

результаты экспериментально подтверждают работоспособность трехградационной линзы Френеля, изготовленной по серому фотошаблону. Дальнейшее повышение качества линзы и ее изображающих свойств может быть достигнуто увеличением числа экспозиций и точности их проекционного совмещения.

Авторы благодарят А. А. Еремеева за выполнение фоторабот.

### Список литературы

- [1] *Jordan J. A., Hirsch P. M., Lesem L. B., van Rooy D. L.* // *Appl. Opt.* 1970. Vol. 9. N 8. P. 1883—1887.
- [2] *Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г.* Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.

Научно-техническое объединение  
Центральное конструкторское бюро  
уникального приборостроения АН СССР  
Куйбышевский филиал

Поступило в Редакцию  
31 января 1990 г.

03

Журнал технической физики, т. 61, в. 4, 1991

© 1991 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССОЦИАЦИИ СЕРОВОДОРОДА В СМЕСИ С УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ В СВЧ РАЗРЯДЕ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

*А. З. Багаутдинов, В. К. Животов, И. А. Калачев, С. Ю. Мусинов,  
А. М. Пампушка, В. Д. Русанов, В. М. Цоллер, П. Я. Эпп*

Процессы диссоциации сероводорода в плазме в настоящее время изучаются как теоретически, так и экспериментально [1, 2]. Поскольку ископаемому сероводороду часто сопутствует углекислый газ, то представляет интерес изучение процесса диссоциации  $H_2S$  в плазме в присутствии  $CO_2$  [3, 4]. В [4] процесс диссоциации смеси  $H_2S-CO_2$  (так называемый кислый газ) в плазме (СВЧ разряд мощностью до 2 кВт;  $f=2.45$  ГГц) исследовался экспериментально (энерговклад порядка 3 Дж/см<sup>3</sup>, соотношение  $H_2S : CO_2=1 : 2$ ; давление  $P \sim 100$  Тор; энергозатраты на молекулу продукта-энергоносителя  $H_2, CO \sim 2.1$  эВ/мол  $\approx 2.5$  кВт·ч/м<sup>3</sup>).

В данной работе исследование процесса диссоциации было проведено в СВЧ разряде в кислом газе ( $H_2S : CO_2 \approx 6 : 5$ ) Оренбургского месторождения [5]. Одной из целей работы является изучение вопроса о масштабировании процесса, т. е. характере реакции при увеличении мощности разряда и давления при неизменном энерговкладе

$$E = \frac{W_{пл}}{Q^0} \quad (1)$$

(отношении величины вкладываемой в плазму мощности  $W_{пл}$  к расходу газа на входе в плазматрон  $Q^0$ ).

Исследовалась также важнейшая энергетическая характеристика процесса — зависимость энергозатрат на единицу количества продукта от энерговклада.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Кислый газ с установки аминной очистки природного газа через измеритель расхода — диафрагму 1, регулятор расхода — клапан 2 и узел закрутки газа 8 плазматрона подается в разрядную камеру 6, представляющую собой кварцевую трубу внутренним диаметром 100 мм. Продукты процесса после блока конденсации серы 4 поступают на вход вакуумных водокольцевых насосов 5. Измерение расхода газа  $Q^0$  осуществлялось по стандартной методике путем замера перепада давления на диафрагме с учетом давления и температуры. Регулирование давления в разряде осуществлялось при помощи клапана 3 на байпасе вакуумных насосов.

В данном эксперименте двухуровневый СВЧ плазматрон [5] с четырьмя вводами энергии (тип волны  $H_{10}$ ) был подключен к трем независимым источникам СВЧ излучения (магнетронам) средней мощности до 125 кВт каждый: на нижнем уровне два источника навстречу друг другу, на верхнем один источник и согласованная нагрузка 7 (рис. 1). Поглощаемая в плазме мощность  $W_{пл}$  определялась калориметрическим способом

$$W_{пл} = W_{эл} - W_T - W_n. \quad (2)$$

Здесь  $W_{эл}$  — подводимая к источникам излучения электрическая мощность;  $W_T$  и  $W_n$  — тепловые мощности, снимаемые водой, охлаждающей источники и согласующую нагрузку.

