полной цепи:

$$j = \sigma E$$

$$E = uB_0(1 - K)$$

$$\sigma = \sigma(p, T),$$

где E — напряженность электрического поля, K — коэффициент нагрузки, задающий отношение энергии, выделяющейся в нагрузке и энергии, вырабатываемой в результате джоулевой диссипации и затрачиваемой на поддержание Т-слоя. Последняя равна:

$$q_j = jE = \sigma uB(1 - K)^2$$

Предполагалось, что как горючая смесь, так и продукты сгорания удовлетворяют уравнениям состояния идеального газа:

$$p = \rho R_0 \mu^{-1} T$$

$$E = (0.5\rho u^2 + p)/(\gamma - 1)$$

Здесь $R_0 = 8314.4$ [Дж/(кмоль К)] — универсальная газовая постоянная, γ и μ — соответственно, показатель адиабаты и молекулярный вес.

4 Численный метод

Вычислительной особенностью данной задачи явилось наличие в канале генератора области Т-слоя с резкими градиентами параметров на границах. Поскольку радиационные потери в Т-слое пропорциональны T^4 , то ошибки численного метода при расчете параметров газа в Т-слое повлияют на режим стабилизации Т-слоя, его профиль и, в конечном итоге, могут существенно изменить энергетические характеристики генератора. Чтобы избежать этого, на предварительном этапе работы было исследовано и протестировано несколько наиболее популярных методов, используемых в такого рода задачах: различные схемы TVD и ENO, а также метод FCT. Все методы тестировались на стандартных тестовых задачах о распаде произвольного разрыва, для которых известны точные решения [5] и которые в последние годы повсеместно используются в этих целях. В результате для расчетов была выбрана полностью дискретная схема TVD второго порядка точности по пространству и времени, предложенная в [4]. С помощью этой схемы решались уравнения (1 - 3). Уравнение переноса сорта газа решалось отдельно: положение разрыва на каждом шаге по времени рассчитывалось по известным локальным значениям скорости газа, а состав смеси в точке разрыва определялся из уравнения 5.

Все вычисления проводились при $\delta x = 10^{-3}$ м, $\delta t = 10^{-7}$ с. Такое пространственное разрешение позволяло численному методу корректно рассчитывать Т-слой, а выбранное временное разрешение обеспечивало устойчивость метода.

Граничные условия записывались для простых переменных

$$V = (\rho, p, u, Y)^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{Слева условия на непроницаемой стенке:} & \quad V_{N-m-i} = (\rho, p, -u, Y)_{N-m-i-1}^{-1} \\ \text{Справа условия свободного вылета:} & \quad V_i = V_m \end{aligned}$$

