

УДК 544.556

DOI: 10.15372/ChUR2020230

## Особенности процесса удаления сероводорода из метана в различных условиях в барьерном разряде

А. Н. ОЧЕРЕДЬКО, А. Ю. РЯБОВ, С. В. КУДРЯШОВ

*Институт химии нефти СО РАН,  
Томск (Россия)**E-mail: andrew@ipc.tsc.ru*

### Аннотация

Исследован процесс удаления примеси сероводорода из метана в плазме барьерного разряда в присутствии паров октана. Использование паров октана в исходной смеси с метаном и сероводородом позволяет избежать формирования депозита на электродах плазмохимического реактора и добиться высокой степени ингибирования реакций, ответственных за образование полимероподобных соединений. Степень удаления сероводорода достигает 98 %, конверсия метана не превышает 10 %. Энергозатраты на удаление сероводорода составляют 83 (кВт · ч)/кг. Основные газообразные продукты обработки исходной смеси в барьерном разряде – водород (30 %) и этан (30 %). Среди серосодержащих продуктов обнаружены преимущественно моно- и диалкилсульфиды. Приведен возможный механизм, обоснованы способы управления плазмохимическим процессом.

**Ключевые слова:** метан, сероводород, барьерный разряд, удаление сероводорода, механизм процесса

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время устойчиво растет интерес исследователей к использованию низкотемпературной плазмы барьерного разряда (БР) для различных целей в области обработки материалов, плазменного катализа, плазменной медицины, очистки от органических загрязнителей [1]. Однако степень внедрения процессов с применением возможностей низкотемпературной плазмохимии остается слабой несмотря на их привлекательность, особенно в области нефтехимии, для очистки углеводородсодержащих газов от сероводорода ( $H_2S$ ). Отчасти это связано со сложностью протекающих в низкотемпературной плазме процессов и контроля составляющих их реакций. В основном это касается плазмохимических процессов с участием молекул углеводородов, часто сопровождающихся осмолением и глубокой деструкцией реагентов.

Использование плазмы БР в области нефтехимии в сфере удаления сероводорода из потока

углеводородных газов достигло значительных успехов [2–9], однако в литературных источниках до сих пор отсутствуют сообщения об их успешном внедрении. В связи с этим накопление знаний о процессах с участием молекул углеводородов в плазме БР остается актуальной задачей, решение которой важно для эффективного развития плазмохимических технологий обработки углеводородсодержащего сырья.

Ранее [10, 11] показана принципиальная возможность эффективного удаления примесей сероводорода из метана ( $CH_4$ ) с образованием полимероподобных сераорганических соединений под действием БР. Анализ возможного механизма процесса показал, что образование полисульфидных органических соединений происходит на поверхности электродов реактора, а газофазные реакции преимущественно завершаются на стадии образования алкилсульфидов и элементарной серы ( $S_2$ ). Ингибирование химических процессов на поверхности электродов реактора позволит управлять направлением реакций и получать нужный состав продуктов.

В последующих исследованиях совместных превращений газообразных и жидких углеводородов и сероводорода, проводимых в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (проект V.44.3.1), установлена принципиальная возможность управления плазмохимическим процессом и получения разнообразных сераорганических продуктов – от моно-, ди- и полисульфидных соединений до сульфонов.

В данной работе представлены результаты изучения процесса плазмохимического удаления сероводорода из метана в БР в присутствии паров октана ( $C_8H_{18}$ ), а также проведено критическое сравнение с результатами, полученными авторами ранее.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты по удалению примесей сероводорода из метана без добавок проводили в металлическом однобарьерном реакторе. Начальная концентрация  $H_2S$  составляла 0.5–3.8 %, активная мощность разряда достигала 15 Вт [10]. Эксперименты по конверсии смесей  $CH_4 - H_2S - CO_2/O_2$  (начальная концентрация сероводорода фиксирована и равна 3 %, добавок  $CO_2/O_2$  – до 41 %) [11] и  $CH_4 - H_2S - C_8H_{18}$  (диапазон начальных концентраций сероводорода 3–12 %) проводили в двухбарьерном стеклянном реакторе коаксиального типа. Активная мощность разряда при использовании двухбарьерного реактора составляла 5–9 Вт в зависимости от состава исходной газовой смеси [11] и составляла ~8 Вт в случае смеси  $CH_4 - H_2S - C_8H_{18}$  (начальная концентрация сероводорода 3 %).

