

УДК 621.365.91:533.9

## **ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА\***

**А.С. АНЬШАКОВ, И.М. УЛАНОВ, Э.К. УРБАХ, А.Э. УРБАХ, В.А. ФАЛЕЕВ**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

Используя в качестве модельного газа метан, проведены экспериментальные исследования плазменной электропечи переменного тока с графитовыми электродами. Показана ее перспективность для получения водорода и мелкодисперсной сажи. Установлено, что для практически полного разложения метана достаточно, чтобы температура стенки реактора составляла 1150–1200 °С. Показано, что удельная эрозия графитовых электродов составляет примерно  $5 \cdot 10^{-9}$  кг/Кл при средней плотности тока  $32 \text{ А/см}^2$ .

В настоящее время при добыче нефти основная часть попутного газа сжигается в факелах, отравляя атмосферу. Этот газ содержит до 70 и более процентов метана и является ценным сырьем для химической промышленности. Однако его количество относительно мало, а стоимость подготовки и транспортировки на химические предприятия настолько велики, что использовать его в настоящее время невыгодно. Экономически более перспективно перерабатывать газ на месте в малообъемные продукты, например, в сажу, которую можно использовать для производства автомобильных шин и других резинотехнических изделий.

Для снижения затрат электроэнергии на производство сажи небольшую часть попутного газа и водород, получающийся в электропечи в результате конверсии, можно использовать для предварительного подогрева очищенного от влаги и пыли попутного газа, подаваемого непосредственно в реакционную зону электропечи. В качестве модельного газа в экспериментах использовался метан.

### **1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА**

Схема плазменной электропечи и ее газового тракта представлена на рис. 1. В данной печи источником энергии, необходимой для разложения метана на углерод и водород, является электрическая дуга переменного тока, горящая между двумя графитовыми электродами 1, расположенными по отношению друг к другу под углом 39°. Электроды крепятся в водоохлаждаемых электрододержателях 3, приваренных к съемной крышке 4. В каждом электрододержателе имеются уплотнение и изолятор. Уплотнения исключают выход водорода из печи в атмосферу. Изоляторы обеспечивают изоляцию электродов как друг от друга, так и от крышки. Рабочий газ подается в печь через штуцер 12.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного контракта № 02.515.11.5010 от 6 марта 2007 года.

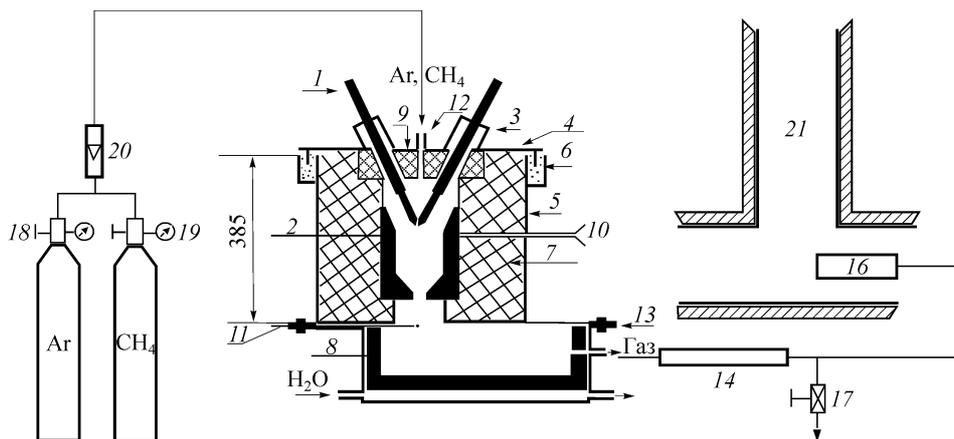


Рис. 1. Схема электропечи и ее газового тракта.

1 — графитовый электрод, 2 — графитовый реактор, 3 — водоохлаждаемый держатель электрода, 4 — крышка, 5 — корпус печи, 6 — песочный затвор, 7 — футеровка, 8 — графитовый холодильник, 9 — огнеупор, 10 — термопара, 11 — термопара, 12 — штуцер подачи рабочего газа, 13 — резиновое уплотнение, 14 — 2-й холодильник, 16 — пылеуловитель, 17 — кран отбора газа для анализа, 18, 19 — редукторы, 20 — ротаметр, 21 — вентиляция.

