

и осредненной скорости распространения пламени. Дальнейший рост $\frac{dp}{dt} \left(\frac{dp}{dt} \gg 100 \text{ МПа/с} \right)$ может привести к ударному распространению пламени в канале.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

На процесс воспламенения поверхности топлива, размещенного в глухом канале, существенно влияние лучистого теплового потока, причем при высоких температурах газа следует учитывать перенос лучистой теплопередачи объемным высвечиванием по газу вдоль по каналу.

В процессе воспламенения поверхности топлива существенна роль расширения канала с течением времени и повышения со временем давления газа на открытой границе канала, причем при больших значениях $\frac{\partial F(x, t)}{\partial t}$ и $\frac{dp}{dt}$ возможно зажигание поверхности топлива, размещенного у глухой границы, газом, расположенным за фронтом отраженной от границы ударной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Н. И. ФГВ, 1985, 21, 5, 29.
2. Смирнов Н. Н., Дмитриенко И. Д. ФГВ, 1986, 22, 3, 59.
3. Гинзбург И. П. Прикладная гидрогазодинамика.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1958.
4. Седов Л. И. Механика сплошных сред.— М.: Наука, 1970.
5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена.— М.: Наука, 1970.
6. Аверсон А. Э., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. Докл. АН СССР, 1968, 178, 1, 131.
7. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент.— М.: Наука, 1982.
8. Липанов А. М., Алиев А. А. // Численное моделирование в аэрогидродинамике.— М.: Наука, 1986.
9. Шокин Ю. И. Метод дифференциального приближения.— Новосибирск: Наука, 1979.
10. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений.— М.: Наука, 1978.
11. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы.— М.: Наука, 1987.

г. Ижевск

Поступила в редакцию 20/II 1989,
после доработки — 26/VII 1989

УДК 662.61

С. В. Лукачев, С. Г. Матвеев

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ТУРБУЛЕНТНОМ ДИФфуЗИОННОМ ФАКЕЛЕ

Известно, что в процессе горения углеводородных топлив могут образовываться полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), значительная часть которых обладает канцерогенной и мутагенной активностью [1—3]. Наиболее сильным по воздействию и стойким канцерогенным ПАУ является бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$, который идентифицируется как индикатор присутствия группы канцерогенных углеводородов в загрязняющих веществах [3, 4]. С точки зрения химической кинетики вопросы синтеза ПАУ в процессе горения углеводородов пока не выяснены. И хотя отдельными авторами предложены гипотетические схемы образования бенз(а)пирена (БП) [2, 5, 6], они не позволяют производить расчеты из-за отсутствия констант включенных в них химических реакций. Дальнейшие теоретические разработки должны базироваться на результатах детального экспериментального исследования в модельных усло-

© 1990 Лукачев С. В., Матвеев С. Г.

3 Физика горения и взрыва № 3, 1990 г.

33

виях. Проведенные в этом направлении работы [1, 7, 8] охватывают в основном область ламинарных пламен и не содержат систематически изложенной информации, так как посвящены разработке перспективных средств измерения (например, с применением лазерного зондирования области горения) или получению отдельных фактических данных по большой группе ПАУ.

Цель данной работы — выяснение особенностей образования БП при турбулентном диффузионном горении газов. БП — характерный представитель группы 4—6 кольцевых ароматических углеводородов. Он обладает наиболее сильной канцерогенной активностью, поэтому исследование механизмов его образования и исчезновения представляет собой как самостоятельный интерес, так и имеет большое значение в понимании общей картины синтеза ПАУ в процессе горения углеводородных топлив.

Исследован диффузионный турбулентный факел пропана, образованный вытекающим вертикально вверх из сопла газом в затопленное пространство воздуха. Выбор данной модели горения обусловлен наличием апробированной теории численного расчета диффузионного факела, позволяющей получать его турбулентные характеристики и анализировать их влияние на процессы горения [9, 10].

Конструкция установки подробно описана в работе [11]. Исследовали два режима истечения газа: А (диаметр сопла $d_0 = 4$ мм, скорость истечения газа $u_0 = 11$ м/с, число Рейнольдса $Re = u_0 d_0 / \nu = 10^4$, число Фруда $Fr = u_0^2 / g d_0 = 3,1 \cdot 10^3$) и Б ($d_0 = 6$ мм, $u_0 = 9,7$ м/с, $Re = 1,3 \cdot 10^4$, $Fr = 1,6 \cdot 10^3$). Пламя стабилизировали на кромке сопла. Пробы для определения состава продуктов сгорания (в том числе и БП) отбирали охлаждаемыми водой пробоотборниками с внутренним диаметром 1,2 мм и наружным диаметром рубашки охлаждения 4 мм. Для измерения концентраций основных реагирующих веществ (CH_4 , C_2H_2 , $C_2H_4 + C_2H_6$, C_3H_8 , C_4H_{10} , H_2 , CO , CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O) пробы брались в пипетки Зегера с последующим анализом методами газовой хроматографии. На основе полученных данных рассчитывались средние значения местного коэффициента избытка воздуха $\langle \alpha \rangle$, восстановленная концентрация топлива $\langle z \rangle = 1 / (1 + L_0 \langle \alpha \rangle)$ и массовые концентрации веществ $\langle c_i \rangle$ (L_0 — стехиометрический коэффициент, скобки означают осреднение).

