

**ГАЗИФИКАЦИЯ ДИСПЕРСНОГО УГЛЕРОДА
В ДИФфуЗИОННЫХ ПЛАМЕНАХ УГЛЕВОДОРОДОВ.
П. КОПТЯЩИЕ ПЛАМЕНА**

*А. М. Цыбулевский, П. А. Теснер
(Москва)*

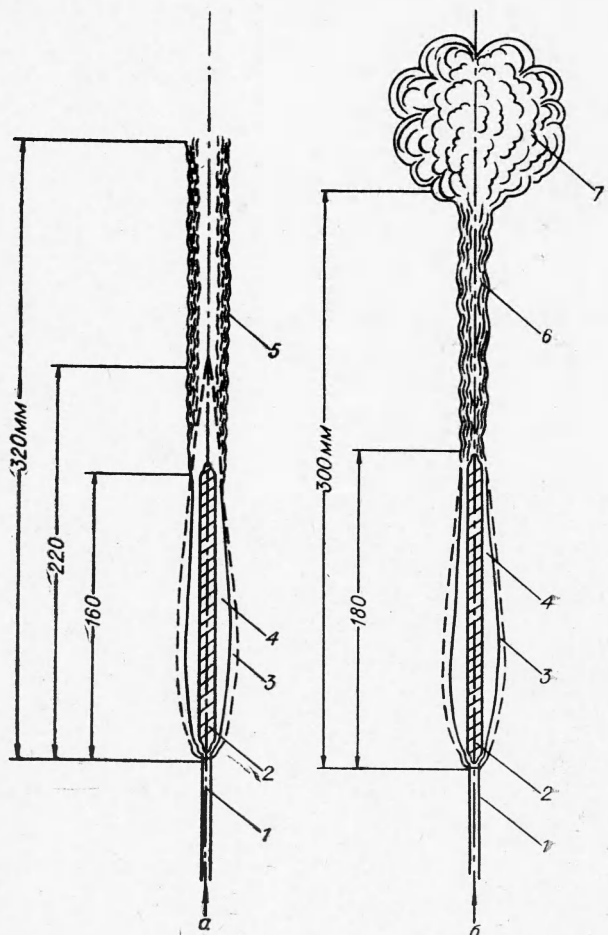
Предыдущее сообщение [1] было посвящено изучению газификации углерода в некоптящих пламенах ацетилен-азотных смесей.

Повышение концентрации ацетилена в его смесях с азотом приводит к образованию коптящих пламен, в которых образовавшаяся в нижней части сажа газифицируется не полностью в верхней конической части.

Можно различить два вида коптящих пламен (рис. 1). При относительно невысокой концентрации ацетилена образуется пламя, являющееся как бы промежуточным между коптящими и некоптящими пламенами. Впервые образование такого рода пламен наблюдали Паркер и Вольфгард [2] при горении ацетилена в кислороде при низком давлении. Это пламя характерно тем, что в его верхней части образуется сажевый хвост в виде полого геометрически правильного цилиндра (см. рис. 1, а).

Рис. 1. Схематическое изображение коптящих ацетилен-азотных пламен.

а — пламя К₁, б — пламя К₂.
1 — горелка; 2 — темная зона негоревшего топлива; 3 — голубая зона горящих газов; 4 — светящаяся зона; 5 — «сажевый цилиндр»; 6 — «сажевый хвост»; 7 — клубы дыма.



