

07

© 1990

СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА  
ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

А.Я. В о р о б ь е в, М.Н. Л и б е н с о н

Известны работы [1, 2] по инициированию гетерогенного поверхностного горения материалов посредством непрерывного и импульсно-го лазерного излучения. В [3] получены свидетельства дополнительного энерговыделения химического происхождения в эрозионном факеле, возникающем при облучении металлов короткими лазерными импульсами. В данной работе подход [3] распространен на твердые топлива для изучения принципиальной возможности эффективного сжигания топлива лазерными импульсами.

Исследовано сжигание каменного угля и прессованного гексаметилен-тетрамина ( $C_6H_{12}N_4$ ) одиночными импульсами неодимового лазера с длительностью 50 нс и плотностью мощности излучения в диапазоне 1–800 МВт/см<sup>2</sup>. Топливо сжигалось внутри камеры сгорания в виде протяженной цилиндрической полости из нержавеющей стали с наклонным дном. Угол наклона дна полости относительно ее оси составлял 60°. Таблетка исследуемого топлива прикреплялась ко дну камеры сгорания с помощью теплопроводящей пасты. Лазерное излучение фокусировалось внутрь полости на топливо посредством линзы. Размер области горения продуктов эрозии топлива и распространения поддерживаемых лазерным излучением волн поглощения был меньше длины камеры сгорания. Коэффициент поглощения лазерного излучения цилиндрической полостью практически равнялся единице. По этим причинам выделяемая в камере сгорания энергии составляла сумму энергии лазерного импульса  $W$  и энергии сгорания топлива  $E$ . Сумма  $E+W$  измерялась калориметрическим методом. Для уменьшения теплообмена с внешней средой камера сгорания помещалась внутри эбонитовой и дюралюминиевой оболочек. Приращение средней температуры камеры сгорания, обусловленное ее нагревом при выделении энергий  $E$  и  $W$ , измерялось проволочным термометром сопротивления. Калибровка калориметра осуществлялась пропусканием импульса электрического тока известной энергии через установленный на камере сгорания электронагреватель. Величина  $W$  определялась прибором ИМО-2Н, на который стеклянной пластинкой отвечалась часть лазерного излучения. Плотность энергии падающего лазерного излучения на поверхности топлива менялась с помощью нейтральных светофильтров и изменением диаметра пятна фокусировки. Погрешность измерений  $E+W$  и  $W$  не превышала  $\pm 10\%$ . Эксперименты проводились в воздухе и кислороде атмосферного давления. Перед измерениями поверхность таблетки топлива подвергалась лазерной очистке.

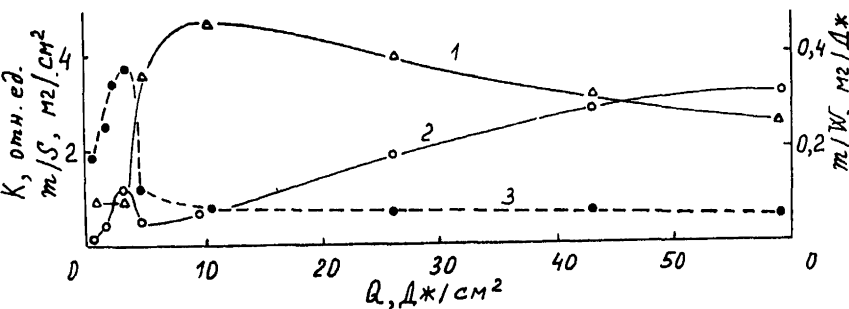


Рис. 1. Зависимости  $K$  (1),  $m/S$  (2) и  $m/W$  (3) от  $Q$  для угля, облучаемого в воздухе.

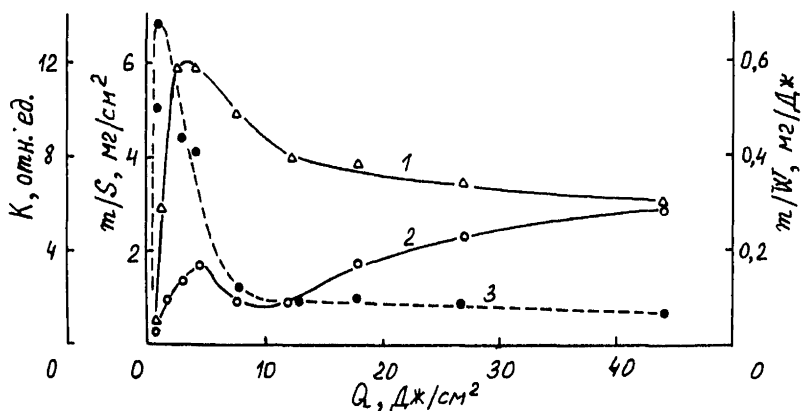


Рис. 2. Зависимости  $K$  (1),  $m/S$  (2) и  $m/W$  (3) от  $Q$  для угля, облучаемого в кислороде.