В средней части печи находится графитовый реактор 2. Для исключения попадания воздуха в печь и выхода из нее водорода имеется песочный затвор 6. Корпус печи водой не охлаждается. Его охлаждение осуществляется потоком воздуха вентиляционной системы 21. Футеровка 7 выполнена из шамотного кирпича.

Для охлаждения продуктов реакции, истекающих из реактора, под днищем электропечи расположен графитовый холодильник 8. Печь снабжена двумя термопарами для измерения температуры внешней стенки реактора и температуры газа, поступающего из реактора 2 в холодильник 8. Далее газ поступает во второй холодильник 14. Отбор газа в колбы для анализа осуществляется через кран 17, расход газа измеряется ротаметром 20.

Представленная на рис. 1 печь по существу является дуговой печью косвенного действия. В ней из-за большого внутреннего диаметра и малой длины дуги лишь небольшая часть метана  $\text{CH}_4$  взаимодействует с дугой. Основная часть газа нагревается за счет многократного переизлучения энергии от дуги к стенке реактора и от реактора к газу. Графит выбирался из тех соображений, что он, обладая высокими значениями теплопроводности ( $\lambda_{\text{ср}} \approx 112 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) и спектрального коэффициента излучения ( $\epsilon_{\lambda} \geq 0,82$ ), может обеспечить относительно равномерный прогрев газа в реакторе как по длине, так и по сечению его внутреннего объема. Кроме того, равномерный прогрев стенки реактора до высоких температур позволяет исключить оседание углерода на стенке в его нижней зауженной части (см. рис. 1).

Согласно термодинамическим расчетам [1] время  $\tau$  нахождения  $\text{CH}_4$  в высокотемпературном потоке до полного его разложения на C и  $\text{H}_2$  должно быть  $\tau > 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Оценки показывают, что при диаметре 10 см и длине линейной части реактора 9 см время нахождения  $\text{CH}_4$  в реакторе составит более  $5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ . Этого вполне достаточно для полного разложения метана на водород и углерод.

Схема электропитания печи представлена на рис. 2. Для питания печи использовалось линейное напряжение 380 В с допустимой токовой нагрузкой не более 150 А. Поджиг дуги осуществлялся в аргоновой среде при расходе  $\approx 100 \text{ л/ч}$  касанием электродов друг к другу. При этом ток короткого замыкания в цепи не

Рис. 2. Схема электропитания печи.

должен превышать 150 А. Поэтому в цепи питания установлено два сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , ограничивающие величину тока. Напряжение на короткозамкнутой дуге составляет  $\leq 5$  В, ток дуги  $\approx 90$  А. Со временем происходит подгорание электродов, напряжение на дуге медленно растет, а ток падает. В этом режиме дуга может гореть длительное время. Поскольку при этом выделяемая в дуге тепловая мощность невелика, то для ускорения прогрева печи после 10 минут прогрева электродов их раздвигают на незначительную величину настолько, чтобы контролируемое напряжение возросло до  $\approx 50$  В, при этом ток дуги снижается до  $\approx 80$  А. После этого сопротивление  $R_2$  шунтируют контактором  $K_2$ , напряжение на дуге остается практически на том же уровне, а ток дуги возрастает до  $\approx 130$  А. Далее напряжение на дуге постепенно повышается, а ток дуги снижается. Прогрев реактора до  $T > 1100$  °С длится около 80 мин.