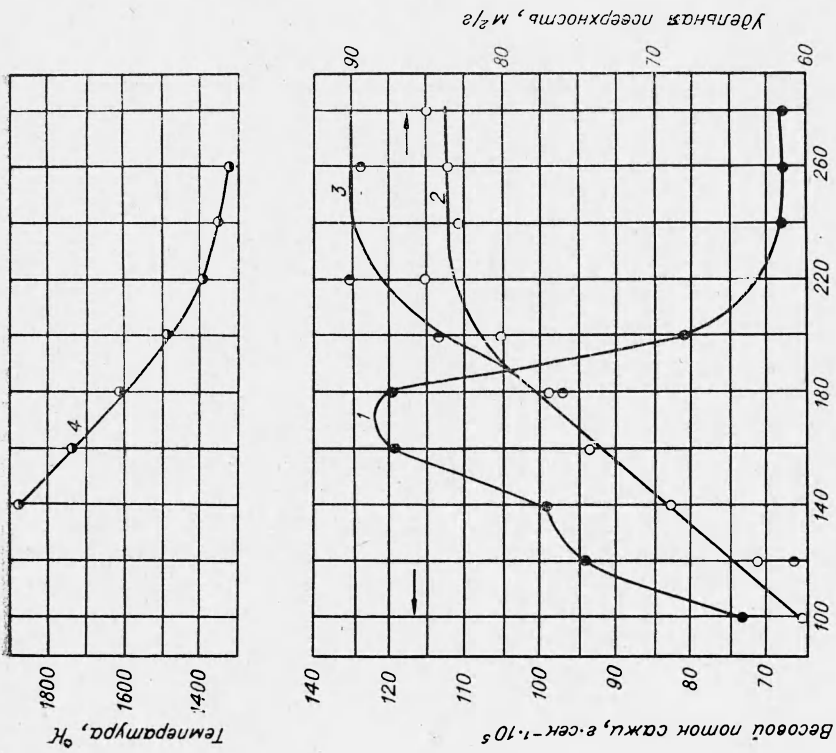


Рис. 3. Весовой поток, дисперсность сажи и температура пламени К₂. (Обозначения см. на рис. 2).

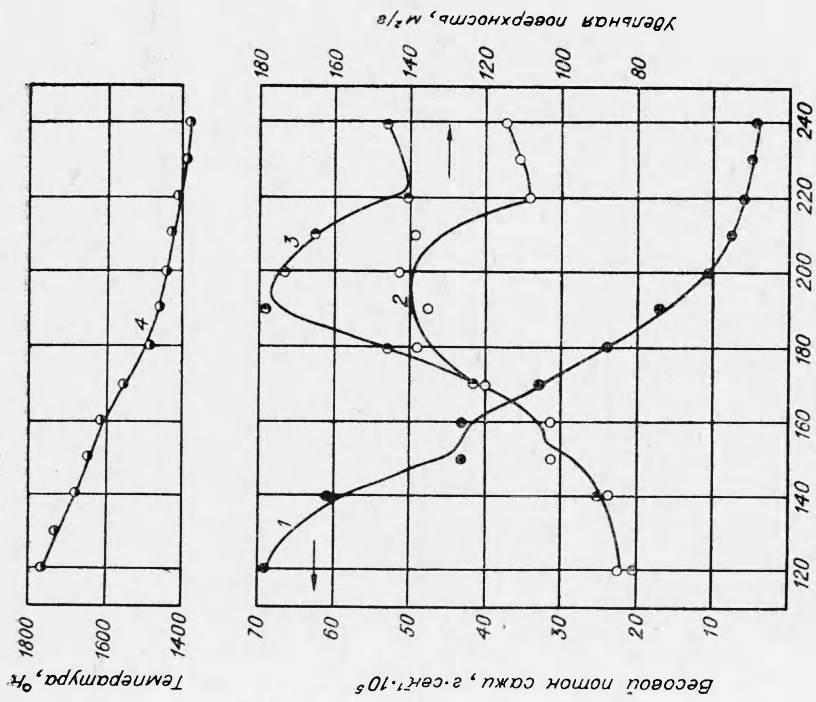


Рис. 2. Весовой поток, дисперсность сажи и температура пламени К₁.
1 — весовой поток; 2 — удельная поверхность по кинетическому методу; 3 — удельная поверхность по БЭГ; 4 — температура.

При более высоких концентрациях ацетилена коническая верхушка вытягивается, заполняя сажевый цилиндр, образуется колеблющийся хвост, выбрасывающий темные облака сажи (см. рис. 1, б).

Исследованы оба типа пламен:

1) пламя K_1 (C_2H_2 — 28%, N_2 — 72%), расход смеси — 27,8 см³/сек;

2) пламя K_2 (C_2H_2 — 30%, N_2 — 70%), расход смеси — 28,7 см³/сек.

