

Образование высокодисперсной сажи при получении синтез-газа в условиях горения метана



Теория
образования
сажи при горении
еще далека от
завершения

ТЕКСТ: И.В. БИЛЕРА¹, А.А. БОРИСОВ², А.Б. БОРУНОВА²,
Ю.А. КОЛБАНОВСКИЙ¹, Ю.М. КОРОЛЕВ¹, И.В. РОССИХИН¹, К.Я. ТРОШИН²

Получение синтез-газа (СГ) при горении метана является промышленным процессом, начавшим свое развитие в конце минувшего века [1]. В качестве побочного и с точки зрения технологии весьма нежелательного продукта образуется новая твердая фаза, обычно называемая сажей, которая состоит в основном из углерода [1-4].

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния параметров процесса горения сверхбогатых смесей метана на выходы и свойства сажи. Рассматриваются также пути минимизации ее выхода.

Исследование сажеобразования при получении синтез-газа мы проводили в различных экспериментальных установках: перепускной установке статического типа (мы ее называли «бомба»), одноимпульсной свободнопоршневой установке адиабатического сжатия (УАС) и проточном химическом высокотемпературном реакторе на базе ракетных технологий (РХВ) [5-8].

Сверхбогатые смеси метана находятся вне пределов воспламенения, определяемых в стандартных условиях. Поэтому нами были исследованы приемы принудительного воспламенения таких смесей, а также их самовоспламенение при повышенных температурах и давлениях.

В «бомбе» горение было исследовано в режимах принудительного зажигания и самовоспламенения. Разборная конструкция «бомбы» позволяет количественно собирать сажу и достоверно определять ее выход путем взвешивания. В этом реакторе исследовали горение смесей метана с кислородом при коэффициентах избытка кислорода $\alpha = 0,25; 0,30$ и $0,35$, начальных давлениях 15-40 ата и начальных температурах 22-600°C [5]. Горение метано-воздушных смесей с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,35-0,45$ при начальных давлениях 15-70 ата и начальных температурах 22-350°C исследовали в цилиндрическом реакторе с объемом 0,8 л [6].

¹ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва

² Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва
E-mail: kolbanovsky@ips.ac.ru, troshin@chph.ras.ru

Конструкция РХВ обеспечивает горение в условиях повышенной теплонапряженности, что влияет на процессы тепло- и массопереноса внутри камеры сгорания, а следовательно, и на состав конечного продукта [8]. В РХВ исследовали горение смесей метана с кислородом, воздухом и воздухом, обогащенным кислородом, при коэффициентах избытка окислителя $\alpha = 0,35 \div 0,45$, давлениях в камере сгорания 5-10 ата и начальных температурах метана 20-120°C. Во всех указанных режимах работы из газовой фазы отбирали пробу продуктов сгорания для хроматографического анализа

В УАС процессы протекают в неизотермических, неизобарических и неизохорических условиях, аналогичных условиям в двигателях внутреннего сгорания [7]. В процессе сжатия давление и температура газовой смеси повышаются и в момент максимального сжатия достигают десятков атмосфер и более 1000 К. Воспламенение смеси дополнительно повышает эти значения. В УАС исследовали горение смесей метана с воздухом при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 0,35; 0,40$, при начальном давлении 1 ата и начальных температурах 25 и 100°C.

Конструкция РХВ обеспечивает горение в условиях повышенной теплонапряженности, что влияет на процессы тепло- и массопереноса внутри камеры сгорания, а следовательно, и на состав конечного продукта [8]. В РХВ исследовали горение смесей метана с кислородом, воздухом и воздухом, обогащенным кислородом, при коэффициентах избытка окислителя $\alpha = 0,35 \div 0,45$, давлениях в камере сгорания 5-10 ата и начальных температурах метана 20-120°C. Во всех указанных режимах работы из газовой фазы отбирали пробу продуктов сгорания для хроматографического анализа.

Для изучения фазового состава и структурных особенностей сажи был применен рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА), который проводили на компьютеризированном дифрактометре ДРОН-2 (CuK_α -излучение) с модифицированной коллимацией. Обработку дифракционных спектров и определение основных параметров отдельных компонентов проводили по методикам [9-11].

Фотографии образцов сажи были получены на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) FEI Теспаи G230ST с ускоряющим напряжением 300 кВ и разрешающей способностью 2,5 Å [12].

Горение метановых смесей. Во всех трех реакторах при горении сверхбогатых метановых смесей получены продукты, основными компонентами которых являются водород, оксид углерода, вода и азот (при использовании в качестве окислителя воздуха и воздуха, обогащенного кислородом). Минорными продуктами являются CO_2 , этилен, ацетилен. Состав газовых продуктов приведен ранее в [5, 6] для «бомбы» и УАС, а в [8] — для РХВ.