Анализ состава газа до и после плазмотрона производился при помощи хроматографов «Цвет-500». Отбор проб для анализа газа сразу после плазмотрона осуществлялся при помощи специального пробоотборника 9, позволяющего вводить в хроматограф пробы, отобранные при давлении ниже атмосферного.

Газовая смесь после плазмотрона при энерговкладах  $E \sim 1$  эВ/мол. содержит следующие компоненты:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ . Свободный кислород и сернистый ангидрид в количествах, позволяющих сделать вывод об их образовании в разряде, отсутствуют. Этот результат согласуется с термодинамическими расчетами, проведенными в [3]. Таким образом, процесс, протекающий в плазме разряда при  $E \sim 1$  эВ/мол, может быть описан следующей суммарной реакцией:

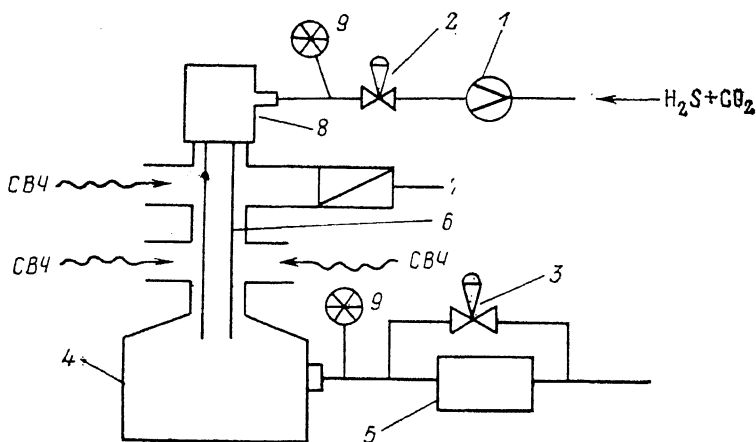
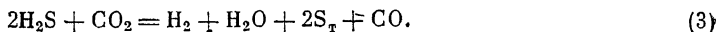


Рис. 1. Схема эксперимента.



Степень конверсии сероводорода  $\alpha_{H_2S}$  и степень конверсии углекислого газа  $\alpha_{CO_2}$  по определению

$$\alpha_{H_2S} = 1 - \frac{Q_{H_2S}}{Q_{H_2}^0}, \quad (4)$$

$$\alpha_{CO_2} = 1 - \frac{Q_{CO_2}}{Q_{CO_2}^0}, \quad (5)$$

где  $Q^0$  и  $Q$  — расходы газов до плазмотрона и после плазмотрона.

Из (4), (5) следует с учетом (3)

$$\alpha_{H_2S} = \frac{Q_{H_2} + Q_{CO}}{Q_{H_2S} + Q_{H_2} + Q_{CO}} \approx \frac{C_{H_2} + C_{CO}}{C_{H_2S} + C_{H_2} + C_{CO}}, \quad (6)$$

$$\alpha_{CO_2} = \frac{Q_{CO}}{Q_{CO} + Q_{CO_2}} = \frac{C_{CO}}{C_{CO} + C_{CO_2}}. \quad (7)$$

Здесь  $C_{H_2}$ ,  $C_{H_2S}$ , ... — процентное содержание соответствующих веществ в потоке газа после плазмотрона, определяемое хроматографом. Энергозатраты  $A$  на получение молекулы продукта энергоносителя ( $H_2$ ,  $CO$ ) определяются как

$$A_{H_2, CO} = \frac{W_{пл}}{Q_{H_2} + Q_{CO}}, \quad (8)$$

а с учетом (3):

$$A_{H_2, CO} = \frac{W_{пл}}{Q^0 \cdot C_{H_2S}^0 \cdot \alpha_{H_2S}} \quad (9)$$

(здесь  $C_{H_2S}^0$  — концентрация сероводорода в газе на входе в плазмотрон).