Для измерения концентрации БП ($C_{БП}$, г/м³) пробы отбирали через специальные фильтрующие элементы по методике [11]. Затем, под действием ультразвука в бензоле производилась экстракция БП из фильтров и с внутренней поверхности пробоотборника. Количественный анализ проводили спектрально-флуоресцентным методом на ДФС-24. Оценка точности определения $C_{БП}$ показала, что с достоверной вероятностью 0,95 погрешность измерения не превышает $\pm 15\%$.

Результаты измерения $C_{БП}$ вдоль оси факела (рис. 1) и по его радиусу (рис. 2) показывают, что уровень максимальных концентраций БП достигает $(9 \div 16) \cdot 10^{-3}$ г/м³ и может отличаться для различных режимов почти вдвое. Проанализируем полученные данные с учетом распределения концентраций основных реагирующих веществ и результатов расчета турбулентных характеристик факела, проведенного по модели [9].

Средняя концентрация какого-либо вещества при турбулентном диффузионном горении определяется двумя факторами: пульсацией концентрации и химической кинетикой. Авторами работы [10] показано, что влияние первого фактора зависит лишь от $\langle z \rangle_t = \langle z \rangle / \gamma$ (где γ — коэффициент перемежаемости, индекс t соответствует осреднению по турбулентной жидкости). Химическая кинетика описывается параметрами, характеризующими скорости отдельных реакций, и скалярной диссипацией ($N = D(\partial z / \partial x_k)^2$, D — коэффициент молекулярной диффузии, x_k — координата). Таким образом, для данных условий сжигания газообразного топлива можно выявить превалирующую роль диффузии или химической кинетики в тех или иных процессах горения. Для этого необходимо представить полученные экспериментальные данные в зависимости от

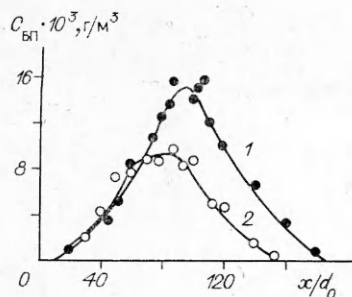


Рис. 1. Изменение концентрации бенз(а)пирена вдоль оси факела.
1 — режим А; 2 — режим Б.

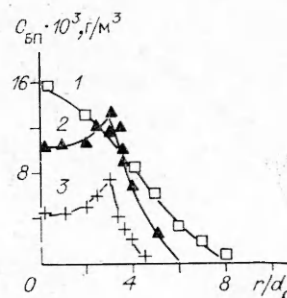


Рис. 2. Изменение концентрации бенз(а)пирена по радиусу факела (режим А) при $x/d_0 = 100$ (1), 75 (2) и 50 (3).

местного значения восстановленной концентрации топлива, осредненной по турбулентной жидкости $\langle z \rangle_t$, что позволяет исключить влияние пульсаций концентрации. Тогда, концентрация i -го вещества, измеренная в результате отбора пробы и также осредненная по турбулентной жидкости ($\langle C_i \rangle_t$), будет определяться скалярной диссипацией ($\langle N \rangle_t$) и скоростями химических реакций.

Для сравнения рассмотрим изменение концентраций углеводородных соединений в целом и БП — по объему факела. Сумму различных углеводородов выразим через эквивалентную концентрацию пропана

$$\langle C_F \rangle_t = \sum_i A_i \langle C_i \rangle / A_F \gamma,$$

где в суммирование по i входят только молекулы углеводородов, а A_i , A_F — доля углерода в i -й молекуле и в пропане. Представленные на рис. 3, а данные показывают, что все значения $\langle C_F \rangle_t$ обобщаются одной кривой. При этом среди приведенных результатов есть точки с близкими величинами $\langle z \rangle_t$ и различными $\langle N \rangle_t$ (они получены при измерении по радиусу факела в разных сечениях [10]), т. е. скалярная диссипация не влияет на $\langle C_F \rangle_t$, а окисление углеводородов лимитируется смешением. Аналогичные результаты ранее получены в работе [10].

Для БП подобного обобщения получить не удастся (рис. 3, б, где $\langle C_{БП} \rangle = C_{БП} / (C_t + C_v)$, C_t и C_v — восстановленные концентрации соответственно топлива и воздуха, г/м³). Это говорит о том, что образование БП определяется не только процессами смешения, но и кинетикой происходящих химических реакций. Характерные времена образования БП, по-видимому, имеют одинаковый порядок с временами диффузии. Поэтому подходы, основанные на рассмотрении равновесных составов при диффузионном горении, в данном случае неприемлемы и требуется учет кинетических особенностей синтеза этого ПАУ.