Методика измерений по существу не отличалась от описанной ранее

[1]. Были измерены весовой поток, дисперсность сажи и температура (рис. 2, 3).

Максимальное содержание сажи в пламени K_1 в 2, а в пламени K_2 в 3 раза выше, чем в некоптящем пламени ацетилен-азотной смеси с исходной концентрацией ацетилена 20%. Высокое содержание дисперсной фазы приводит к большим потерям тепла на излучение и резкому падению температуры по высоте факела. В конической части пламени K_1 выгорание саже-газового потока происходит таким же образом, как и в некоптящих пламенах. Число частиц в процессе газификации остается неизменным — убыль в весе строго соответствует изменению поверхностного диаметра частиц (см. таблицу).

Расстояние от устья горелки, мм	Весовой поток сажи, г·сек ⁻¹ ·10 ³	Средний диаметр частиц, А	d_1/d_2	$(\frac{m_1}{m_2})^{1/3}$
120	69	378,0	1,05	1,05
140	59	360,5		

Концентрационные профили продуктов горения (рис. 4) показали, что содержание горючих компонентов у края светящейся зоны конической части пламени K_1 вполне достаточно для поддержания горения во фронте. Таким образом, на этом участке имеется фронт горения (кислород не проникает внутрь светящейся зоны), и сажа здесь выгорает в результате взаимодействия с продуктами полного сгорания: двуокисью углерода и водяным паром.

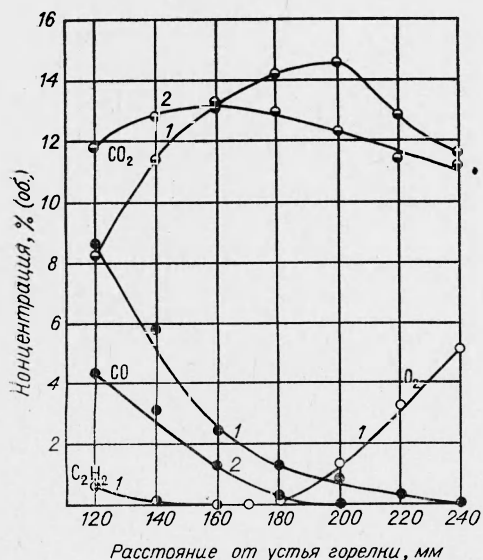


Рис. 4. Состав продуктов горения в верхней части пламени K_1 . 1 — по оси пламени; 2 — у края светящейся зоны.

жания окиси углерода во фронте так, что при появлении сажевого цилиндра концентрация окиси углерода на его поверхности становится минимальной (см. рис. 1, а, и 4), и кислород начинает проникать внутрь сажевого цилиндра.

Цилиндрическая часть пламени K_1 не имеет фронта горения и концентрация кислорода по ее сечению быстро выравнивается. Поскольку

Снижение температуры по высоте пламени вызывает уменьшение скорости газификации настолько, что на расстоянии 150—160 мм от устья горелки выгорание сажи практически не происходит. Начало нового падения весового потока сажи (и возрастания удельной поверхности) совпадает с визуально наблюдаемым появлением сажевого хвоста (см. рис. 1, а, и 2). Уменьшение скорости газификации приводит к замедлению пополнения содержания

горение в сажевом цилиндре происходит по всему сечению потока и двуокись углерода уже диффундирует только от центра к периферии, концентрация двуокиси углерода по оси больше, чем на внешней поверхности цилиндра. Последнее обстоятельство связано также с тем, что окись углерода быстро выгорает и ее концентрация выше вершины светящегося конуса становится равной нулю. Таким образом, сажевый хвост представляет собой процесс горения потока дисперсного углерода в кислороде воздуха. Здесь получено непосредственное подтверждение результата косвенных наблюдений Хинохара [3] сажевых хвостов различных жидких топлив и ацетилена.

На горение сажи основное влияние оказывает снижение температуры. Измерение дисперсности сажевых частиц двумя методами позволило проследить за протеканием реакции на поверхности и в порах частиц.