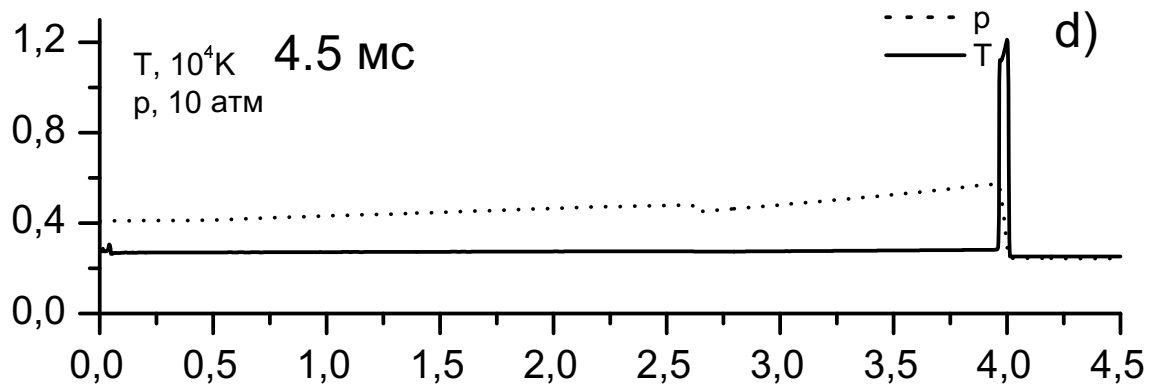
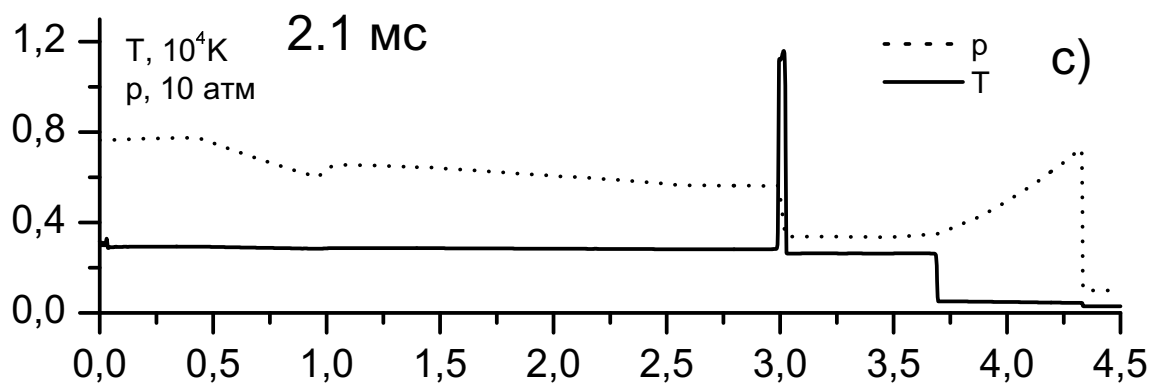
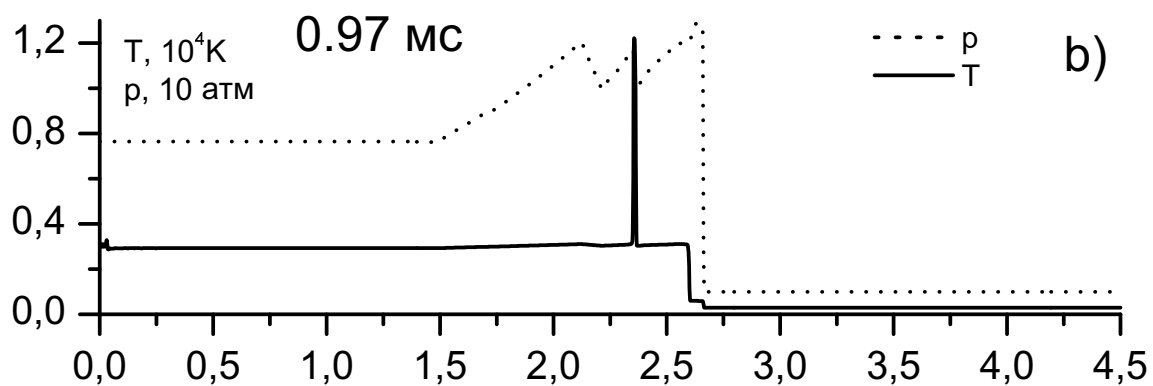
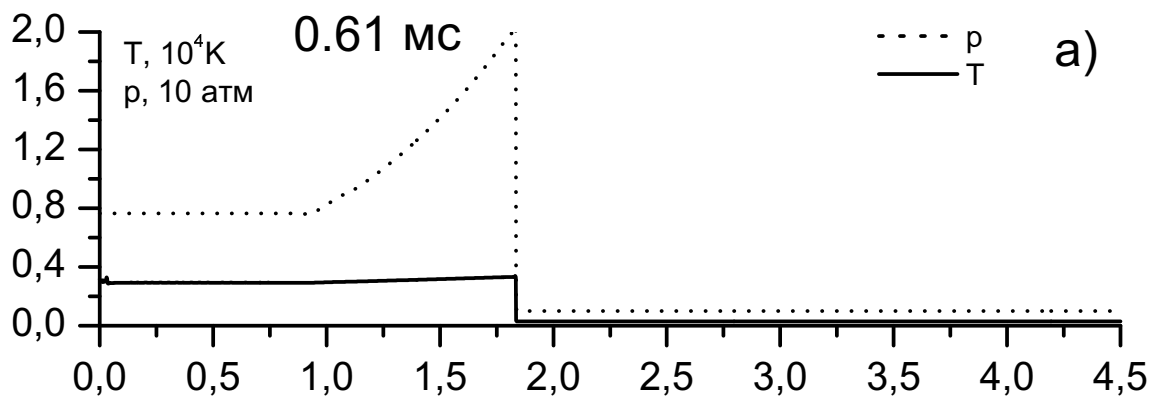
$$i = 0 \dots 5$$

Табличные зависимости электропроводности и коэффициентов поглощения $\sigma(T, p), \chi(T, p)$ насчитывались программой MONSTER [3].