Смена типа реактора обусловлена, во-первых, более низкой величиной активной мощности, что благоприятно с точки зрения энергозатрат, поскольку практически полное удаление сероводорода (95–98 %) из исходных газовых смесей достигается при меньшем энергокладе; во-вторых, использованием октана – жидкого углеводорода, так как однобарьерный реактор не предназначен для работы с жидкими средами. Величина разрядного промежутка в стеклянном реакторе равна 1 мм.

Все эксперименты проводились по одной схеме, подробно описанной в [10, 11]. Пары октана, получаемые из жидкого октана в испарителе, доставлялись в реактор с потоком газов. Концентрация паров октана в реакторе регули-

ровалась изменением скорости подачи жидкого октана в испаритель и составляла 0.4 мл/мин.

Во всех случаях БР возбуждался генератором высоковольтных импульсов напряжения микросекундной длительности. Время контакта исходной смеси с разрядной зоной реактора составляло 13.5 с, температура реактора – 20 °С, давление – атмосферное. Активная мощность выдерживалась постоянной.

Регистрация электрических параметров БР во всех случаях проводилась по одной и той же схеме (рис. 1).

Типичные осциллограммы высоковольтных импульсов напряжения и вольт-кулоновская характеристика (ВКХ) приведены на рис. 2.

На высоковольтный электрод реактора 2 (см. рис. 1) подаются формируемые генератором 1 высоковольтные импульсы напряжения переменной полярности (амплитуда до 10 кВ, частота следования до 2 кГц) в виде затухающих колебаний приблизительно синусоидальной формы (см. рис. 2, а). Декремент затухания колебаний главным образом определяется внутренними потерями энергии в электрической схеме генератора, выходной импеданс которого значительно превышает импеданс нагрузки (реактор). В промежутках между импульсами напряжения колебания практически полностью затухают, а основная энергия вводится в разряд на первом периоде колебаний напряжения. Напряжение на высоковольтном электроде регистрировалось через высоковольтный емкостный делитель напряжения 3 осциллографом через канал СН1, перенесенный между электродами заряд и ток разряда – через емкостный и токовый шунты 4 осциллографа через канал СН2.

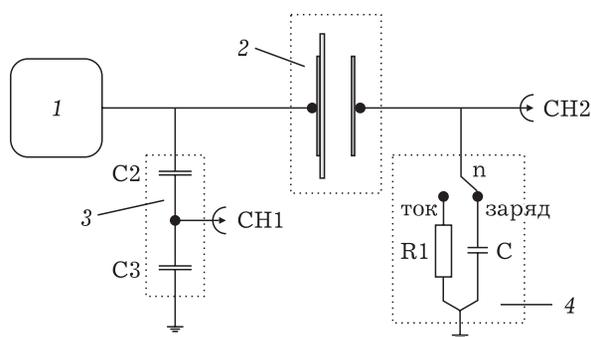


Рис. 1. Принципиальная схема регистрации электрических параметров БР: 1 – генератор импульсов высокого напряжения; 2 – реактор; 3 – делитель высоковольтного напряжения; 4 – токовый/емкостный шунт; СН1, СН2 – каналы осциллографа Tektronix; n – переключатель; R1 – сопротивление токового шунта (0.1 Ом); C – конденсатор емкостного шунта (309 нФ); C2, C3 – конденсаторы делителя высоковольтного напряжения (55 пФ, 110 нФ соответственно).