Было показано, что при получении синтез-газа методом парциального окисления в статическом реакторе при времени пребывания 0,1-1 с образование сажи происходит и в метановоздушных смесях с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,35-0,45$, и в метанокислородных смесях с $\alpha = 0,25-0,35$ (рис. 1, 2).

На рис. 1 приведены экспериментальные значения выхода сажи в статическом реакторе в зависимости от начальной температуры в условиях принудительного

зажигания ($20 < T_0 < 470^\circ\text{C}$) и самовоспламенения ($T_0 > 470^\circ\text{C}$) для двух составов смесей. Видно, что выход сажи для смеси состава $\text{CH}_4 + 0,7 \text{ O}_2$ ($\alpha = 0,35$) при принудительном воспламенении не превышает 2%, а при самовоспламенении он составляет не более 0,3%, т. е. более чем на порядок ниже, чем при $\alpha = 0,30$. В соответствии с термодинамическими расчетами для смеси с $\alpha = 0,35$ выход сажи уменьшается с ростом начальной температуры. Для смеси с $\alpha = 0,30$ зависимость выхода сажи от начальной температуры имеет максимум при 350-400°C. Возможно, что это объясняется неполным сгоранием смеси при начальных температурах ниже 350°C и более полным превращением при $T_0 > 350^\circ\text{C}$.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости выхода сажи от содержания кислорода в окислителе для смесей с тремя значениями α . Наибольший выход сажи наблюдается для метановоздушной смеси с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,35$. Увеличение доли кислорода в окислителе при неизменном α и увеличение α при постоянной доле кислорода в окислителе приводит к уменьшению выхода сажи. Для смесей с $\alpha = 0,35$ существенное снижение выхода сажи наблюдается при обогащении окислителя кислородом до 66% об.

В метановых смесях с $\alpha = 0,40$ подавление сажеобразования наблюдается при содержании кислорода в окислителе более 35%. Для смесей с $\alpha = 0,45$ сажеобразование незначительно: при обогащении окислителя кислородом до 27% выход сажи не превышает 1% масс. от начального содержания углерода в исходной смеси.

Из данных, представленных на рис. 1 и 2, следует, что выход сажи при горении сверхбо-

Рис. 1.

Зависимость выхода сажи (масс. % от начального содержания метана в смеси) от начальной температуры при горении смесей $\text{CH}_4 + 2\alpha\text{O}_2$ при вынужденном зажигании и самовоспламенении. Начальное давление смеси 15 ата.

Кружки – $\alpha = 0,30$, треугольники – $\alpha = 0,35$

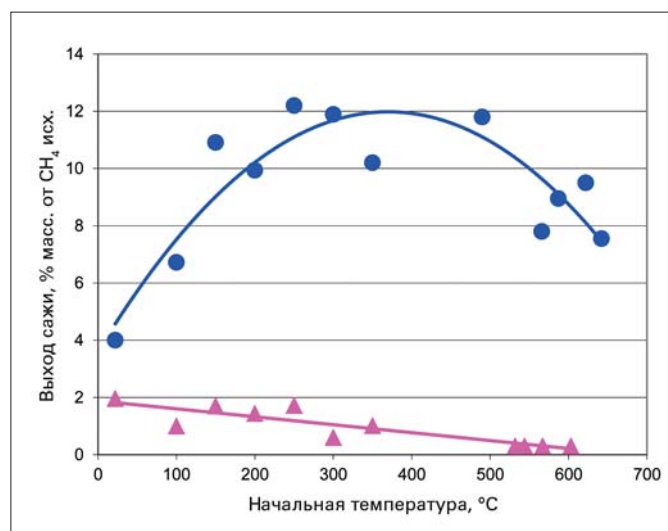
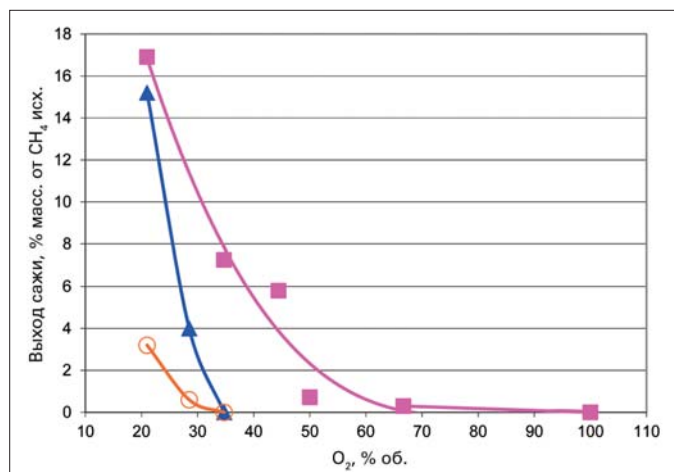


Рис. 2.