После прогрева стенки реактора до 1100–1150 °С подают метан с расходом 200 л/ч и прекращают подачу аргона. В течение 5 минут по мере вытеснения аргона из печи напряжение дуги повышается, а ток уменьшается. Когда износ электродов становится заметным, падение напряжения на дуге возрастает настолько, что дуга может погаснуть. Чтобы дуга не гасла, электроды необходимо периодически поддвигать друг к другу и правильно подбирать величины сопротивления  $R_1$  и индуктивности  $L$ . Для этого целесообразно использовать представленное на рис. 3 условие непрерывного горения дуги переменного тока [2]. При значениях  $\omega L/R$ , лежащих ниже кривой, дуга всегда будет гореть устойчиво. Здесь  $\omega L$  — индуктивное сопротивление,  $R$  — активное сопротивление цепи,  $U_d$  — напряжение на дуге,  $U_m$  — напряжение источника питания,  $X_L = \omega L$ .

В действительности, мощные дуговые печи работают устойчиво и при более высоких значениях  $U_d/U_m$ . Объясняется это тем, что для устойчивого горения дуги непрерывное горение не обязательно, дуга может быть устойчивой и при наличии пауз тока, когда при больших токах электроды печи сильно раскалены и их тепловая инерция велика [2]. Проведенные эксперименты на модельной печи подтвердили это положение. Первоначально использовались электроды диаметром 28 мм. Но поскольку диапазон возможного изменения тока был ограничен ( $I_d < 150$  А), то электроды прогревались недостаточно, и дуга обрывалась при  $U_d < 120$  В. Поэтому для лучшего прогрева рабочей части электродов и обеспечения их механической прочности они были изготовлены в виде цилиндров переменного сечения (рис. 4). Устойчивость горения дуги заметно повысилась, и после прогрева графитового реактора

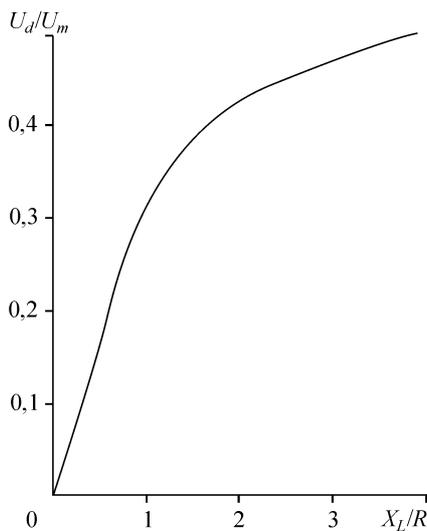
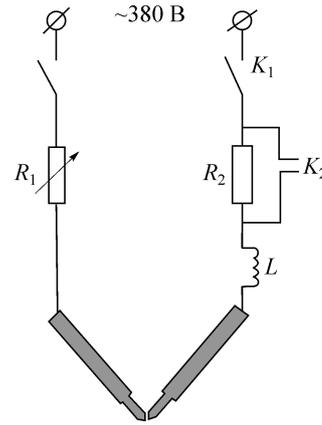


Рис. 3. Условие непрерывного горения дуги в зависимости от соотношений  $U_d/U_m$  и  $X_L/R$ .



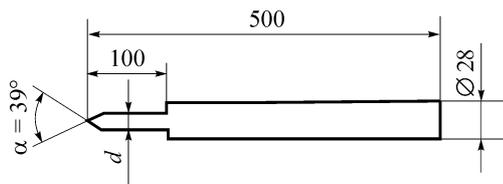


Рис. 4. Графитовый электрод.  
 $d = 12, 16$  мм при  $I_{cp} = 80$  и  $100$  А соответственно.

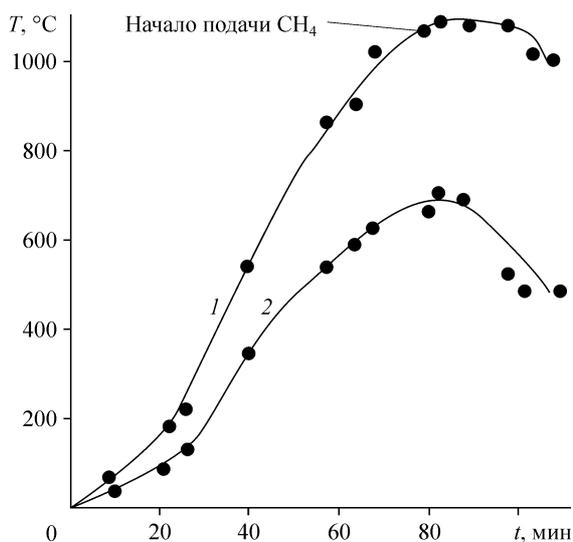
свыше  $1150^\circ\text{C}$  дуга горит устойчиво до  $220$  В. Здесь значения  $U_d/U_m$  находятся уже выше кривой, представленной на рис. 3, что соответствует выводам работы [2].