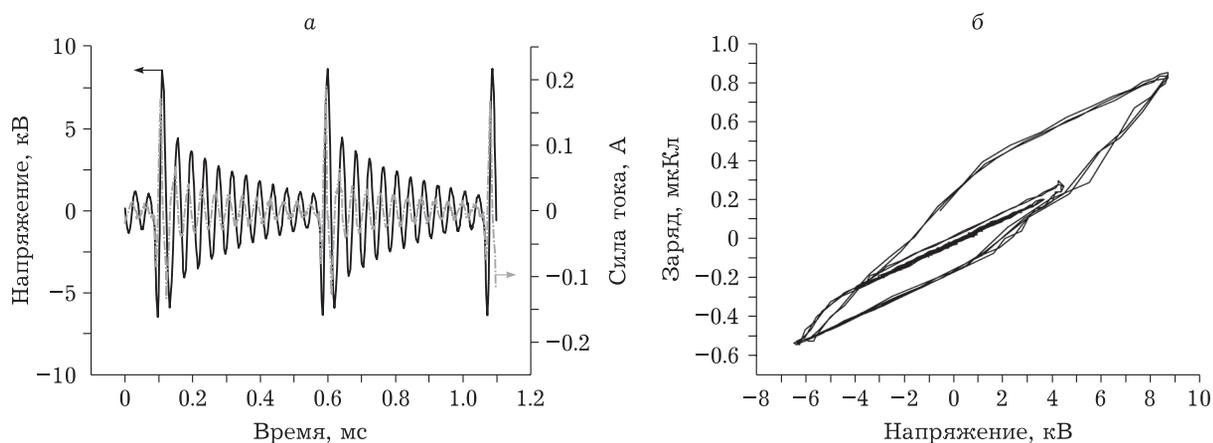


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульса напряжения и силы тока БР (а) и вольт-кулоновская характеристика БР (б).

Активную мощность разряда ( $W$ ) рассчитывали по формуле

$$W = fE \quad (1)$$

где  $f$  – частота повторения импульсов напряжения, Гц;  $E$  – энергия за один импульс напряжения, рассчитанная на основании ВКХ, Дж (см. рис. 2, б).

Анализ газообразных продуктов реакции выполнен с помощью газового хроматографа HP 6890 (Hewlett Packard, США), оборудованного детектором по теплопроводности с использованием набивной колонки (длина 3 м, диаметр 3 мм, сорбент – Порapak QS), в изотермическом режиме. Температура колонки 70 °С, газ-носитель – гелий. Водород определяли с помощью набивной колонки (длина 1 м, диаметр 3 мм, сорбент – молекулярное сито с диаметром пор 5 Å). Температура колонки – 40 °С, газ-носитель – аргон. Идентификация газообразных продуктов выполнена путем сравнения времен удерживания индивидуальных веществ. Состав газообразных продуктов в послереакционной газовой смеси рассчитан методом нормировки с учетом поправочных коэффициентов чувствительности детектора к компонентам анализируемой смеси.

Часть продуктов, содержащую углеводороды  $C_{5+}$ , определяли с использованием пламенно-ионизационного детектора и колонок HP-PoraPLOT Q (для газовой части) и HP-1 (для жидкой части). Смесь образующихся углеводородов  $C_{6+}$ , растворенных в воде, проанализировали с применением метода твердофазной микроэкстракции [12].

Идентификацию компонентов микроэкстракта выполняли методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) с применением хромато-

масс-спектрометра DFS (Thermo Fisher Scientific, США), оснащенного колонкой Trace TR-50MS.

Методики расчета конверсии метана, сероводорода, по величине которых оценивали общую эффективность процесса, и селективности образования продуктов обработки исходных смесей приведены в работе [10].

Депозит, образующийся на поверхности электродов реактора в экспериментах по обработке смесей  $CH_4 - H_2S$  и  $CH_4 - H_2S - CO_2/O_2$  анализировали методом ИК-спектроскопии с помощью спектрометра Nicolet 5700 FTIR (Thermo Electron, США), растворимые компоненты депозита анализировали также методом ГХ-МС на приборе DFS.

Анализ на элементную серу, образующуюся в ходе обработки исходных смесей метана, сероводорода и паров октана, проводили методом фотонной корреляционной спектроскопии с использованием прибора UNICOR-SP (Россия).

Расчеты параметров плазмы БР (потери энергии электронов на возбуждение молекул, средние энергии электронов) проводили с использованием программы Bolsig+ [13], сечения рассеяния электронов молекулами метана взяты из [14]. В литературных источниках отсутствуют данные по сечениям возбуждения колебательных и электронных состояний сероводорода и октана. Поэтому эти сечения были получены компиляцией литературных данных по полным сечениям рассеяния, упругим столкновениям и ионизации [15–19]:

$$\sigma_{эл}(\epsilon) = \sigma_{полн}(\epsilon) - \sigma_{упр}(\epsilon) - \sigma_{ион}(\epsilon) \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – энергия электронов;  $\sigma_{эл}(\epsilon)$ ,  $\sigma_{полн}(\epsilon)$ ,  $\sigma_{упр}(\epsilon)$ ,  $\sigma_{ион}(\epsilon)$  – сечения возбуждения электронных состояний, полного рассеяния электронов, упругих столкновений, ионизации соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены зависимость конверсии сероводорода в смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  от его начальной концентрации, а также аналогичные данные по конверсии сероводорода в смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$ , полученные авторами ранее [9]. Видно, что присутствие октана в исходной смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  приводит к росту конверсии сероводорода в сравнении с чистым метаном. Во всем диапазоне начальных концентраций сероводорода его конверсия превышала 92 % за проход исходной смеси через реактор. При удалении  $\text{H}_2\text{S}$  из смесей  $\text{CH}_4 - 3\% \text{H}_2\text{S} - \text{CO}_2/\text{O}_2$  конверсия сероводорода была не менее 91 % [11] (на рис. 3 не обозначена). Конверсия метана во всех случаях не превышала 10 % [10, 11].

Энергозатраты на удаление сероводорода из смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  составили 83 (кВт · ч)/кг, что несколько выше, чем для случая смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  (68 (кВт · ч)/кг), и намного ниже, чем для смесей  $\text{CH}_4 - 3\% \text{H}_2\text{S} - \text{CO}_2/\text{O}_2$  (114–127 (кВт · ч)/кг). Конверсия метана также не превышала 10 %, конверсия октана – 1.5 %.

Для исследованных смесей основными компонентами среди газообразных продуктов являются водород и этан (рис. 4). При обработке смесей  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  водорода образуется 60–70 %, этана – 20–30 %, а в случае смесей  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  водорода образуется всего 30–40 %, тогда как селективность образования этана остается прежней. В случае обработки смесей  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{CO}_2/\text{O}_2$  водорода образуется 50–55 %, а этана – 30–40 %. Зависимости селективности образования водо-

рода и этана от начальной концентрации  $\text{H}_2\text{S}$  в исходных смесях  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  в целом схожи: с ростом концентрации  $\text{H}_2\text{S}$  селективность образования водорода растет, а этана – снижается [11]. Этот факт является одним из аргументов в пользу общего механизма протекания реакций с участием молекул углеводородов и сероводорода в газовой фазе.

Сравнивая результаты ГХ-МС серосодержащих продуктов обработки смесей метана с сероводородом в различных условиях (обработка смеси без добавок, с добавками  $\text{CO}_2/\text{O}_2$ , в присутствии паров октана, рис. 5), можно увидеть, что в случае обработки смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  серосодержащие продукты представлены преимущественно органическими полисульфидами линейного строения с концевыми метильными группами (например, диметилтрисульфид ~34 мас. %), а

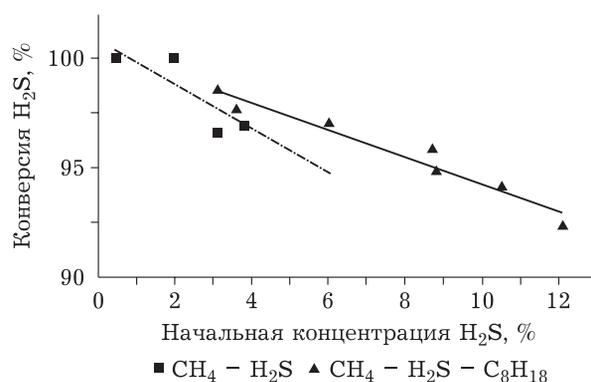


Рис. 3. Конверсия сероводорода в смесях  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  [10] и  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  в зависимости от его начальной концентрации.

