

25. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
26. В. Д. Гладун, Ю. В. Фролов, Л. Я. Кашпоров. Природа алгомерации металла при горении металлизированных конденсированных систем. Препринт ОИХФ АН СССР, Черноголовка, 1977.
27. В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко, К. П. Куценогий и др. Докл. АН СССР, 1981, 259, 4, 881.
28. В. А. Бабук, В. П. Белов, В. В. Ходосов, Г. Г. Шелухин. ФГВ, 1985, 21, 3, 20.
29. Н. С. Коэн. Аэрокосмическая техника, 1984, 2.
30. J. P. Renic, J. V. Osborn. AIAA Paper, 1979, 1131.
31. СВС. Библиографический указатель. Вып. 1 (Н. А. Белкина, В. М. Мартыненко, ред. В. В. Барзыкин). Черноголовка, 1982.
32. СВС. Библиографический указатель. Вып. 2. (Н. А. Белкина, В. М. Мартыненко, ред. В. В. Барзыкин). Черноголовка, 1984.
33. J. W. Taylor. Comb. Flame, 1962, 6, 2, 103.
34. Р. Циммер-Галлер. РТК, 1968, 6, 75.
35. М. К. Раздан, К. К. Куо. РТК, 1979, 11, 91.
36. М. К. King. AIAA Paper, 1978, 216.
37. Дж. П. Рени, Дж. Р. Осборн. Аэрокосмическая техника, 1984, 8.
38. А. А. Беляев, А. А. Зенин, В. В. Кулешов и др. Хим. физика, 1982, 1, 10, 1421.
39. В. Н. Брандидж, Л. Кавени. Аэрокосмическая техника, 1985, 1, 47.
40. М. Д. Фукс, А. Перетц, И. М. Тимнет. Аэрокосмическая техника, 1983, 1, 105.
41. М. К. Кинг. РТК, 1976, 1, 21.
42. Д. В. Блейф, В. Лейк. РТК, 1969, 9, 179.
43. А. А. Зенин, А. П. Глазкова, В. К. Боболев и др. Докл. АН СССР, 1968, 181, 3, 637.
44. А. Д. Марголин, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1966, 2, 2, 10.
45. А. И. Розловский. ФГВ, 1982, 18, 1, 8.
46. В. Б. Либрович, А. Л. Ярн. ФГВ, 1982, 18, 5, 58.
47. V. R. Pai Verneker, K. Kishore, G. Prasad. Propellants and Explosives, 1978, 3, 127.
48. Н. С. Коэн, Р. В. Флеминг, Р. Дерр. РТК, 1974, 2, 108.
49. Е. В. Прайс. Дж. К. Хендли, Р. Р. Паниам и др. РТК, 1981, 4, 112.
50. I. Aoki, N. Kubota. AIAA Paper, 1980, 1165; см. также ЭИ: Астронавтика и ракетодинамика, 1981, 38, реф. 123.
51. А. А. Зенин.— В кн.: Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980.
52. К. Гайрао, Ф. А. Вильямс. РТК, 1971, 7, 164.
53. M. S. Miller, T. P. Coffee. Comb. Flame, 1983, 50, 1, 75.
54. Л. Д. Стрэнд, Н. С. Коэн. РТК, 1982, 5.
55. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М.: Наука, 1969.
56. Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 63. 1978.
57. J. Gurland.— In: Planes Proc. (Ed. by F. Benesovsky). Vienna, 1962.
58. А. Н. Николенко, М. С. Ковальченко. Порошковая металлургия, 1986, 2, 22.
59. D. Seetharamacharyulu, V. P. Pai Verneker, K. M. Mallya e. a. Comb. Sci. Techn., 1981, 25, 147.
60. В. Е. Зарко, В. Н. Симоненко, К. П. Куценогий. ФГВ, 1975, 11, 4, 541.
61. N. S. Cohen, G. A. Lo. AIAA Paper, 1983, 1195.
62. Н. Е. Ермолин, О. П. Коробейничев, А. Г. Терещенко и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 46.
63. H. K. Narahari, N. S. Mukunda, V. K. Jain. 20-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, 1984.
64. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 26/V 1986

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ВОСПЛАМЕНЕНИЮ КАПЕЛЬ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

А. Я. Исаков, В. И. Деминов

(Владивосток)

Экспериментально установлено [1, 2], что капли водотопливной эмульсии при прочих равных условиях воспламеняются быстрее обычного безводного топлива. Основная причина этого эффекта — дополнительное дробление исходных капель эмульсии вследствие микровзрывов. Как показано в [3], для достаточно крупных капель с диаметром $d_k > 10^{-4}$ м механизм образования конкурентной фазы при перегреве носит гетерогенный характер, т. е. зародышами кипения являются парог-

зовые полости, имеющиеся в сферических включениях воды. Для реальных топочных процессов характерно присутствие в факеле капель различного размера. В этой связи представляет практический интерес анализ процесса нагрева и условий фазовых превращений воды в каплях эмульсии при $5 \cdot 10^{-6} \leq d_k \leq 1 \cdot 10^{-3}$ м.