Электроды, использовавшиеся в экспериментах, были изготовлены из графитированного материала марки ЭГО. Величина удельной эрозии  $\bar{G}$  электродов с  $d = 14$  и  $16$  мм (см. рис. 4) при средней плотности тока  $32 \text{ A/cm}^2$  составляет  $\approx 5,4 \cdot 10^{-9}$  кг/Кл. Она определялась по формуле  $\bar{G} = \Delta m / I \cdot \Delta t$ . Здесь:  $\Delta m$ , кг — выработанная за время  $\Delta t$ , с масса электрода,  $I$ , А — среднее значение тока. Указанное значение  $\bar{G}$  является очень низким. Оно во много раз ниже, чем в дуговых сталеплавильных печах. Возможно, это связано с известным явлением осаждения пироуглерода на графитовых катодах в метаносодержащих средах [3], замедляющим износ электродов, так как каждый из них половину времени работы является катодом.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе проведения экспериментов выявилось, что при замене аргона на метан и неизменной мощности дуги темп нагрева реактора резко снижается (рис. 5). Это обусловлено ростом затрат энергии на разложение метана. При увеличении расхода  $\text{CH}_4$  от  $125$  до  $275$  л/ч рост температуры реактора прекращается, а при дальнейшем увеличении расхода  $\text{CH}_4$ , начиная с  $375$  л/ч, температура реактора снижается. Это означает, что для каждой заданной мощности электропечи существует оптимальный расход метана, превышая который мощности дугового разряда будет недостаточно для полного разложения  $\text{CH}_4$ . Результаты анализа газа, отбирившегося в колбы, подтверждают это. Например, при одинаковой мощности дуги ( $11,2$ – $11,7$  кВт) и расходе метана, равном  $262$  л/ч не подверглось разложению  $3,6\%$ , а при  $468$  л/ч —  $13,2\%$ .

Поскольку печь водой не охлаждалась, то калориметрирование потерь тепла не проводилось, и тепловой КПД печи не определялся.



В целях обеспечения безопасной эксплуатации электропечи, незадолго перед отключением дуги подачу  $\text{CH}_4$  прекращают, затем отключают дугу и продувают печь аргоном.

При проведении экспериментов измерялись: ток дуги, напряжение на дуге, расход  $\text{Ar}$ , расход  $\text{CH}_4$ , температура  $T_1$ ,  $^\circ\text{C}$  внешней стенки графитового реактора, температура  $T_2$ ,  $^\circ\text{C}$  газового потока перед входом в холодильник, определялся

Рис. 5. Изменение температуры реактора (1) и отходящего газа (2).

Таблица результатов экспериментов

№ эксп.	Ток дуги	Напря- жение	Мощ- ность	Расход CH <sub>4</sub>	Состав получаемого газа				Температура	
					G <sub>CH<sub>4</sub></sub> , л/ч	CH <sub>4</sub> , % об.	H <sub>2</sub> , % об.	Прочие углево- дороды, % об.	N <sub>2</sub> +Ar, % об.	T <sub>1</sub> , ° С
1	76	24	1,82	800	92,4	4	0,96	2,6	60	–
2	110	100	11	187,5	1	66,8	0,4	3,2	1170	–
3	94	120	11,2	262,5	3,6	65,6	0,6	2	1140	–
4	69	170	11,73	468	13,2	71,8	0,7	3	1080	510
5, а	100	130	13	468	2,8	79,2	0,96	4,4	1150	–
5, б	100	130	13	620	2,2	75,4	0,65	6,8	1200	720

состав отходящих газов. Пробы газа отбирались после второго холодильника 14 (см. рис. 1). Результаты экспериментов, в которых брались пробы газа, приведены в таблице. Состав газа представлен в объемных процентах, % об.