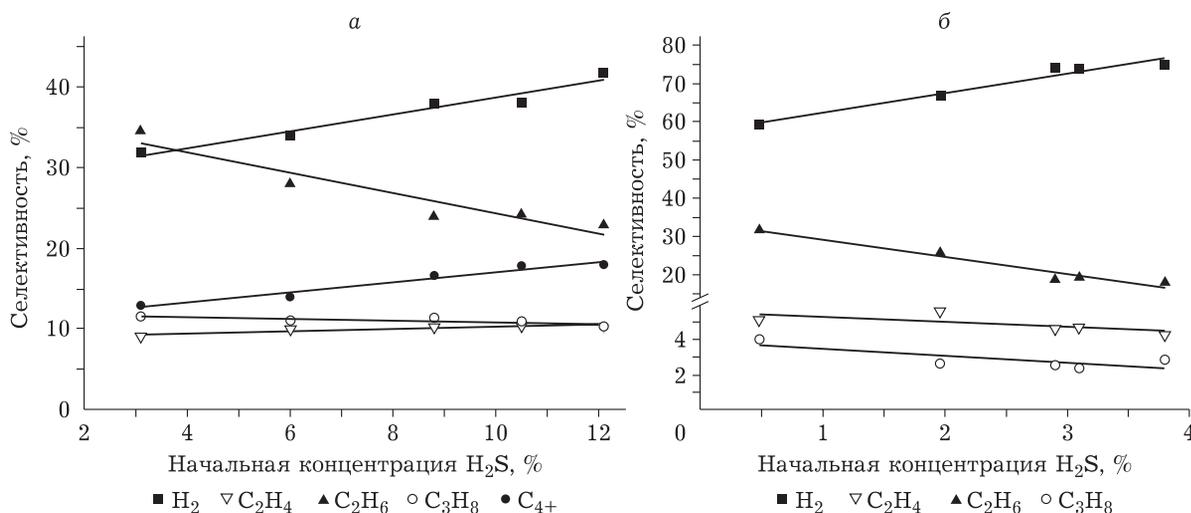


Рис. 4. Состав газообразных продуктов в зависимости от начальной концентрации сероводорода в смесях  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  (а) и  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  (б) [10].