В данной работе приведены результаты исследования процессов, протекающих в каплях водотопливной эмульсии от начала их нагрева до воспламенения. Нагревание эмульсии сопровождается взрывообразным вскипанием воды, причем конкурентная фаза может развиваться как по гетерогенной, так и по гомогенной схеме. При наличии гетерогенных зародышей кипения их радиус R изменяется в соответствии с уравнением [4]

$$R\dot{R} + 3/2\dot{R} = \rho^{-1}(p_n + p_r - p_0 - 2\sigma/R) = f(R), \quad (1)$$

где p_n , p_r , p_0 — соответственно давление паров, газа и внешнее; ρ — плотность воды; σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе воздух — вода. Парогазовая полость оказывается неустойчивой при условии $df(R)/dR \geq 0$. Анализ последнего неравенства совместно с (1) приводит к следующему уравнению относительно критического радиуса:

$$R_{кр}^3 \left\{ \frac{2\sigma(T_0)}{R_{кр}} - p_n(T_0) - p_0 \right\} = \frac{32}{27} \frac{\sigma^3(T)}{T [p_n(T) - p_0]} \quad (2)$$

(T_0 , T — начальное и текущее значения температуры). Для оценки количества воды, переходящей при данной температуре в парообразное состояние, необходимо знать функцию распределения зародышей кипения по размерам $N(R)$. Аналогично [3], принято

$$N(R) = \frac{\alpha}{1,33\pi(R_{max} - R_{min})R^3} = \frac{A}{R^3}. \quad (3)$$

Здесь α — объемное газосодержание воды; R_{max} , R_{min} — максимальный и минимальный радиусы зародыша. Значение размерной постоянной A определялось экспериментально термоакустическим методом.

В основу метода измерения концентрации и распределения по размерам зародышей кипения в водотопливных эмульсиях положен анализ импульсного акустического излучения, сопровождающего образование новой фазы при перегреве воды.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из термостата 1 и вспомогательного сосуда 2, в которых находится рабочая жидкость. Термостат снабжен акустически прозрачным дном и подогревателем, который питается посредством электронного блока 3, обеспечивающего стабилизацию заданной температуры. Акустический датчик 8 помещен во вспомогательном сосуде у дна с целью предотвращения перегрева пьезопреобразователя, представляющего собой три прямоугольные пластины из пьезокерамики ЦТБС. Термостат заполнялся маслом с высокой (более 300°C) температурой вспенивания.

Перед началом измерений с помощью механического перемешивающего устройства готовится водотопливная эмульсия. Определенное ее количество помещается в термостат, в котором температура изменяется ступенчато от 100 до 350°C . Нагревание эмульсии сопровождается вскипанием сферических объемов воды, содержащих зародыши с размерами, равными или превышающими критический для данной температуры. Вскипание частички воды сопровождается генерированием акустического импульса вида

$$p_a(\tau) = p_{max} \exp(-k_a\tau) \cos(\omega\tau + \psi),$$

где τ — время; p_a , p_{max} — текущее и амплитудное значения акустического давления; k_a — постоянная затухания; ω , ψ — частота и начальная фаза.

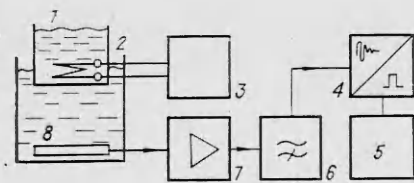


Рис. 1.

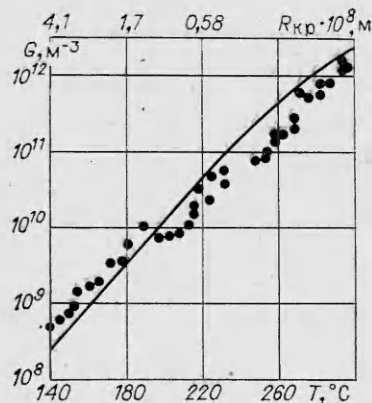


Рис. 2.

Акустические импульсы усиливаются широкополосным усилителем 7. Далее электрический сигнал поступает на фильтр верхних частот с целью подавления низкочастотных акустических помех. Преобразователь 4 служит для формирования из экспоненциально затухающих импульсов прямоугольных с малой длительностью и высокой крутизной фронтов. Количество импульсов регистрируется цифровым частотомером 5. Таким образом, установка и методика дают возможность измерять число зародышей кипения G в единице объема воды в функции температуры.