Зависимость выхода сажи (масс. % от начального содержания метана в смеси) от содержания кислорода в окислителе. Линии аппроксимируют экспериментальные точки.

Квадраты – $\alpha = 0,35$, треугольники – $\alpha = 0,40$, кружки – $\alpha = 0,45$. Начальные условия: $P_0 = 15$ ата, $T_0 = 300^\circ\text{C}$



гатых смесей метана весьма чувствителен к значению α . Следует отметить, что при этом выход сажи в ряде случаев на 4-6 порядков величины превышает равновесный. Наибольший выход сажи при горении богатых метановых смесей и, соответственно, отклонение от термодинамических расчетов, наблюдается в смесях с наименьшим содержанием кислорода в окислителе. Существенное отклонение термодинамических расчетов от экспериментальных данных связано со следующими обстоятельствами. Расчеты выполняются для максимальной температуры, достигаемой в опыте, и не учитывают постепенное охлаждение газовой смеси до температуры стенок «бомбы», во время которого образуется основное количество сажи [13].

В реакторе адиабатического сжатия характерные времена процесса на два порядка меньше, чем в «бомбе». Для метановоздушных смесей с $\alpha = 0,35$ при самовоспламенении от сжатия зафиксировано образование не более 0,5% сажи. Для метановоздушных смесей с $\alpha = 0,40$ сажеобразование не обнаружено. Разница в сажеобразовании в статическом реакторе и УАС объясняется малыми временами пребывания реагентов при высоких температурах и большими скоростями нагрева и охлаждения смеси.



В реакторе адиабатического сжатия

характерные времена процесса на два порядка меньше, чем в «бомбе». Для метановоздушных смесей с $\alpha = 0,35$ при самовоспламенении от сжатия зафиксировано образование не более 0,5% сажи. Для метановоздушных смесей с $\alpha = 0,40$ сажеобразование не обнаружено

Полученные экспериментальные данные вместе с термодинамическими расчетами показывают, какие методы и приемы могут быть использованы для снижения сажеобразования и, в идеале, для его полного подавления: выбор оптимального значения коэффициента избытка окислителя, увеличение начальных значений температуры и давления, увеличение концентрации кислорода в окислителе: замена воздуха на воздух, обогащенный кислородом или кислород. В этом плане интересно проследить, как влияет на сажеобразование добавление в зону реакции водяного пара [5].

В [14] указано, что при получении синтез-газа при гомогенном парциальном окислении всегда образуется некоторое количество сажи и что добавки водяного пара увеличивают ее выход. Наши исследования показывают, что в общем случае это утверждение неверно, т.к. при малых добавках пара выход сажи резко снижается [5, 8, 15]. Так, в статическом реакторе для метанокислородных смесей с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 0,35$ выход сажи снижается на два порядка и более при добавках пара 5-15% масс. по отношению к метану (табл. 1). При добавках 20% водяного пара выход сажи больше, чем при 15%, но все же меньше, чем без его добавок. Добавки водяного пара при горении смеси с $\alpha = 0,30$ незначительно влияют на выход сажи, который в отсутствие добавок достигает 12% масс. от начального содержания метана.