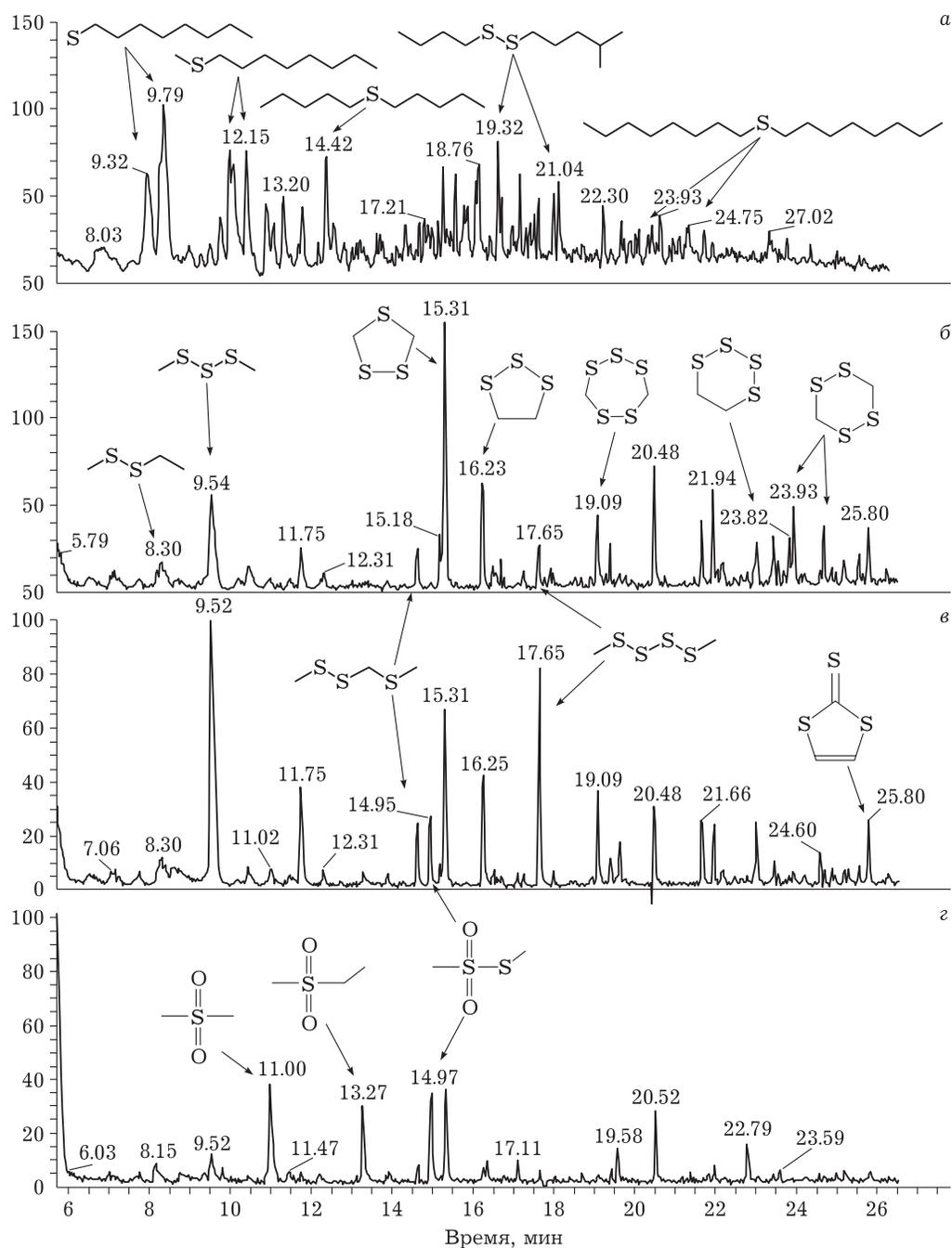


Рис. 5. Хромато-масс-спектрограммы соединений, полученных при воздействии плазмы БР на смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{C}_8\text{H}_{18}$  (а),  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  (б) [10],  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{CO}_2$  (в),  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S} - \text{O}_2$  (г) [11].

также соединениями циклического строения, среди которых преобладает гексатиопан (~18 мас. %) [10]. В случае добавки  $\text{O}_2$  к смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$  обнаружены сульфоны различного строения. При добавке  $\text{CO}_2$  в растворимых компонентах депозита наблюдается снижение содержания полисульфидных соединений циклического строения, а в случае добавки  $\text{O}_2$  – значительное уменьшение содержания всех полисульфидных соединений циклического и линейного строения [11].

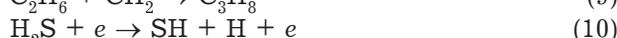
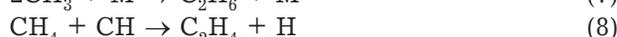
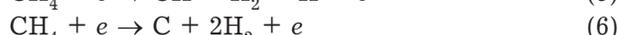
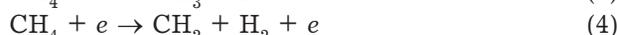
Использование паров октана в исходной смеси с метаном и сероводородом позволяет достигнуть высокой степени ингибирования реакций на поверхности электродов, ответственных за образование депозита, и добиться образования преимущественно моно- и диалкилсульфидов. Их содержание в продуктах составляет менее 1 % и во многом зависит от условий проведения эксперимента. С ростом концентрации  $\text{H}_2\text{S}$  в смеси доля дисульфидов практически не

изменяется и составляет ~16 % от суммы всех сульфидов. Среди идентифицированных алкилсульфидов наблюдается образование нескольких групп веществ с различными углеводородными заместителями. Одна группа соединений характеризуется наличием алкильных заместителей со структурой углеродного скелета исходной молекулы октана (октилмеркаптан  $C_8S$ , метилоктилсульфид  $C_9S$ , диоктилсульфид  $C_{16}S$ , диоктилдисульфид  $C_{16}S_2$ ). Другая – представлена содержащими атомы серы молекулами с участками углеродного скелета, составленными осколками исходной молекулы октана (дипропилсульфид  $C_6S$ , пропилбутилсульфид  $C_7S$ , дипентилсульфид  $C_{10}S$ ). Третья группа соединений – комбинированная. В структуре молекул последней группы встречаются участки углеродного скелета как исходной молекулы октана, так и ее осколки (например, пропилоктилсульфид  $C_{11}S$  или бутилоктилсульфид  $C_{12}S$ ).

Наличие разных алкильных заместителей в структуре обнаруженных молекул серосодержащих продуктов обработки исходных смесей сероводорода с углеводородами предполагает участие в плазмохимических процессах не только молекул метана как основного углеводородного компонента в составе исходных смесей, но и молекул октана, подвергающихся деструкции по связи C–C в результате электронно-молекулярного взаимодействия.

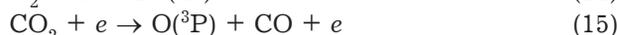
Действительно, анализируя распределение потерь энергии электронов БР на возбуждение различных состояний молекул исходных газовых смесей для оценки состава частиц, образовавшихся на стадии разрядного инициирования процесса, и дальнейшего направления их превращений (табл. 1, в табл. отсутствует инфор-

мация о смеси  $CH_4 - H_2S - C_8H_{18}$  из-за недостатка данных для расчетов), очевидно, что наибольшая доля энергии электронов БР тратится на активацию молекул метана и сероводорода, дальнейшие взаимодействия которых приводят к образованию конечных продуктов по реакциям [10, 11]



где  $e$  – электроны БР.

