

УДК 533.95: 533.9.02+621.455, 535.35 (575.2) (04)

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ПРИЕМНИКОВ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.В. Русских – инженер,
В.С. Слободянюк – докт. физ.-мат. наук

A principal possibility of laser beam absorption by a gas flow is considered in this paper. Some estimated calculations are discussed

В [1] предлагается идея создания лазерного абсорбционного тепловыделяющего элемента – приемника-преобразователя энергии лазерного луча в системах транспортировки энергии в пространстве. Предварительные оценочные расчеты указывают на принципиальную возможность реализации работоспособных устройств подобного рода. Обсуждаются некоторые перспективы их практического использования.

В данной работе анализируются результаты более строгих расчетов характеристик фи-

зических процессов и механизмов преобразования энергии в приемнике-преобразователе энергии лазерного излучения. Основным конструктивным элементом рассматриваемого приемника является канал плазмотрона, имеющий систему охлаждения. Внутри канала с помощью определенной оптической системы вводится лазерный луч достаточно большой мощности (рис. 1). Параметры потока плазмы в канале должны быть сформированы таким образом, чтобы обеспечивалось эффективное поглощение лазерного луча.

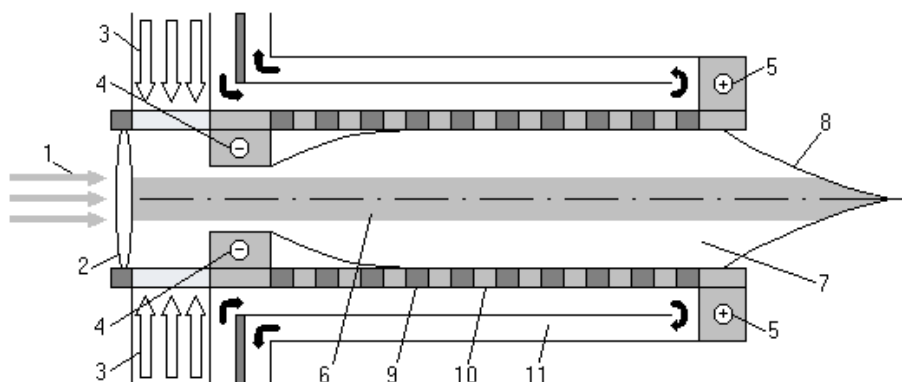


Рис. 1. Оптический плазмотрон:

1 – падающий поток лазерного излучения; 2 – соляная линза; 3 – вдув газа через пористую стенку сопла; 4 – полый катод; 5 – кольцевой анод; 6 – лазерный луч; 7 – поток электродуговой плазмы; 8 – струя плазмы на выходе из плазмотрона; 9 – изолирующие прокладки; 10 – стабилизирующие диафрагмы; 11 – система охлаждения.

Поглощенная энергия монохроматического лазерного излучения отводится к стенкам канала в форме тепловой и излучательной энергии плазмы. Система охлаждения “снимает” эту энергию и “отводит” для дальнейшего использования в тех или иных целях.

Комбинируя плазмотрон с МГД-генератором, можно определенную часть лазерного излучения превращать в электрическую энергию. Возможны и другие варианты, например, плазмотрон и паровая турбина и т. д.

Естественно, что коэффициент полезного действия подобного рода систем может быть низким, особенно, если учесть процесс “закачки” энергии в лазерный луч в пункте отправления и обратный процесс – в пункте приема. Поток электродуговой плазмы в канале плазмотрона выполняет двоякую роль. Прежде всего, он служит для инициирования оптического разряда, так как значительное поглощение лазерного излучения возможно лишь при достаточно высоких температурах плазмы [2]. Кроме того, изменяя силу тока, можно изменять параметры плазмы, используя вариации параметров для управления оптическим разрядом. Однако для этого разряд должен быть сильноточным, что в ряде случаев делает такой способ управления неприемлемым.

Более простым и удобным приемом управления работой приемника-преобразователя представляется рассмотренное в [1] воздействие газового потока на параметры оптического разряда. Можно ожидать, что аналогичный с направлением распространения луча поток позволит сделать теплоотвод к стенке более равномерным по длине канала; встречный поток, – наоборот, сконцентрировать теплообмен в определенной области устройства и защитить какие-то узлы от перегрева; пористый же вдув газа – обеспечить транспортировку тепла внутри канала.

Комбинация плазменных потоков различных направлений в принципе должна обеспечить разнообразие воздействий на оптический разряд в приемнике. В определенных условиях более эффективным может оказаться использование запыленных потоков плазмы, или потоков с частицами. Наличие в поглощающей среде большого числа мельчайших частиц увеличит поглощение лазерного излучения и

его рассеяние на стенки канала, что позволит существенно уменьшить размеры устройства. Но при этом трудно в течение длительного времени обеспечивать обратимый рабочий цикл системы. Фазовые и химические переходы, напыление и оседание частиц на поверхностях деталей приведут к необратимым изменениям в работе системы.