Результаты экспериментов по исследованию зависимости степени диссоциации (конверсии)  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$  от давления в разряде представлены на рис. 2. Эксперименты проводились

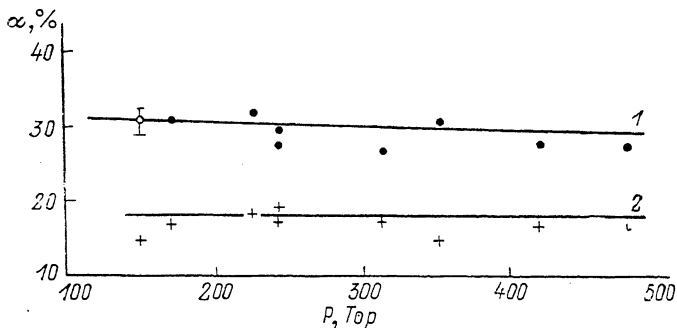


Рис. 2. Зависимость степени конверсии от давления  $P$ .  
1 -  $\alpha_{\text{H}_2\text{S}}$ , 2 -  $\alpha_{\text{CO}_2}$ .

при энерговыкладе  $E=0.55-0.6$  эВ/мол. ( $W_{\text{пл}} \sim 70$  кВт). Как видно из рис. 2, в диапазоне давлений 150—480 Торр величины  $\alpha_{\text{H}_2\text{S}}$  и  $\alpha_{\text{CO}_2}$  (а следовательно, и энергозатраты  $A$ ) от давле-

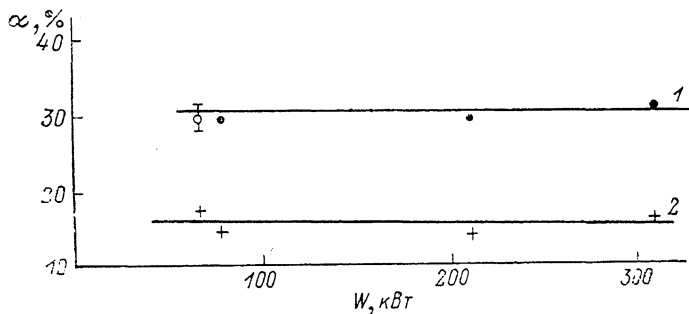


Рис. 3. Зависимость степени конверсии  $\alpha$  от мощности  $W$ .  
 $P=220-240$  Торр; 1 -  $\alpha_{\text{H}_2\text{S}}$ , 2 -  $\alpha_{\text{CO}_2}$ .

ния зависят слабо. Анализ некоторых причин возможной зависимости параметров плазмохимического процесса от давления проведен в [6].

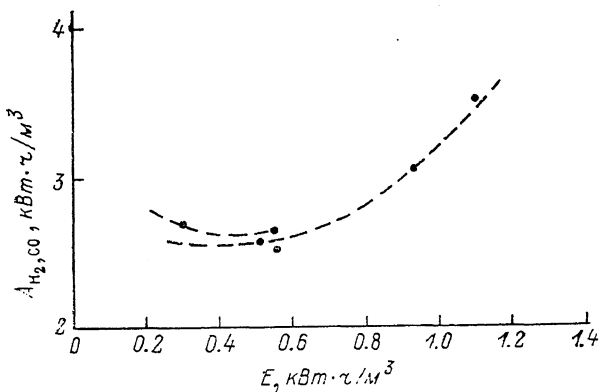


Рис. 4. Зависимость энергозатрат  $A$  процесса от удельного энерговыклада  $E$ .  
 $W_{\text{пл}}=50-100$  кВт,  $P=170-240$  Торр.