При этом наличие кислорода/углекислого газа в исходной смеси лишь незначительно изменяет характер распределения потерь энергии электронов БР и служит источником атомарного кислорода в системе в соответствии с реакциями диссоциации:



Это приводит к появлению дополнительных каналов превращения радикалов, полученных на стадии разрядного инициирования с образованием кислородсодержащих соединений (сульфоны, сульфоксиды) [11].

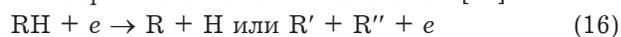
В случае обработки в БР смеси  $CH_4 - H_2S - C_8H_{18}$  параметры плазмы рассчитать не представляется возможным, поскольку в литературе отсутствуют значения сечений для электронно-молекулярных реакций с участием октана. Тем

ТАБЛИЦА 1

Потери энергии электронов БР в различных смесях (приведенная напряженность электрического поля  $(E/n) = 110$  Тд)

Канал потерь	Смесь		
	$CH_4$	$CH_4 - O_2$	$CH_4 - CO_2$
<b>Метан</b>			
Колебания	47.1	39.6	37.9
Возбуждение электронных состояний	20.5	17.4	18.1
Ионизация	0.3	0.2	0.2
<b>Сероводород</b>			
Колебания + возбуждение электронных состояний	31.4	29.6	28.1
Ионизация	0.1	0.1	0.1
Прилипание	0.04	0.04	0.04
Средняя энергия электронов, эВ	3.9	3.8	3.9

не менее грубые оценки показывают, что пары октана заметно не изменяют параметры плазмы в БР по сравнению с показателями для смеси  $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{S}$ , поэтому его возможным влиянием на распределение потерь энергии электронов и механизм процесса можно пренебречь. Однако постоянное присутствие на стенках реактора пленки жидкого октана в условиях эксперимента предотвращает дальнейшие превращения промежуточных соединений с атомом серы, в том числе ингибирует их локализацию на электродах реактора, приводит к образованию элементной серы в соответствии со схемой [11]



где R – алкильный радикал.

В результате протекания реакций (17) и (18) образуются алкилсульфиды и тиолы, реакции (19) – элементная сера. Образование элементной серы подтверждено эмиссионными спектрами, а размер частиц определен с использованием метода фотонной корреляционной спектроскопии – максимум массового распределения частиц составил ~10 нм [11].

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о возможности управления процессом образования отложений на электродах плазмохимического реактора в процессе очистки метана от  $\text{H}_2\text{S}$  в БР с сохранением высокой степени удаления  $\text{H}_2\text{S}$ . Изменяя условия проведения процесса (добавляя к исходной газовой смеси пары октана), можно добиться высокой степени ингибирования реакций, приводящих к образованию депозита, при этом параметры разряда остаются неизменными, а степень удаления  $\text{H}_2\text{S}$  в исследованном диапазоне концентраций сохраняется на уровне 92–98 %. Изменяя состав исходной газовой смеси добавками кислорода/углекислого газа, паров октана, можно управлять составом серосодержащих продуктов, получая различные соединения от циклических и линейных органических полисульфидов (без добавок), сульфонов, сульфоксидов (добавки  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ ) до алкилсульфидов и элементной серы (присутствие паров октана). Диапазон концентраций добавок варьируется в широких пределах, при этом основные стадии механизма процесса – взаимодействие электронов БР с молекулами метана и сероводорода с дальнейшими превращениями образующихся радикалов – остаются неизменными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан одностадийный способ очистки метана от сероводорода с использованием барьерного разряда. Способ не требует применения катализаторов и химических реагентов, процесс протекает при атмосферном давлении и комнатной температуре, перспективен для подготовки природного и попутного нефтяных газов для дальнейшей переработки и применения в альтернативной энергетике. Выявлены подходы к управлению химическим процессом с образованием ценных серосодержащих продуктов. Полученные сераорганические соединения перспективны для практического применения: добавки в серобетон и резину, к поверхностно-активным веществам, биологически активным веществам для сельского хозяйства, в качестве экстрагентов редких и благородных металлов, флотореагентов в металлургии.

Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (проект V.44.3.1 “Создание научных основ переработки каустобиолитов и регулирования физико-химических свойств углеводородсодержащих коллоидных систем в условиях экстремального воздействия физических факторов (низкотемпературная плазма, механохимия и акустические методы)” № ГР АААА-А17-117030310198-4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008.
- 2 Nozaki T., Hiroyuki T., Okazaki K. Hydrogen enrichment of low-calorific fuels using barrier discharge enhanced Ni/ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  bed reactor: Thermal and nonthermal effect of nonequilibrium plasma // Energy & Fuels. 2006. Vol. 20. P. 339–345.
- 3 Gutsol K., Robinson R., Rabinovich A., Gutsol A., Fridman A. High conversion of hydrogen sulfide in gliding arc plasma-tron // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. Vol. 45. P. 68–75.
- 4 Li K., Liu J.-L., Li X.-S., Zhu X., Zhu A.-M. Warm plasma catalytic reforming of biogas in a heatinsulated reactor: Dramatic energy efficiency and catalyst auto-reduction // Chem. Eng. J. 2016. Vol. 288. P. 671–679.
- 5 Liu J.-L., Park H.-W., Chung W.-J., Ahn W.-S., Park D.-W. Simulated biogas oxidative reforming in AC-pulsed gliding arc discharge // Chem. Eng. J. 2016. Vol. 285. P. 243–251.
- 6 Unsel M., Szepanski C., Lindermeier A., Maus-Friedrichs W., Dahle S. Desulfurization of biogas via dielectric barrier discharges // Chem. Eng. Technol. 2017. Vol. 40. P. 333–339.
- 7 Abatzoglou N., Boivin S. A review of biogas purification processes // Biofuels Bioprod. Biorefin. 2009. Vol. 3. P. 42–71.
- 8 Awe W. A., Zhao Y., Nzihou A., Minh D. P., Lyczko N. A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies // Waste Biomass Valoriz. 2017. Vol. 8. P. 267–283.
- 9 Plasma Catalysis: Fundamentals and Applications. Springer international publishing, 2019. 348 p.

- 10 Kudryashov S. V., Ryabov A. Yu., Ochered'ko A. N., Krivtsova K. B., Shchyogoleva G. S. Removal of hydrogen sulfide from methane in a barrier discharge // *Plasma Chem. Plasma Proc.* 2015. Vol. 35. P. 201–215.
- 11 Ochered'ko A. N., Kudryashov S. V., Ryabov A. Y. Plasma-chemical conversion of hydrogen sulfide in the atmosphere of methane with addition of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2018. Vol. 38. P. 135–146.
- 12 Рябов А. Ю., Кудряшов С. В., Очередыко А. Н., Великов А. А. Определение алканов и алкилбензолов в водных образцах методом твердофазной микроэкстракции и газожидкостной хроматографией // *Изв. Том. Политех. Ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2017. Т. 238, № 4. С. 38–45.
- 13 Hagelaar G. J. M., Pitchford L. C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. Vol. 14, No. 4. P. 722–733.
- 14 Cross-section Database [Electronic resource]. URL: [https://fr.lxcat.net/data/set\\_type.php](https://fr.lxcat.net/data/set_type.php) (дата обращения 01.12.2019).
- 15 Michelin S. E., Kroin T., Lee M.-T., Machado L. E. Electronic excitation cross sections of by electron impact // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 1997. Vol. 30, No. 8. P. 2001–2009.
- 16 Electron-impact ionization cross-sections [Electronic resource]. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/Ionization/table.pl?ionization=H2S> (дата обращения 01.12.2019).
- 17 Szmytkowski C., Mozejko P., Krzysztofowicz A. Measurements of absolute total cross sections for electron scattering from triatomic polar molecules: SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S // *Radiat. Phys. Chem.* 2003. Vol. 68, No. 1–2. P. 307–311.
- 18 Rawat P., Iga I., Lee M.-T., Brescansin L., Homem M., Machado L. Cross sections for elastic electron–hydrogen sulfide collisions in the low- and intermediate-energy range // *Phys. Rev. A: At. Mol. Opt. Phys.* 2003. Vol. 68, No. 5. P. 052711.
- 19 Rao M. V. V. S., Srivastava S. K. Electron impact ionization and attachment cross sections for H<sub>2</sub>S // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98, No. E7. P. 13137–13145.