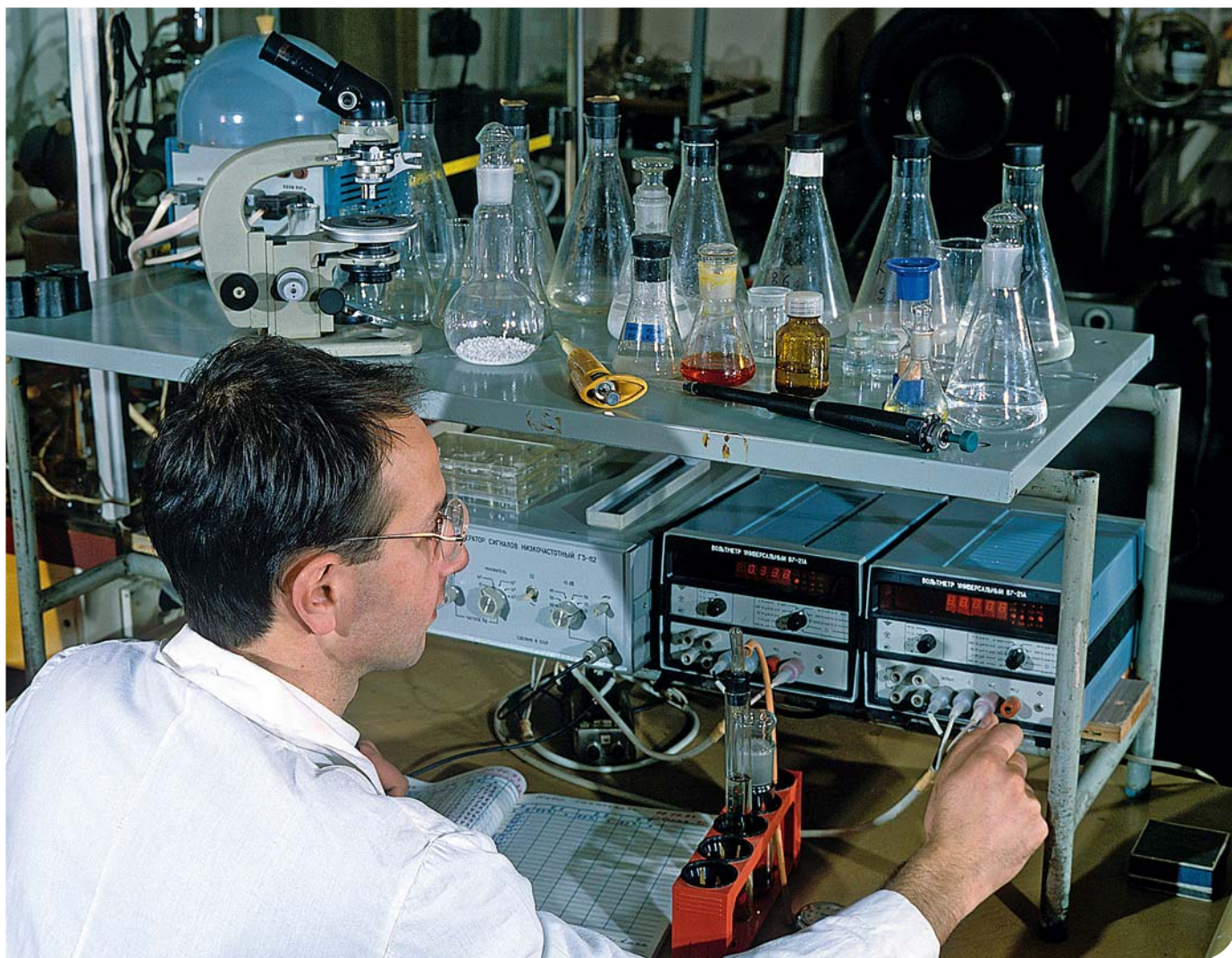
Сказываются на процессе сажеобразования и конструкции реакторов. Так, например, в РХВ при горении метанокислородных смесей с $\alpha = 0,38$ добавки водяного пара 5-10% масс. по отношению к метану обеспечивают практически бессажевый режим получения синтез-газа [8].

Табл. 1.

Влияние добавок водяного пара на выход сажи при горении сверхбогатых смесей метана с кислородом в статическом реакторе при начальных значениях давления 15 атм и температуры 300°C

Водяной пар*	Выход сажи*	
	$\alpha = 0,30$	$\alpha = 0,35$
0	12,3	0,8
5	10,3	0,003
10	10,3	0,006
15	7,37	Вне пределов измерения
20	8,2	0,008

* В % масс. от начального содержания метана.



Таким образом, экспериментально подтверждено, что для снижения образования сажи имеется оптимальная величина добавки водяного пара, которая при $\alpha = 0,35$ составляет около 15% масс. относительно метана. Для каждого состава исходной смеси и ее начальной температуры имеется оптимальная с точки зрения подавления сажеобразования добавка водяного пара.

Свойства сажи. По данным элементного анализа сажа, полученная при горении метанохлоридных смесей, на $(99,55 \pm 0,4\% \text{ масс.})$ состоит из углерода [5]. Этот результат согласуется с литературными данными для типичных образцов сажи, в которых содержание водорода не превышает 0,3–0,5% масс. [1, 16]. Таким образом, в этих образцах сажи на 1 атом водорода приходится от 17 до 28 атомов углерода.