По измеренным  $E+W$  и  $W$  определялся коэффициент энерговыделения  $K=(E+W)/W$  в зависимости от плотности энергии падающего лазерного излучения  $Q=W/S$ , где  $S$  - площадь пятна лазерного излучения на поверхности топлива. Формула перевода  $Q$  в плотность мощности в максимуме лазерного импульса  $I$  имеет вид:  $I$  [МВт/см<sup>2</sup>] = 16.7 [МВт/Дж] ·  $Q$  [Дж/см<sup>2</sup>].

На рис. 1-3 приведены полученные зависимости  $K(Q)$ . Графики показывают, что энергия, получаемая при действии лазерного излучения на исследованные топлива, значительно превышает энергию лазерного импульса и примерно на порядок больше энергии, выделяемой при облучении металлов [3]. В кислороде по сравнению с воздухом величина  $K$  угля в два раза больше, а ее скачок наступает при меньшей  $Q$ .

В результате воздействия лазерного излучения на топливо часть энергии отводится благодаря теплопроводности вглубь таблетки. Для

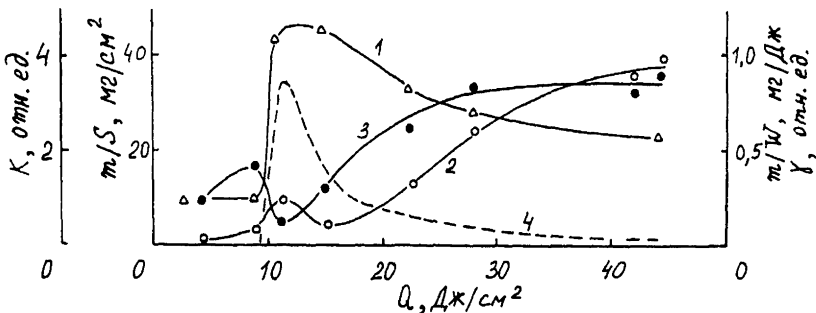


Рис. 3. Зависимости  $K$  (1),  $m/S$  (2),  $m/W$  (3) и  $\gamma$  (4) от  $Q$  для гексаметилентетрамина, облучаемого в воздухе.

определения этой энергии образец угля облучался не внутри камеры сгорания, а в открытом воздухе. Отводимая энергия  $H$  измерялась калориметрическим методом, применявшимся ранее в исследованиях теплового воздействия лазерного излучения на металлы [4, 5]. По измерениям  $H$  определялся коэффициент теплового воздействия на таблетку топлива  $A = H/W$ . Ниже порога повреждения угля ( $Q < 0.3 \text{ Дж/см}^2$ ) коэффициент  $A = 0.84 \pm 0.09$ . В области  $0.3 < Q \leq 6 \text{ Дж/см}^2$  величина  $A$  уменьшается до значения  $0.35 \pm 0.03$ , которое практически не меняется при  $Q > 6 \text{ Дж/см}^2$ . Таким образом, в воздухе вглубь таблетки топлива отводится несущественная доля энергии.

Взвешиванием таблетки топлива до и после облучения известным числом одинаковых лазерных импульсов определялась масса топлива  $m$ , удаляемая одним импульсом. На основании этих измерений найдены характеристики  $m/S$  и  $m/W$  в зависимости от  $Q$ . Эти характеристики для угля показаны на рис. 1 и 2. Вынос массы угля независимо от сорта окружающей газовой среды начинается при  $Q = 0.3 \text{ Дж/см}^2$ , тогда как скачок  $K$  наступает при  $Q_c = 3.2$  и  $0.8 \text{ Дж/см}^2$  в воздухе и кислороде соответственно. В воздухе значения  $m/S$  и  $m/W$  возрастают при повышении  $Q$  до  $Q_c = 3.2 \text{ Дж/см}^2$  и уменьшаются в области скачка  $K$ . При  $Q > 8 \text{ Дж/см}^2$ , где  $K$  постепенно убывает, величина  $m/S$  возрастает, а  $m/W$  плавно уменьшается с ростом  $Q$ . В кислороде зависимости  $m/S$  и  $m/W$  от  $Q$  для угля количественно отличны от измеренных в воздухе. Особенности графиков  $m/S$  и  $m/W$  от  $Q$  для гексаметилентетрамина (рис. 3) обусловлены значительной величиной эрозионной массы, что объясняется хрупкостью и рассыпчатостью этого вещества.

Используя справочные значения удельной теплоты сгорания каменного угля ( $G = 31 + 3 \text{ кДж/г}$  [6]) и гексаметилентетрамина ( $G = 30 \text{ кДж/г}$  [7]), получены коэффициенты  $d = mG/W$  и  $\gamma = E/mG = (K-1)W/mG$ , характеризующие эффективность процесса сжигания. Графики  $d(Q)$  и  $\gamma(Q)$  угля приведены на рис. 4. Из зависимостей  $d(Q)$  видно, что максимальное значение