На рис. 2 точками показана зависимость $G(T)$, полученная для эмульсии воды в мазуте марки М-60. Максимальный диаметр сферических включений воды равен $5 \cdot 10^{-5}$ м. Кривая получена подстановкой решения уравнения (2) в распределение (3) при экспериментальном значении $A = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. Переход от зависимости $G(T)$ к $G(R_{кр})$ осуществляется также по (2). Удовлетворительное совпадение опытных данных (см. рис. 2) с результатами акустических измерений распределения пузырьков [4] подтверждает достоверность получаемых результатов. При температурах, близких к 300°C , определение числа неустойчивых центров парообразования по настоящей методике затруднительно в связи с тем, что частота следования акустических импульсов превышает быстрейшие электронного тракта, который может отсчитывать до 100 импульсов в секунду. Такое увеличение частоты закипания частиц воды связано с тем, что указанная выше температура близка к температуре максимально возможного перегрева, составляющей для воды 302°C [5]. При этом изменяется сама природа центров парообразования, возникающих в данном случае в соответствии с гомогенной схемой зародышеобразования в результате тепловых флуктуаций плотности жидкости.

Анализ экспериментальных данных показывает, что для капель эмульсии с $d_k < 10^{-4}$ м вероятность присутствия гетерогенных зародышей незначительна. Так, например, при $d_k = 10^{-4}$ м и $\phi = 0,2$ объемное содержание воды составляет $\sim 10^{-13} \text{ м}^3$. Из анализа данных рис. 2 следует, что при $T < 300^\circ\text{C}$ фазовый переход вода — пар произойдет только в одной из пяти капель, в остальных случаях кипение воды будет происходить по гомогенной схеме зародышеобразования при температуре, близкой к максимально возможному перегреву воды. В этой связи существенно отметить, что в подавляющем большинстве известные экспериментальные исследования по воспламенению водотопливных эмульсий [1, 2] проведены при $d_k \geq 2 \cdot 10^{-3}$ м. Очевидно, что эти результаты не могут быть распространены без особых оговорок на реальные процессы горения, так как для мелких капель процессы нагревания и образования конкурентной фазы будут протекать иным образом.

Рассмотрим некоторые особенности начальных стадий прогрева капле обводненного топлива. Численная модель процесса предполагает, что эмульсия мелкодисперсна настолько, что можно ввести в рассмотрение коэффициент теплопроводности эмульсии λ [5]. Кроме того, считается, что процесс нагрева капле обладает сферической симметрией, а коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость c и плотность ρ есть

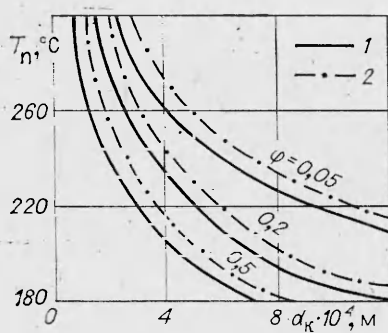


Рис. 3.

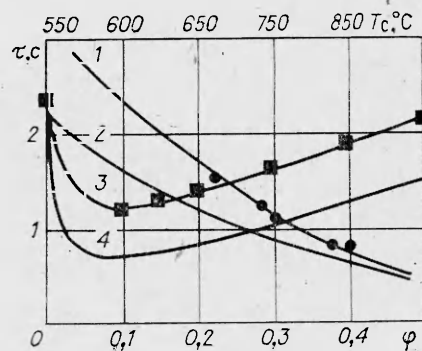


Рис. 4.

функции температуры. В этом случае теплообмен описывается уравнением

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (4)$$

Начальная температура считается постоянной, т. е. $T(r, 0) = T_0$, а на поверхности капли предполагается выполнение граничных условий третьего рода

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} T(0, \tau) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial r} T(r_k, \tau) &= H [T_c - T(r_k, \tau)], \end{aligned} \quad (5)$$

где r_k — радиус капли эмульсии; H — постоянная, определяющая поток тепла на границе со средой, имеющей температуру T_c .