Математическое моделирование образования сажи из углеводородных газов в процессах пиролиза и горения остается весьма сложной задачей. В настоящее время не существует единого подхода к разработке детального кинетического механизма возникновения зародышей сажи и их коагуляции. В последнее время достигнуты некоторые успехи в создании моделей сажеобразования (см.,

например, [17]). Но у всех современных моделей имеется общий недостаток: атомное отношение C/H в конечном продукте по расчету меньше экспериментального. Это обусловлено отсутствием в моделях эффективных реакций потери водорода в процессе сажеобразования.

Проведенная нами кинетическая оценка термического дегидрирования ароматических соединений (предшественники образования сажи) в условиях горения заранее перемешанных богатых смесей метана в постоянном объеме привела к заключению, что за время существования температур пламени, близких к максимальным, дегидрирование практически не успевает происходить. Таким образом, существующие в настоящее время концепции и кинетические модели сажеобразования не дают убедительного объяснения механизма потери водорода сажей, образующейся при горении.

Какие параметры процесса горения сказываются на выходе и свойствах сажи? Наши исследования показали, что на выход сажи и ее элементный состав при прочих равных условиях влияет время пребывания реагентов в зоне реакции. Неожиданно оказалось, что на удельной поверхности сажи и ее фазовом составе существенно сказывается и давление, при котором происходит горение. При этом повышение давления лишь незначительно сказывается на адиабатической температуре пламени и времени пребывания реагентов при этой температуре.

При давлении 40 атм образуется сажа с удельной поверхностью $700 \text{ м}^2/\text{г}$



Увеличение начального давления

при неполном сгорании метано-кислородных смесей приводит к увеличению и выхода и удельной поверхности сажи до 12% масс. и 1100 м²/г соответственно

начального давления смеси (рис. 3) при фиксированной начальной температуре. Вместе с тем, изменение начальной температуры от комнатной до 350°C при фиксированном начальном давлении смеси 15 атм не влияет на величину удельной поверхности. Обращает на себя внимание, что при начальном давлении 40 атм образуется сажа с удельной поверхностью 700 м²/г, а в отдельных опытах даже 1100 м²/г. Известно, что удельная поверхность сажи, образующейся в горелке при диффузионном ламинарном горении метана, обычно не превышает 200 м²/г [1, стр. 32].

В недавно опубликованной работе [3] отмечается, что на промышленных установках при диффузионном горении природного газа выход высокодисперсного технического углерода (удельная поверхность ≥ 110 м²/г) не превышает 4% масс. и повысить его в этой технологии невозможно, т.к. с увеличением выхода удельная поверхность снижается.

Из наших данных следует, что увеличение начального давления при неполном сгорании метано-кислородных смесей приводит к увеличению и выхода и удельной поверхности сажи до 12% масс. и 1100 м²/г соответственно.

При изучении фазового состава и структурных особенностей саж было установлено, что все исследованные образцы состоят в основном из двух фаз — графитоподобной и аморфной, возможно, содержащей углеводороды. Результаты РКФА и основные параметры графитоподобной фазы приведены в табл. 3. Толщина отдельных кристаллитов составляет 30–35 Å, а их линейный размер 60–80 Å.

Табл. 2 иллюстрирует зависимость времени процесса горения от начального давления ($\tau_{1/2}$). Это время определяли по осциллограмме давления как время, за которое максимальное давление снижалось в два раза.

Как видно из этих данных, при повышении давления в 2,7 раза удельная поверхность меняется более чем на порядок, тогда как $\tau_{1/2}$ увеличивается примерно в полтора раза.

Была обнаружена S-образная зависимость величины удельной поверхности сажи от

Рис. 3.

Влияние начального давления смеси на величину удельной поверхности сажи, полученной при горении метано-кислородной смеси с $\alpha = 0.30$. Начальная температура смеси 300°C

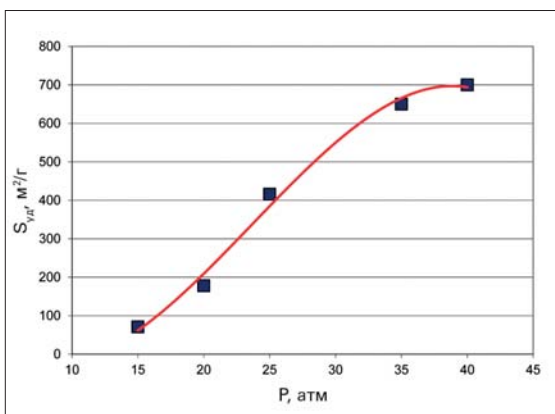


Табл. 2.