5 Результаты расчетов

На основе выработанной модели был проведен вычислительный эксперимент, моделирующий работу детонационного МГД-генератора с Т-слоем. В эксперименте исследовался генератор с каналом постоянного сечения, детонационной секцией длиной 2 м, и электродной секцией 2.5 м. В качестве горючей смеси была выбрана стехиометрическая кислородно-водородная смесь с тепловыделением 13 МДж на 1 кг смеси. Считалось, что в начальный момент времени газ в канале находится в неподвижном равновесном состоянии при давлении 1 атм и комнатной температуре. При этом детонационная секция содержала горючий газ, а электродная — продукты сгорания. Магнитное поле задавалось равным 5 Тл, коэффициент нагрузки $K = 0.7$, $\gamma = 1.15$, $\mu = 12$. Иницирование Т-слоя осуществлялось за $\Delta t_{ini} = 0.3$ мс, при этом затрачивалась энергия $Q_i = 80$ кДж.

Динамика процессов, протекающих в канале генератора, представлена на рисунках 2а-2д. На рисунке 2а показан момент достижения детонационной волной области иницирования Т-слоя. Рисунок 2б демонстрирует процесс иницирования Т-слоя. Показан момент, когда вся энергии иницирования уже вложена в газ, температура в Т-слое достигла ~ 12000 К, и в Т-слое под влиянием магнитного поля начинает формироваться перепад по давлению. При этом вправо и влево от Т-слоя отходят ударные волны, вызванные резким торможением газа в Т-слое, а в самом Т-слое начинает образовываться перепад по давлению. На следующем рисунке 2с отражены параметры газа в канале генератора в тот момент, когда между джоулевой диссипацией



X, M

и радиационными потерями в Т-слое установился баланс и параметры Т-слоя стабилизировались: температура $T \simeq 12 \cdot 10^4 \text{ K}$, ширина $\simeq 3 \text{ см}$, перепад по давлению в Т-слое $\Delta p \simeq 2.3 \text{ атм}$, скорость $u \simeq 400 \text{ м/с}$. После стабилизации значения параметров в течение 2.5 мс остаются практически неизменными, до тех пор, пока Т-слой не настигнет волна разрежения 2d. После этого давление справа и слева от Т-слоя начинает быстро снижаться, что приводит к резкому снижению вырабатываемого тока и, в конечном итоге, к распаду Т-слоя. Этот процесс ненадолго приостанавливается, когда Т-слой настигает ударная волна, которая образовалась при иницировании Т-слоя, отразилась от торцевой (левой) стенки и возвратилась назад в область МГД-взаимодействия. Ее столкновение с Т-слоем приводит к небольшому увеличению скорости и перепада давления в Т-слое на короткое время. К тому времени, когда Т-слой покидает канал (6 мс), генерация тока практически прекращается. Температура и давление продуктов сгорания в канале после выхода Т-слоя из канала в среднем равны соответственно $\simeq 2800 \text{ K}$ и $\simeq 4 \text{ атм}$, при скорости газа в канале менее 100 м/с.