Анализ результатов показывает, что в первом эксперименте мощность дугового разряда недостаточна ни для прогрева реактора, ни для разложения 800 л/ч CH<sub>4</sub>. По-видимому, разложилась лишь небольшая часть CH<sub>4</sub>, непосредственно обдувавшая дугу.

Во втором эксперименте мощность дуги достаточна для прогрева реактора и почти полного разложения 187,5 л/ч CH<sub>4</sub>. Так как 1 % CH<sub>4</sub> не разложился, то действительное значение разложившегося метана составляет ≈ 185,6 л/ч. Для его разложения необходима мощность ≈ 0,445 кВт [1]. Вкладываемая в дугу мощность — 11 кВт. Следовательно, потери тепла через футеровку печи составляют ≈ 10,5 кВт. Поскольку температура реактора в последующих экспериментах держалась на уровне 1150–1200 °С, то и потери через муфель остались на уровне ≈ 10,5 кВт. Поэтому с увеличением расхода CH<sub>4</sub> и мощности дуги КПД печи растет. При мощности 13 кВт (эксп. 5, б) КПД печи составляет ≈ 19 %. При дальнейшем увеличении расхода метана и мощности дуги КПД будет увеличиваться.

В действительности тепловой КПД любой плазменной электропечи, используемой для разложения CH<sub>4</sub> на С и H<sub>2</sub>, будет зависеть от поставленной цели – заданного размера глобул углерода на выходе, т. е. от “качества” продукции, исчисляемого в микрометрах или нанометрах. Это связано с тем, что углерод в отходящем газе находится во взвешенном состоянии. При выходе газа из реактора он охлаждается, и углерод конденсируется в глобулы. Чем больше подается CH<sub>4</sub> в реактор, тем больше мощность дуги, выше КПД печи, но тем больше углерода в отходящем газе и тем выше вероятность его конденсации в более крупные глобулы (подобное явление происходит при образовании снега в атмосфере). Поэтому, чем меньше требуются по размеру глобулы углерода для производства конечного продукта, тем меньше КПД электропечи. В таких печах должна использоваться пористая футеровка с теплопроводностью в несколько раз меньше теплопроводности шамотного кирпича.

На рис. 6 представлена микрофотография полученной сажи. Здесь же представлен масштаб, позволяющий оценить размер глобул.

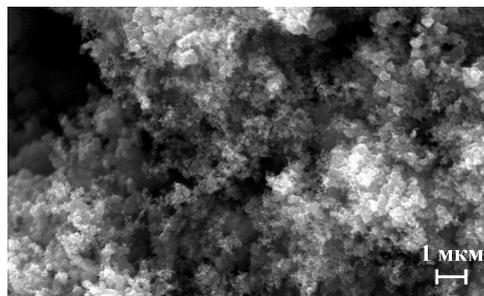


Рис. 6. Микрофотография сажи.

### ВЫВОДЫ

1. Экспериментально показано, что для практически полного разложения метана достаточно, чтобы температура стенки реактора составляла 1100–1200 °С.
2. Установлено, что в среде метана графитовые электроды при плотности тока  $\approx 32 \text{ А/см}^2$  имеют низкую удельную эрозию  $\approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ кг/Кл}$  и могут успешно использоваться в электропечах для разложения газообразных углеводородов на С и Н<sub>2</sub>.
3. Полученные результаты модельных исследований могут быть положены в основу разработки полупромышленного плазменного реактора для переработки попутного нефтяного газа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сурис А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов: Справочник. — М.: Metallurgy, 1985. — 568 с.
2. Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. Ч. 2. Дуговые печи: Учебное пособие для вузов. — М.: Энергия, 1970. — 264 с.
3. Фридлянд М.Г., Немчинский В.А. К теории катода, постоянно возобновляющегося из углеродсодержащей атмосферы дуги // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1987. — № 13, вып. 3. — С. 52–58.

*Статья поступила в редакцию 4 апреля 2007 г.*