Зависимость $\tau_{1/2}$, $S_{уд}$ и $T_{макс}$ от начального давления

P_0 , атм	$S_{уд}$, м ² /г	$\tau_{1/2}$, с $\times 10^3$	$T_{макс}$, К
15	71	24	1742
20	178	28	1754
25	416	28	1766
35	650	32	1788
40	700	33	1798

Табл. 3.

Результаты рентгенографического исследования различных образцов сажи

Давление, атм	Удельная поверхность, м ² /г	Относительная концентрация, %		Параметры графитоподобной фазы (ГФ)			
		Γ_{ϕ}	A_{ϕ}	d_{002} , Å	L_{c^*} , Å	L_{a^*} , Å	C_r
15	76	68	32	3,64	30	60	0,95
40	700	83	17	3,56	30	75	1,4
~45	1100	90	10	3,46	35	80	2,4
—	800*	100	—	3,61	22	75	0,85

Примечание: Γ_{ϕ} — углеродная фаза с графитовой структурой (графитоподобная), A_{ϕ} — аморфная фаза, d_{002} — основной рефлекс для графитоподобных фаз, равный для графита 3,35 Å, L_{c^*} и L_{a^*} — размеры областей когерентного рассеяния (кристаллитов), соответственно по осям «с» и «а», C_r — уровень графитизации.

* Образец коммерческой сажи ЕС 300J (Япония).

Из данных табл. 3 следует, что с ростом температуры и давления относительная концентрация аморфной фазы снижается при соответствующем увеличении относительной концентрации графитоподобной фазы. У последней наблюдается рост областей когерентного рассеяния, в большей мере по оси «а». Важным показателем является рост уровня графитизации C_r , по которому можно судить, насколько графитоподобная фаза в данном образце близка к кристаллическому графиту. Уровень графитизации рассчитывали согласно [10] по формуле:

$$C_r = \frac{L_c \cdot 10^{-2}}{d_{002} - 3.35}$$

Значения $C_r = 0,95$ и $1,4$ характерны для обычных каменных углей, а значение $C_r = 2,4$, полученное для образца сажи с удельной поверхностью $1100 \text{ м}^2/\text{г}$, — для антрацитов. Отметим, что удельные поверхности всех исследованных нами образцов сажи (так же как и образец коммерческой сажи ЕС 300J) до измерений неопределенное время контактировали с воздухом при комнатной температуре. Поэтому у нас нет оснований судить о возможной роли этого контакта.

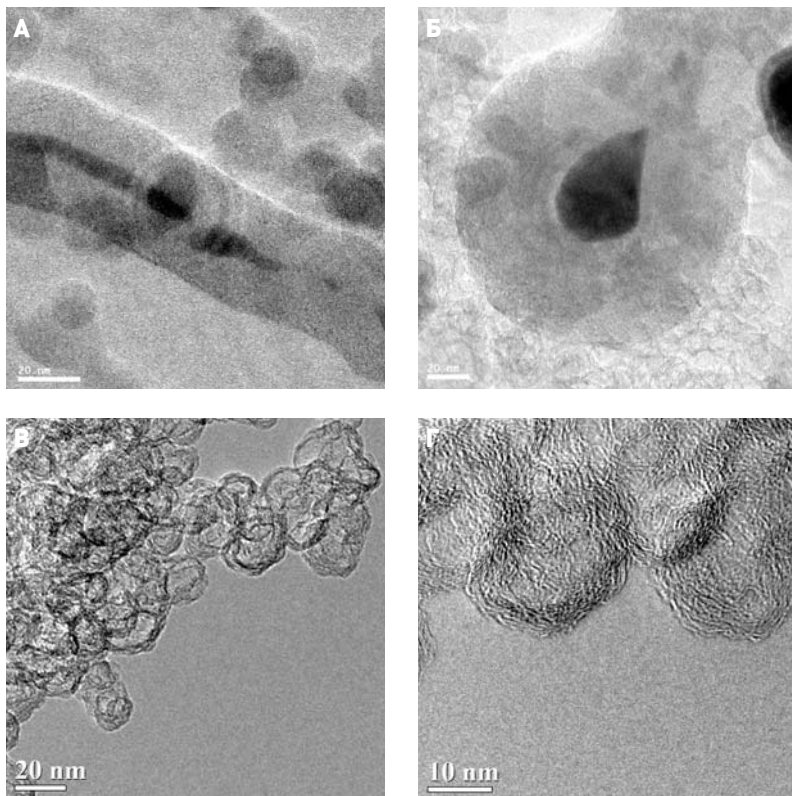
На основании результатов рентгенографических исследований можно предложить следующее объяснение обнаруженной нами зависимости удельной поверхности сажи от начального давления. Хотя с ростом начального давления адиабатическая температура горения и время пребывания реагентов при этой температуре растут незначительно, успевают произойти потеря части аморфных компонентов, экранирующих графитоподобные агрегаты. Это приводит к увеличению удельной поверхности сажи.