Результаты эксперимента по масштабированию процесса при увеличении мощности  $W_{\text{пл}}$  приведены на рис. 3. При постоянном энерговыкладе  $E=0.62$  эВ/мол. в диапазоне  $W_{\text{пл}}$  от 65 до 310 кВт определялись  $\alpha_{\text{H}_2\text{S}}$  и  $\alpha_{\text{CO}_2}$ . Как видно, эти величины от уровня вложенной мощ-

ности практически не зависят. Это означает, что в рассматриваемых условиях основным фактором, влияющим на процесс диссоциации, является относительная величина — энерговклад (рис. 4). Повышение значения  $W_{пл}$  приводит к изменению видимой структуры разряда — появлению «нитей» вблизи стенок реакторной трубки со стороны падения СВЧ мощности вдоль линий тока закрученного потока газа. Температура внутри этих «нитей» значительно выше, чем у окружающего газа. Такое изменение структуры разряда сказывается на стабильности работы плазмотрона, однако на сам процесс диссоциации смеси  $H_2S-CO_2$ , как показано, не влияет.

Исследование зависимости степени диссоциации и энергозатрат  $A$  процесса от удельного энерговклада  $E=W_{пл}/Q$  проводилось в рамках усилий по минимизации величины  $A$ . Уровень энергозатрат процесса чувствителен к изменению газодинамических и электродинамических условий организации разряда, состава газа, условий в послеразрядной зоне. Результаты одной из серий экспериментов, в которой достигнуты энергозатраты  $\sim 2.5$  кВт·ч/м<sup>3</sup> ( $H_2$ , CO), приведены на рис. 4.

Таким образом, процесс диссоциации компонент «кислого газа» — сероводорода и углекислого газа в СВЧ разряде масштабируется при увеличении мощности разряда до 300 кВт и при увеличении давления до  $\sim 500$  Тор.

### Список литературы

- [1] Балебанов А. В., Бутылин Б. А., Животов В. К. и др. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 3. С. 657—660.
- [2] Русанов В. Д., Фридман А. А., Мачерет С. О. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. № 3. С. 590—594.
- [3] Нестер С. А., Русанов В. Д., Фридман А. А. Препринт ИАЭ. № 4430/6. М., 1987. 28 с.
- [4] Азизов Р. И., Вакар А. К., Животов В. К. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 79—82.
- [5] Багаутдинов А. З., Верин А. Е., Демкин С. А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. М., 1989. № 3. С. 59—60.
- [6] Багаутдинов А. З., Животов В. К., Калачев И. А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. 1989. № 3. С. 56—59.

Институт атомной энергии  
им. И. В. Курчатова  
Москва

Поступило в Редакцию  
21 февраля 1990 г.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ В ВОЗДУХЕ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ (СТРИМЕРА) ПО КАНАЛУ, ИНИЦИИРУЕМОМУ ИЗЛУЧЕНИЕМ УФ ЛАЗЕРА

А. А. Антипов, А. З. Грасюк, А. К. Жигалкин, Л. Л. Лосев, В. И. Сосков

### Введение

Известные способы управления искровым разрядом с помощью лазерного излучения основаны на создании в межэлектродном промежутке высокопроводящего плазменного образования. Поляризация плазмы приводит к искажению внешнего электрического поля, локальному повышению его напряженности и, как следствие, к искровому пробое. Таким образом осуществляется, например, управление разрядниками с лазерным поджигом [1] с межэлектродным зазором  $\sim 0.1-1$  см. При этом лазерное излучение фокусируется либо на поверхность одного из электродов, либо в межэлектродный промежуток.

Для управления разрядами с длиной  $0.1-1$  м фокусировка лазерного излучения обычно осуществляется аксиконом или длиннофокусной линзой. Применение аксикона позволило получить при оптическом пробое газа сплошную лазерную искру длиной  $\sim 0.2$  м, которой замыкали цепь электрического разряда [2].

Управление с помощью лазерного излучения искровым разрядом длиной  $\sim 1$  м исследовалось в [3, 4]. Излучение мощных лазеров ИК диапазона (с длинами волны 1.06 или