Процессы же в чистой плазме газов, такие как возбуждение, диссоциация, ионизация являются обратимыми и позволяют системе вернуться в исходное состояние после прекращения подачи лазерного излучения. Рост поглощения лазерной энергии в газовой плазме обеспечивается формированием оптимального поля температуры в канале и увеличением давления в нем. Выбор параметров приемника-преобразователя энергии должен удовлетворять определенным требованиям. Так, длина L канала плазмотрона может быть ограничена габаритами конструкции. Потребуем, к примеру, чтобы в канале поглощалось 95% поступающего в него лазерного излучения. Для этого оптическая толщина канала $\kappa \cdot L$ должна быть равна 3 ($q/q_0 \sim e^{-\kappa \cdot L} = e^{-3} = 0,048$), где κ – усредненный по объему коэффициент поглощения. Значение величины “ κ ” ограничено сверху допустимой величиной теплосъема с поверхности канала, а снизу – выбором разумной величины минимального теплового потока с той же поверхности.

Выбранная величина “ κ ” должна быть получена подбором рода газа, его давления и формированием поля температуры. Отношение, в котором должны находиться длина канала и его радиус, можно оценить, полагая режим работы приемника установившимся.

Рассмотрим группу фотонов, прошедших через входное сечение канала в некоторый момент времени. Кванты, не поглощенные средой, будут находиться в канале в течение

времени $\Delta t = \frac{L}{c}$, где c – скорость света.

Энергия поглощенных квантов за это время должна достигнуть стенок канала, так как иначе среда будет нагреваться и режим функционирования не будет установившимся. С учетом этого можно записать

$$\frac{L}{c} \sim \frac{R}{v_{eff}}, \quad (1)$$

где v_{eff} – некоторая средняя эффективная скорость движения тепла к стенке. При переносе тепла к стенке первыми ее достигают кванты рассеянного лазерного излучения, затем – кванты теплового излучения плазмы, запаздывающие за счет релаксационного процесса превращения лазерного излучения в тепловое и реабсорбированное излучение, диффундирующее в радиальном направлении. Можно условно принять, что средняя скорость этих процессов близка к скорости света. Но, наряду с ними, присутствуют и значительно более медленные процессы теплопереноса: конвекция и теплопроводность. Скорость переноса тепла в соответствии с [4] можно оценить соотношением

$$v = \sqrt{\frac{\lambda}{c_p \rho \tau_r}}, \quad (2)$$

где λ – теплопроводность, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, τ_r – время релаксации. Эта скорость по порядку величины близка к скорости звука. С учетом этого можно записать

$$v_{зв} < v_{eff} < c. \quad (3)$$

Если оценивать v_{eff} по наиболее медленному процессу, то можно принять, что $v_{eff} \ll c$, переписать (1) в виде

$$\frac{L}{R} \sim \frac{c}{v_{eff}} \gg 1. \quad (4)$$

Принципиально возможен также альтернативный вариант, при котором приемник-преобразователь работает в высокотемпературном режиме, когда тепловое излучение является определяющим видом переноса тепла. При этом из (1) следует, что

$$\frac{L}{R} \geq 1. \quad (5)$$

Для реализации условия (5), т. е., для сокращения длины канала и увеличения его диаметра, в канале необходимо сформировать та-

кое температурное поле, которое обеспечивает очень большой коэффициент поглощения лазерного излучения. Процесс преобразования энергии может быть весьма интенсивным, что приведет к высоким тепловым нагрузкам на узлы устройства.

Проведем численный анализ процессов, определяющих прохождение лазерного излучения через канал плазмотрона. Этот анализ должен быть основан на одновременном изучении плазмодинамического поля, поля температуры, полей теплового и лазерного излучений. Будем рассматривать вариант, удовлетворяющий условию (4).

1. Модели явлений. Физическая модель комплекса процессов, протекающих в рассматриваемой системе, основана на следующих гипотезах:

1. Стационарный оптический разряд в канале поддерживается монохроматическим лазерным излучением от внешнего источника.

2. Лазерное излучение имеет частоту, значительно превышающую плазменную частоту; оно не отражается плазмой; кроме того, не происходит самофокусировки лазерного луча.

3. Поглощение внешнего излучения и прохождение лазерного луча сквозь плазму описывается законом Бугера-Ламберта.

4. В рабочей среде приемника отсутствуют аэрозоли, частицы, пылинки, приводящие к рассеянию лазерного излучения.

5. Плазма и газ в канале рассматриваются как сплошная среда.