Исследование образца сажи с удельной поверхностью $1100 \text{ м}^2/\text{г}$ на просвечивающем электронном микроскопе показало, что в

Рис. 4.

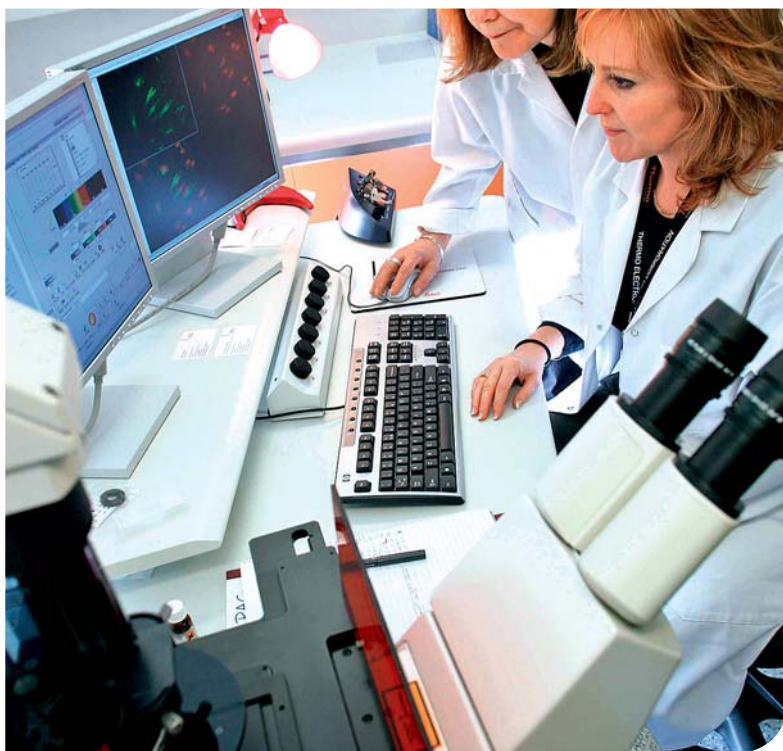
Электронные микрофотографии фрагментов твердого углерода, полученного при горении метанокислородной смеси с $\alpha = 0.30$:

а — центральная часть трубки, **б** — головная часть трубки, **в** и **г** — сферические полости



образце присутствует большое количество наночастиц различной формы, образующих конгломераты размерами 30-120 нм [12]. Среди всего разнообразия полученных нами сажевых частиц были найдены нити, нанотрубки и наносферические полости (рис. 4). Согласно данным энергодисперсионного анализа фрагмента сажи, темные участки на этом рисунке — капельки





До последнего времени

не был изучен вопрос об элементном составе сажи различного генезиса, о существовании в саже структур, построенных только из углерода, и об их роли в потребительских свойствах сажи, имеющих практическое значение

рода. В работе [18] обращено внимание на реакции ацетилена с интермедиатами процесса горения богатых смесей метана, приводящими к образованию молекулярного углерода C_2 . По своей химической природе молекулярный углерод является дикарбеном, и в [18] отмечалось его возможная роль в формировании углеродсодержащих продуктов, свободных от водорода.

Во всяком случае, факты появления в продуктах горения богатых смесей метана нанотрубок, наносфер и высокодисперсной сажи с большим содержанием графитоподобной фазы является свидетельством того, что современная теория сажеобразования при горении еще далека от завершения.

Имеется много способов получения сажи из различных видов сырья, в т. ч. из природного газа. Однако до последнего времени не был изучен вопрос об элементном составе сажи различного генезиса, о существовании в саже структур, построенных только из углерода, и об их роли в потребительских свойствах сажи, имеющих практическое значение.

Мы надеемся, что наша статья привлечет внимание специалистов к этим вопросам. **PK**

меди (воспламенение смеси производили пережиганием медной проволоочки). На рисунке видно, что частицы меди могут оказаться как в конце нанотрубки, так и в ее середине. Наряду с нанотрубками в саже с высокой удельной поверхностью обнаружены искаженные углеродные сферы размером 15–20 нм.