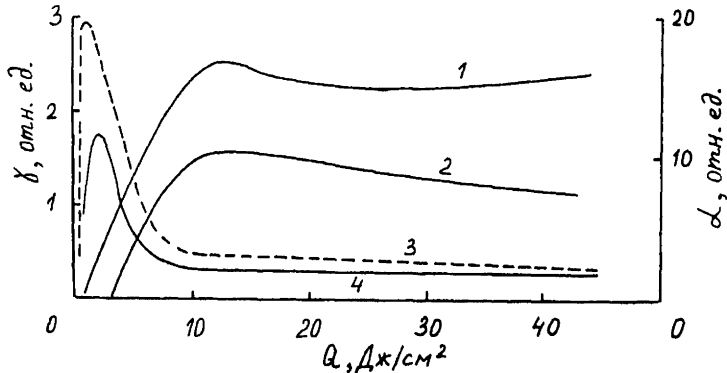


Рис. 4. Зависимости  $\gamma(Q)$  (1 - в кислороде, 2 - в воздухе) и  $\alpha(Q)$  (3 - в кислороде, 4 - в воздухе) для угля.

$\alpha$  равно 12 в воздухе при  $Q = 3.1$  Дж/см<sup>2</sup> и 20 в кислороде при  $Q = 1.4$  Дж/см<sup>2</sup>. Эти значения  $\alpha$  вдвое больше максимальных величин  $K$ , что указывает возможность повышения эффективности сжигания топлива, например, путем использования двух лазерных импульсов: одного для получения значительной эрозионной массы, а второго для ее поджига. В воздухе и кислороде при  $Q > 8$  Дж/см<sup>2</sup> значения коэффициента  $\alpha$  угля малы, поэтому относительно вложенной энергии лазерного импульса сжигание топлива в этой области  $Q$  не является эффективным. Зависимости  $\gamma(Q)$  угля показывают, что имеет область  $Q$ , где  $\gamma > 1$ , то есть измеренная нами энергия  $E$  больше энергии, содержащейся в эрозионной массе. Возможной причиной этого является горение некоторого количества угля на поверхности таблетки. Для гексаметилентетрамина (рис.3)  $\gamma < 1$  во всей исследованной области  $Q$ . При  $Q > 15$  Дж/см<sup>2</sup>, несмотря на большие значения  $m/W$ , сжигание данного топлива не является эффективным, так как сгорает малая часть эрозионной массы.

Из проведенных исследований вытекают следующие основные выводы. Тепловая энергия, получаемая сжиганием твердого топлива лазерным импульсом, значительно превышает энергию последнего. В этом смысле лазерное сжигание твердых топлив является эффективным. Выделенная тепловая энергия зависит от сорта окружающей газовой среды и плотности энергии падающего лазерного излучения. При заданной плотности энергии падающего лазерного излучения выделяется определенная тепловая энергия. Это позволяет изменение параметров лазерного импульса и момента подачи лазерного импульса в камеру сгорания осуществить процесс сжигания, управляемый по времени и по величине выделяемой тепловой энергии.

Результаты работы демонстрируют и специфические особенности механизмов разрушения и энергобаланса в процессе импульсного лазерного воздействия на твердые хрупкие материалы в окисли-

тельной газовой среде. Основная из них заключается в том, что материал в зоне лазерного воздействия разрушается путем хрупкого растрескивания и в значительной степени выносится в окружающий газ в виде твердых частиц малых размеров, которые сгорают в процессе разлета с большим экзотермическим эффектом.

Приведенные экспериментальные данные получены без оптимизации камеры сгорания, окислительной газовой среды, а также длительности, формы и частоты следования лазерных импульсов. Это дает возможности повышения эффективности лазерного сжигания твердых топлив как по степени сгорания эрозивной массы, так и по отношению выделенной химической энергии к вложенной энергии лазерного импульса.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б о н ч - Б р у е в и ч А.М., Л и б е н с о н М.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 6. С. 1104-1118.
- [2] Б у н к и н Ф.В., К и р и ч е н к о Н.А., Л у к ь я н ч у к Б.С. // УФН. 1982. Т. 138. В. 1. С. 45-94.
- [3] В о р о б ь е в А.Я. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 18. С. 28-30.
- [4] M a r c u s S., L o w d e r J.E., M o o n e y D.L. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 7. P. 2966-2969.
- [5] В о р о б ь е в А.Я. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 4. С. 794-754.
- [6] Политехнический словарь. М.: СЭ, 1977. 608 с.
- [7] Химическая энциклопедия. М.: СЭ, 1988. Т. 1. 623 с.

Харьковский государственный университет

Поступило в Редакцию  
25 августа 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 19

12 октября 1990 г.

10; 11

© 1990

### ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ИЗ РАСПЛАВОВ ГАЛОГЕНИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Н.В. А л ь к р и н с к а я, В.В. К а в и ц к и й,  
В.Б. К а з н а ч е е в, А.Б. М о к р о в

За последние годы достигнуты значительные успехи в области исследования, разработки и применения жидкометаллических источников ионов, обладающих уникально высокой яркостью и малыми размерами эмиссионной области. Необходимость расширения спектра получаемых ионов привела ряд исследователей к попытке получения положительных ионов с помощью ЭГД-эмиссии из расплавов