6. Термодинамика процессов рассматривается в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР).

7. Ионизация газа носит термический характер, процессы фотоионизации лазерным излучением отсутствуют, так как энергия квантов значительно меньше энергии ионизации атомов газа, а вероятности многофотонной и ступенчатой ионизации достаточно малы.

8. В разряде существуют три вида теплопередачи: конвекция, теплообмен и перенос тепла излучением. При этом все три вида существуют одновременно.

9. Собственное излучение плазмы имеет тепловую природу и может считаться “объемным” при описании лучистых потерь энергии.

10. Течение плазмы предполагается ламинарным, вязким и несжимаемым (т.е. существенно дозвуковым).

11. Внешние электрические и магнитные поля отсутствуют.

12. Отсутствует “закрутка” газа в канале и не учитывается сила тяжести.

В рамках перечисленных предположений математическая модель задачи получается особенно простой и в то же время способной сохранить основные черты явления.

Система уравнений сводится к газодинамическим уравнениям неразрывности, движения и энергии. В соответствии с условием (4), эти уравнения записываются в приближении пограничного слоя. Система описывает термо- и газодинамику излучающего и поглощающего газа в канале плазмотрона. При этом поглощается монохроматическое лазерное излучение, а испускается – широкий спектр теплового излучения.

Плазменное состояние рабочего вещества сказывается на характеристиках потока через влияние на термодинамические свойства и коэффициенты переноса.

В цилиндрической системе координат (рис. 2) уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u r)}{\partial z} = 0, \\ \rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right), \\ \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial z} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \kappa S_0 e^{-\int \kappa dz'} - \varphi. \end{cases} \quad (6)$$

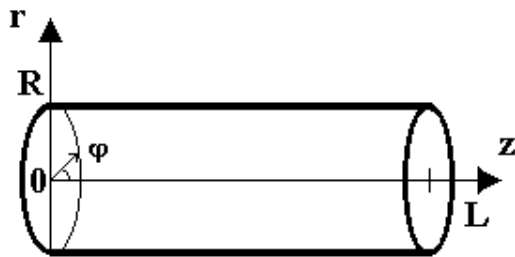


Рис. 2. Система координат.

Система уравнений (6) требует знания зависимостей

$$\mu = \mu(T,P), \lambda = \lambda(T,P), \rho = \rho(T,P), \\ c_p = c_p(T,P), \kappa = \kappa(T,P), \varphi = \varphi(T,P). \quad (7)$$

В (6) и (7) r, z – радиальная и аксиальная координаты; T, u, v – соответственно температура, радиальная и аксиальная скорости потока, S_0 – поток лазерного излучения через начальное сечение канала, ρ – плотность плазмы, λ – коэффициент теплопроводности, μ – вязкость, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, κ – коэффициент поглощения лазерного излучения.

При относительно небольших перепадах давления в канале, учитывая слабую зависимость соотношений (7) от давления, локальные значения этих величин можно считать зависящими только от локальных значений температуры. Система уравнений (6) дополняется граничными условиями: на оси канала задаются условия осевой симметрии, на боковой границе – условия прилипания потока газа к стенке и её непроницаемости, а также условие охлаждения стенки. Во входном сечении канала должны быть известны радиальные профили температуры и скорости, величины давления в газовом потоке и входящей в качестве параметра в уравнение энергии (6) входной плотности лучистой энергии S_0 . Помимо этого задаются еще две величины: перепад давления в канале и род плазмообразующего рабочего газа. Таким образом, граничные условия имеют вид:

$$r = 0: \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (8)$$

$$r = R: \quad u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_R; \quad (9)$$

$$z = 0: \quad u = u^0(r), \quad T = T^0(r) \quad (10)$$

Система (6) решалась методом конечных разностей аналогично [1].

Таким образом, выше построена математическая модель, реализующая общий подход, и определена совокупность критериев, которым должна удовлетворять система. Это дает возможность, задав конкретные условия работы канала приемника-преобразователя, ответить на вопрос: “Как будет работать этот основной узел приемника при заданных условиях?”

2. Обсуждение результатов расчетов.

Расчеты проводились для канала длиной 1 м и диаметром 2 см. В качестве плазмообразующего рабочего газа выбран воздух при давлении 1 атм. Входные профили скорости и температуры взяты в виде

$$u^0(r) = u_A \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right),$$

$$T^0(r) = T_A + (T_R - T_A) \left(\frac{r}{R} \right)^2.$$

При этом $10000 \leq T_A \leq 15000$ К, $T_R = 1000$ К, $0 \leq u_A \leq 100$ м/с, $1 \text{ кВт/см}^2 \leq S_0 \leq 5 \text{ кВт/см}^2$. Перепад давлений составлял 100 Па/м. Термодинамические параметры и коэффициенты переноса брали из работ [3–6].