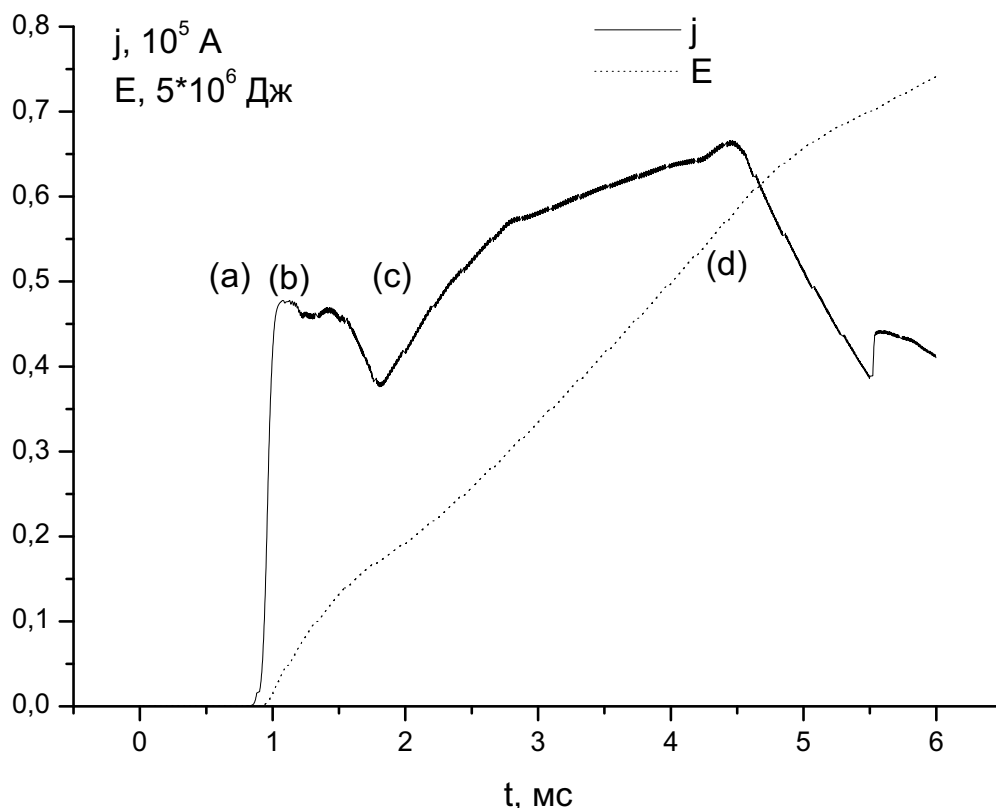


Рис. 3. Ток и энергия, выработанные в процессе одного акта работы генератора

На рисунке 3 приведены графики выработанных генератором импульсов тока и энергии. Буквами (a)-(d) обозначены моменты времени, соответствующие графикам рисунка 2. КПД генератора, который оценивался как

$$\eta = \frac{\text{выработанная энергия на нагрузке}}{\text{энергия выделившаяся при горении} + Q_{ini}}$$

составил 2.3%.

Низкий КПД генератора объясняется высокими радиационными потерями в токовом слое, которые в рамках выбранной модели невозможно снизить варьированием параметров. Замена

кислородно-водородной смеси на другую, с меньшими радиационными потерями, не оправдывает себя, поскольку одновременно снижается тепловыделение смеси, что приводит к уменьшению скорости потока и снижению выработанной энергии. Для воздушно-водородной смеси КПД, например, при начальном давлении 0.5 атм получился равным 1.5%. Большие радиационные потери в Т-слое препятствуют также повышению удельной тепловой мощности потока. Вычислительные эксперименты показали, что верхним пределом по начальному давлению в канале для кислородно-водородной смеси служат 2 атм, а для воздушно-водородной — всего 1 атм. Как показали расчеты, в этом случае ширина Т-слоя не превышает нескольких сантиметров. Если считать верным приближение непроницаемости Т-слоя и полагать, что сечение канала генератора определяется шириной Т-слоя, то величина энергии, вырабатываемой генератором в каждом импульсе, составит 150 кДж.

6 Выводы

Показано, что схема детонационного МГД-генератора позволяет организовать генераторный процесс с получением полезной энергии. В тоже время, объемный характер излучения в Т-слое приводит к низкому КПД и малой мощности, повысить которые в рамках существующей расчетной модели невозможно. Логическим продолжением работы является разработка модели генератора при давлениях в канале 10-150 атм, когда реализуется режим запираания излучения в Т-слое. Как было показано в [2], в этом случае суммарные величины радиационных потерь для Т-слоя шириной 10 см при давлениях 30 атм и 160 атм совпадают, поэтому такой режим должен позволить существенно повысить как КПД, так и вырабатываемую энергию.

Список литературы

- [1] Бакланов Д.И., Жимерин Д.Г., Киселев Ю.Н., Миронов Э.А., Попов В.А. О некоторых технических аспектах использования детонационного режима сгорания. ФГВ, 12(1), 1976, С.47-52.
- [2] Vasilyev E.N., Derevyanko V.A., Ovchinnikov V.V. Radiation Characteristics and Structure of Current Layer in MHD Channel. 10th International Conference on MHD Power Generation, Dec 4-8, 1989.
- [3] Суржиков С.Т. Автоматизированная система исследования радиационных и динамических процессов в низкотемпературной плазме. ПРЕПРИНТ №313 Института проблем механики АН СССР, 1988, 40 с.
- [4] Huynh H.T. Accurate Upwind Methods For The Euler Equations. SIAM J. Numer. Anal., 32(5):1565-1619, 1995.
- [5] Б.Л. Рождественский, Н.Н. Яненко. Система квазилинейных уравнений. Наука, Москва, 1978, 668 с.