У основания цилиндра сажевые частицы обгорают только по внешней поверхности без развития пористости. Отсюда можно сделать вы-

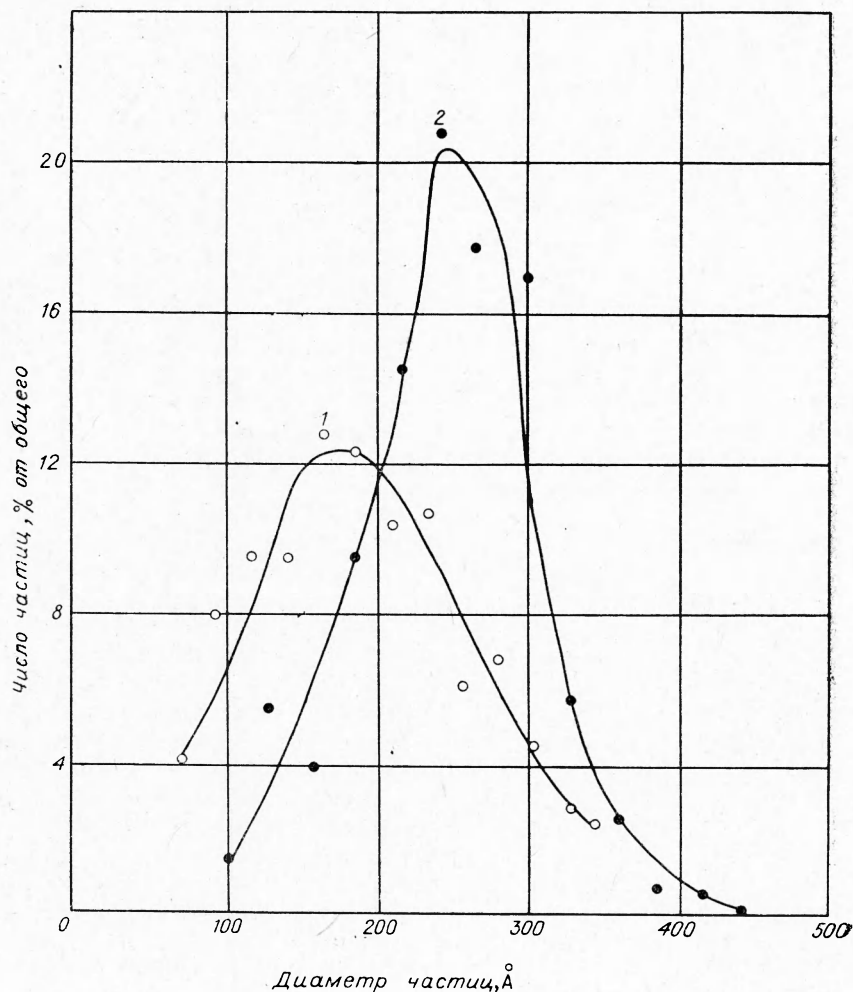


Рис. 5. Кривые распределения сажевых частиц по размерам в пламени К₁. Расстояние от устья горелки 200 мм (1) и 220 мм (2).

вод о том, что при соответствующих температурах (1600°K) возможность реакционного акта на любом месте углеродной поверхности становится равновероятной.

Падение температуры вдоль распространения пламени ниже 1500°K приводит к тому, что у частиц появляется пористость. Затем скорость горения снижается настолько, что реакция и вовсе происходит без изменения внешнего диаметра частиц. Здесь наблюдается обратное явление — взаимодействие уже становится возможным только на активных центрах, с одновременным развитием внутренней поверхности крупных частиц. Процесс внутрипорового реагирования, при низких температурах несопровождающийся изменением внешнего диаметра частиц, достаточно хорошо изучен (см., например, [4]).

Интересное явление наблюдается при дальнейшем удалении от устья горелки: удельная поверхность падает, в то время как уменьшение весового потока еще представляет значительную величину.