Обнаружение в саже, образующейся при горении, нанотрубок и наносферических образований поднимает вопрос о механизме образования в этих условиях соединений, построенных только из атомов угле-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Теснер, П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы [Текст] / П.А. Теснер. — М.: Химия, 1972. — 136 с.
- Зуев, В.П. Производство сажи [Текст] / В.П. Зуев, В.В. Михайлов. — М.: Химия, 1965. — 328 с.
- Шурупов, С.В. Закономерности образования дисперсного углерода при изотермическом пиролизе углеводородного сырья [Текст] / С.В. Шурупов // Газохимия. — 2009. — № 5 (9). — С. 64–72.
- Махлин, В.А. Сажеобразование и сажеочистка – проблемы технологии парциального окисления углеводородов [Текст] / В.А. Махлин // Химическая промышленность сегодня. — 2006. — № 8. — С. 13–19.
- Систер, В.Г. Парциальное окисление метана в режимах горения и самовоспламенения [Текст] / В.Г. Систер, А.А. Борисов, К.Я. Трошин, И.В. Билера, В.А. Богданов, Г.Г. Политенкова, Ю.А. Колбановский // Химическая физика. — 2006. — Т. 25. — № 1. — С. 61–68.
- Borisov A.A., Karpov V.P., Politenkova G.G., Troshin K.Ya., Bilera I.V., Kolbanovskii Yu.A. Ignition and combustion of superrich methane mixtures with air and oxygen. Synthesis of syn-gas. In: Combustion and pollution: environmental impact. Edited by Roy G.D., Frolov S.M., Starik A.M. Moscow: Torus Press Ltd. — 2005. — P. 87–104.
- Колбановский, Ю.А. Импульсное сжатие газов в химии и технологии [Текст] / Ю.А. Колбановский, В.С. Щипачев, Н.Я. Черняк, А.С. Чернышева, А.С. Григорьев. М.: Наука, 1982. — 240 с.
- Пат. 2320531 Российская Федерация. Способ получения синтез-газа и устройство для его осуществления [Текст] / Билера И.В., Колбановский Ю.А., Петров С.К., Платэ Н.А., Россихин И.В. — Приоритет 04.05.2006.
- Королев, Ю.М. Рентгенографические исследования аморфных углеродистых систем [Текст] / Ю.М. Королев // Химия твердого топлива. — 1995. — №5. — С. 99–111.
- Луковников, А.Ф. Рентгенографическое исследование каменных углей Кузнецкого бассейна [Текст] / А.Ф. Луковников, Ю.М. Королев, Г.С. Головин, А.М. Гюльмалиев, С.Г. Гагарин, В.В. Родэ // Химия твердого топлива. — 1996. — № 5. — С. 3–13.
- Головин, Г.С., Рентгенографическое исследование структуры гумосовых углей [Текст] / Г.С. Головин, Ю.М. Королев, В.В. Лунин, В.В. Родэ // Химия твердого топлива. — 1999. — № 4. — С. 7–27.
- Борунова, А.Б. Получение углеводородных наночастиц при горении метана. Горение и взрыв. Вып. 1 [Текст] / А.Б. Борунова, Ю.В. Григорьев, К.Я. Трошин. М.: Торус Пресс, 2008. — С. 10–13.
- Borisov A.A., Politenkova G.G., Troshin K.Ya., Shamshin I.O., Bilera I.V., Kolbanovskii Yu.A. Partial oxidation of biogas in noncatalytic combustion regimes. In: Nonequilibrium phenomena. Plasma, Combustion, Atmosphere. Edited by Roy G.D., Frolov S.M., Starik A.M. Moscow: Torus Press Ltd. — 2009. — P. 226–232.
- Aasberg-Petersen K., Bak Hansen J.-H., Christensen T.S., Dybkjaer I., Seier Christensen P., Stub Nielsen C., Winter Madsen S.E.L., Rostrup-Nielsen J.R. Technologies for large-scale gas conversion // Applied Catalysis A. 2001. V. 221. P. 379.
- Борисов, А.А. [Текст] / Борисов А.А., Трошин К.Я., Колбановский Ю.А., Билера И.В., Россихин И.В., Богданов В.А. // Тез. докл. Межд. конф. по хим. техн. (100-летие со дня рождения академика Н.М. Жаворонкова). М., 2007. — Т.3. — С. 269.
- Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. 4th Ed. — N.Y. 1992. V.4. P.949–1117.
- Варнац, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнац, У. Маас, Р. Диббл. М.: Физматлит, 2003. — 352 с.
- Колбановский, Ю.А. Образование и превращение молекулярного углерода C_2 в условиях получения синтез-газа при горении метана [Текст] / Ю.А. Колбановский, Ю.А. Борисов // Доклады РАН. — 2010. — 433. — № 3. — С.1–3.