Для выявления областей интенсивного образования и исчезновения БП в турбулентном диффузионном факеле введем относительную концентрацию $\langle C_{БП} \rangle / \langle z \rangle$, на величину которой не влияет подмешивание воздуха по длине факела. Представленные на рис. 4 результаты показывают, что интенсивно БП образуется в области средних значений $\langle z \rangle_t = 0,1 \div 0,4$ ($\langle \alpha \rangle_t = 0,1 \div 0,6$). При $\langle z \rangle_t = 0,04 \div 0,1$ величина $\langle C_{БП} \rangle / \langle z \rangle$ стабилизируется, а концентрация БП (см. рис. 3, б) падает только за счет процессов смешения с окружающим воздухом. При $\langle z \rangle_t < 0,04$ происходит исчезновение БП. Отметим, что наиболее интенсивно синтез этого канцерогенного углеводорода наблюдается в области, соответствующей максимальной концентрации продуктов пиролиза исходного топлива $\langle C_{FP} \rangle_t$ ($\langle C_{FP} \rangle_t$ вычисляется аналогично $\langle C_F \rangle_t$, только в суммирование по i включены CH_4 , C_2H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$). Последний результат подчеркивает роль процессов пиролиза на первых этапах образования БП.

Таким образом, в результате проведенного исследования получены базовые данные о распределении концентрации БП в турбулентном диф-

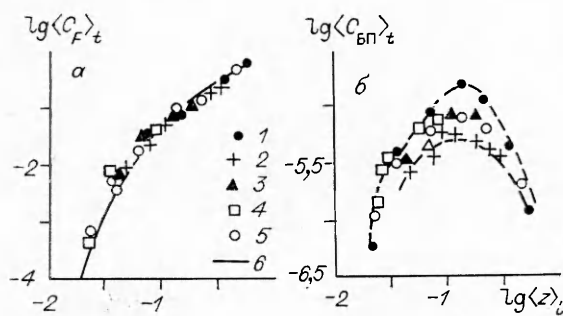


Рис. 3. Зависимость эквивалентной концентрации пропана (а) и бенз(а)пирена (б) от восстановленной концентрации топлива.

Режим А: 1 — ось факела, 2 — $x/d_0 = 50$, 3 — $x/d_0 = 75$, 4 — $x/d_0 = 100$; режим Б: 5 — ось факела; 6 — по данным [10].

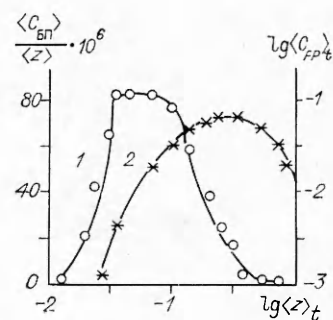


Рис. 4. Распределение величины $\langle C_{БП} \rangle / \langle z \rangle$ и концентрации продуктов пиролиза вдоль оси факела (режим Б).

1 — $\langle C_{БП} \rangle / \langle z \rangle$; 2 — $\langle C_{ФП} \rangle$.

фузионном факеле пропана, выявлены зоны его интенсивного образования и исчезновения, показано, что уровень концентрации этого ПАУ зависит как от местного состава топливно-воздушной смеси, так и от кинетики протекающих химических реакций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Longwell J. P. // 19th Symp. (Intern.) on Comb., 1982, 1339.
2. Ахмедов Р. Б., Цирульников Л. М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив.— Л.: Недра, 1984.
3. Канцерогенные вещества: Справочник. Материалы Междунар. агентства по изучению рака.— М.: Медицина, 1987.
4. Шабат Л. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде.— М.: Медицина, 1973.
5. Беджер Г. М. Химические основы канцерогенной активности.— М.: Медицина, 1966.
6. Лавров Н. В., Стасевич Н. Л., Комина Г. М. Докл. АН СССР, 1972, 206, 6, 1363.
7. Lorenzo A. Di., D'Alessio A., Cincotti V. et al. // 18th Symp. (Intern.) on Comb., 1981, 485.
8. Prado G., Garo A., Ko A., Sarofim A. // 20th Symp. on Comb., 1984, 989.
9. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение.— М.: Наука, 1986.
10. Бурико Ю. А., Кузнецов В. Р. ФГВ, 1986, 22, 4, 19.
11. Лукачев С. В., Матвеев С. Г., Анисимов М. Ю. Исследование особенностей образования бенз(а)пирена в турбулентном диффузионном факеле пропана.— Деп. в ВИНТИ 23.03.88, № 2214 — В88.

г. Куйбышев

Поступила в редакцию 16/II 1989

УДК 621.039.553 : 621.43.01.057

А. В. Бастеев, В. В. Соловей

РАДИАЦИОННАЯ АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПХА С ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Перхлорат аммония (ПХА) — один из основных компонентов, входящих в состав разнообразных конденсированных смесевых систем (КСС). Выполненный ряд измерений свойств ПХА, прошедшего радиационную обработку, позволяет ставить задачу о целенаправленном воздействии радиацией для улучшения его эксплуатационных характеристик как основного окислительного компонента, так и добавки-активатора [1, 2]. Исследование изменения свойств ПХА, подвергнувшегося активирующему воздействию (предварительной радиационной обработке), представляет