Наблюдаемому явлению может быть дано единственное объяснение: в результате внутрипорового реагирования в процессе выгорания сажи мелкие частицы разрушаются и исчезают, тогда как у крупных развивается пористость без существенного изменения внешнего диаметра. Это объяснение однозначно подтверждается кривыми распределения сажевых частиц по размерам, рассчитанным на основании электронно-микроскопических снимков образцов сажи, отобранных из пламени K_1 на расстояниях 200 и 220 мм от устья горелки (рис. 5).

Поскольку доля крупных частиц в общей массе растет, максимум кривой распределения (кривая 2) с удалением от устья горелки становится более резким и сдвигается в сторону частиц больших размеров. В связи с «избирательным» выгоранием мелких частиц сажа делается более однородной.

Появление и форма сажевого хвоста, по-видимому, могут быть объяснены структурой светящегося диффузионного пламени и распределением температур по его сечению. Известно, что образование дисперсного углерода в диффузионных пламенах происходит в нижней части по периферии пламени в зоне, непосредственно прилегающей к фронту горения [5]. Температура на этом участке резко падает от периферии к центру. Однако выше половины высоты пламени, там, где происходит газификация образовавшегося углерода, температурный профиль выравнивается [6, 7]. Поэтому в конических некоптящих пламенах вся сажа находится в области достаточно высоких температур и исчезает в результате газификации. Когда же содержание углерода увеличивается, светящаяся зона расширяется, участок, на котором образуется дисперсный углерод, становится длиннее половины высоты пламени так, что часть сажи оказывается в низкотемпературной зоне. Этот углерод и выделяется в виде тонкого полого цилиндра вследствие прямых линий тока.

В конической части пламени K_2 , если и происходит газификация углерода, то, во всяком случае, скорость сажеобразования здесь значи-

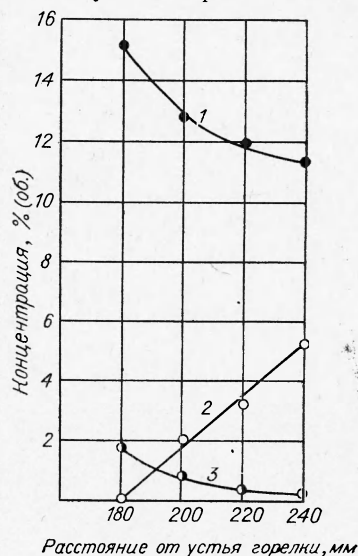


Рис. 6. Состав газов в хвосте пламени K_2 .

1 — двуокись углерода; 2 — кислород; 3 — окись углерода.

тельно выше скорости газификации. Выгорание сажи начинается только после перехода конической части в цилиндрическую (рис. 1, б, и 3).

Концентрация окиси углерода в «сажевом хвосте» пламени K_2 быстро уменьшается до нуля, а концентрация кислорода линейно растет в направлении распространения пламени (рис. 6). Так же, как и в сажевом цилиндре, в хвосте коптящего пламени имеет место лишь один процесс: горение потока дисперсного углерода в кислороде воздуха.

С падением температуры скорость горения уменьшается. Это видно по резкому уменьшению кривизны кривой изменения весового потока. Как и в пламени K_1 , снижение температуры ниже 1500°K приводит к появлению пористости сажевых частиц. Интересно, что лишенный фронта горючих газов поток дисперсного углерода быстро затухает. При температуре 1350°K скорость горения уменьшается настолько, что выгорание сажи практически прекращается. Красно-оранжевая окраска пламени здесь постепенно переходит в темную. Образуются клубы дыма.

*Поступила в редакцию
3/V 1966*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Цыбулевский, П. А. Теснер. ФГВ, 1966, 2, 61.
2. W. G. Parker, H. G. Wolfgard. J. Chem. Soc., 1950 (Aug.).
3. Т. Хинохара. Корё Караку Дзаси. 1964, 67, 3.
4. J.—В. Доннет, J. Bouland. Rev. gen. caoutch. plast., 1964, 41, 3.
5. А. Г. Гейдон, X. Г. Вольфгард. Пламя. Его структура, излучение и температура. М., Металлургиздат, 1959.
6. G. Varr. Combustion researches and reviews, L., Butterworths, 1955.
7. M. M. Ibricic, A. G. Gaydon. Combustion and Flame, 1964, 8, 1.