Для того чтобы определить параметры, при которых плазмотрон может работать как приемник-преобразователь, необходимо, прежде всего, разобраться во взаимосвязи и относительной роли различных процессов, протекающих в рассматриваемом устройстве. С этой целью, на примере цилиндрического канала с приведенными выше значениями геометрических размеров и, выбранных там же, рода и давления газа, исследуем влияние потоков энергии, подаваемых в канал через входное сечение, на характеристики плазмы в канале. Сравним также эти потоки с потоками энергии на выходе канала и через его боковую поверхность.

Энергетические потоки через поперечные сечения трубы имеют по две составляющих: конвективные $Q|_{z=0} = Q_0$, $Q|_{z=L} = Q_L$ и лазерного излучения – $q_l|_{z=0} = q_{l0}$, $q_l|_{z=L} = q_{lL}$. При этом Q_0 создается в самом приемнике, например, плазменной струей, вдуваемой в канал, или дуговым нагревом газа в начальном сечении. Температура плазмы в этом сечении должна обеспечивать заметный коэффициент поглощения лазерного излучения.

Поток энергии на стенку канала, как уже отмечалось, состоит из двух компонентов: потока тепла q_k за счет теплопроводности и потока теплового излучения плазмы q_R , которое превращается в тепло лишь в поверхностном слое стенки.

Для трех вариантов расчета перечисленные величины потоков энергии приведены в таблице.

$u(0,0)$ и S_0	10 м/с; 1 кВт/см ²	10 м/с; 3 кВт/см ²	1 м/с; 1 кВт/см ²
Поток энтальпии при $z = 0$	1161,6	1161,6	116,16
при $z = L$	70,1	69,96	7,04
Поток тепла на стенку	1825,7	3106,1	834,24
Поток излучения на стенку	42,99	52,79	41,68
при $z = 0$	756,5	2269,5	756,5
при $z = L$	1,29	0,72	3,58

$u(0,0)$ – скорость на оси начального сечения, S_0 – плотность потока лазерного излучения. Радиус лазерного пучка вдвое меньше радиуса канала

Из таблицы следует, что можно найти оптимальный режим, при котором приемник-преобразователь работает эффективно. Прежде всего отметим, что, значительная часть лазерного излучения проходит сквозь канал, не задерживаясь в нем, если радиус пучка равен радиусу канала. Кроме того, затраты энергии Q_0 на обеспечение работы устройства соизмеримы или даже превышают количество энергии, выделяемое из лазерного луча.

Положительным моментом, с точки зрения оптимизации конструкции, режима работы и выбора внешних параметров, является то, что поток теплового излучения на стенку канала превышает поток тепла за счет кондуктивной теплопередачи уже при сравнительно низкой температуре на оси входного сечения $T(0,0) \approx 12000$ К.

Поглощение излучения лазера происходит главным образом в приосевой области вблизи входного сечения, в остальной части канала плазмотрона оно практически отсутствует. Примечательно, что в приосевой области вблизи входного сечения поглощается практически вся энергия лазерного луча, попадающая в эту область. Уменьшение радиуса лазерного луча до размеров высокотемпературного ядра

плазменного потока заметно увеличивает эффективность преобразования.

Практически целесообразно не уменьшать поперечные размеры лазерного пучка, а увеличивать диаметр высокотемпературной области плазмы в канале.

Таким образом, для эффективной работы устройства необходимо прежде всего обеспечить однородные радиальные профили температуры и скорости во входном сечении канала. Температура в этом сечении должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить поглощение лазерного излучения. Входную же скорость желательно выбрать минимально возможной, чтобы не создавать большого конвективного потока через входное сечение, так как этот поток должен быть создан в самом приемнике, что усложнит конструкцию последнего.

Литература

1. Малкин А.А., Парфенов М.Н., Русских И.В., Слободянок В.С. Лазерный абсорбционный тепловыделяющий элемент // Вестник КРСУ. – 2003. – Т. 3. – №5. – С. 71–75.
2. Математическое моделирование электрической дуги./ Под ред. В.С. Энгельшта. – Фрунзе: Илим, 1983. – 363 с.
3. Авилова И. В., Биберман Л.В., Воробьев В.С. и др. Оптические свойства горячего воздуха. – М.: Наука, 1970. – 320 с.
4. Таблицы термодинамических функций воздуха для температур от 12000 до 20000 К и давлений от 0,001 до 1000 атмосфер // Под ред. А.С. Предводителя. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 230 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963. – 708 с.
6. Соколова И.А. Коэффициенты переноса воздуха в области температур 3000-25000 К и давлений 0,1; 1; 10; 100 атм. // ПМТФ. – 1973. – № 2. – С. 80–90.