На рис. 3 приведены результаты численного расчета зависимости температуры поверхности капли T_n как функции ее диаметра d_k при различных значениях объемного содержания воды ϕ в мазуте М-60. Значение T_n соответствует моменту начала кипения воды, при этом считается, что фазовый переход вода — пар начинается при условии

$$\phi \int_V \int_{R_{кр}}^{R_{max}} N(R) dR dV = 1 \quad (6)$$

(V — объем капли эмульсии). Равенство (6) означает, что математическое ожидание числа неустойчивых зародышей в объеме данной капли становится равным единице. Линии на рис. 3 получены при совместном решении уравнений (2), (4), (6) численными методами, кривые 1, 2 соответствуют $T_c = 700$ и 950°C . Как и следовало ожидать, при прочих равных условиях значение T_n существенно зависит от ϕ . Так, для капель с $d_k = 4 \cdot 10^{-4}$ м при увеличении ϕ от 0,05 до 0,5 температура, соответствующая фазовым превращениям, понижается с 260 до 208°C . Необходимо отметить, что T_n в момент начала фазовых превращений слабо зависит от T_c , что при достаточно высоких скоростях нагрева объясняется вскипанием частиц воды, находящихся в непосредственной близости от поверхности капель эмульсии.

Процессы образования конкурентной фазы в частичках воды тесным образом взаимосвязаны с последующим воспламенением капель, так как переход воды в парообразное состояние сопровождается микровзрывами, проявляющимися как скачкообразное изменение диаметра исходных капель и отрыв от основной массы капли мелких объемов топлива.

Анализируя данные рис. 2, 3, можно заключить, что при фиксированной температуре поверхности микровзрывы будут происходить в первую очередь в каплях большого диаметра и с большим влагосодержанием, так как вероятность присутствия в них неустойчивых зародышей кипения больше. В малых каплях эмульсии испарение воды происходит

при более высоких температурах. Это может привести к качественному различию в воспламенении капель разного масштаба, состоящему в том, что малые капли способны воспламеняться до момента образования в них конкурентной фазы. Подтверждением наличия взаимосвязи между кипением воды и воспламенением могут служить графики рис. 4, где приведено сопоставление расчетов, выполненных в соответствии с излагаемой моделью, с экспериментальными данными [1, 2], полученными для капель ($d_k = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м) эмульсии мазута М-60 и воды (эксперимент: 1 — $\tau(T_c)$, $\varphi = 0,2$, 2 — $\tau(\varphi)$, $T_c = 850^\circ\text{C}$; 3, 4 — расчет). Эти зависимости соответствуют времени прогрева капли до температуры, соответствующей началу образования в воде конкурентной фазы.

Близость линий 1, 2 при $T_c > 750^\circ\text{C}$ указывает на то, что капли воспламеняются сразу после вскипания воды, а для $T_c < 750^\circ\text{C}$ характерно возрастание задержки воспламенения. Экспериментальная 3 и теоретическая 4 кривые имеют минимум при $\varphi = 0,05$. Эту особенность можно объяснить следующим образом. При $\varphi > 0,1$ вода в эмульсии оказывает существенное влияние на теплоемкость и теплопроводность капли, приводя к их возрастанию по сравнению с безводным топливом, что влечет за собой увеличение времени прогрева. Для $\varphi < 0,05$ теплоемкость и теплопроводность эмульсии близки к соответствующим значениям для безводного топлива, но, как это следует из данных рис. 3, уменьшение φ приводит к росту температуры фазового перехода вследствие дефицита центров парообразования.

Для практики представляет определенный интерес сравнение периодов предварительного прогрева до воспламенения капель безводного топлива и эмульсии. Эксперименты в этом направлении проводились при $d_k = (1-2) \cdot 10^{-3}$ м и показали, что такие капли эмульсии воспламеняются быстрее обычного топлива. Кроме того, при эксплуатации котлов на водотопливной эмульсии [7] наблюдалась интенсификация горения только при относительно плохо организованных процессах распыления жидкого топлива. Время начального прогрева неподвижной капли до воспламенения возможно условно разделить на три периода [8]: предварительный прогрев (τ_n), предварительное испарение (τ_k) и химическая индукция (τ_x), при этом величина ($\tau_n + \tau_k$) пропорциональна квадрату диаметра капли, а τ_x определяется лишь сортом топлива и температурой внешней среды. Если обводненная капля воспламеняется до момента наступления фазовых превращений воды, то процесс сходен с воспламенением безводного топлива. В противном случае период начального прогрева в первом приближении возможно представить так: нагревание капель эмульсии до фазовых переходов вода — пар τ_k , выброс мелких частиц топлива или распад исходной капли, дальнейший прогрев и предварительное испарение вновь образованных объемов топлива плюс период химической индукции τ_x .

Следует отметить, что в рассматриваемой схеме существенны только периоды нагревания до фазовых превращений и химической индукции. Вскипание воды носит взрывообразный характер, а прогреваются и испаряются мелкие капли, образовавшиеся в результате микровзрыва, значительно быстрее крупных.

Таким образом, оценку снизу для периода воспламенения капель эмульсии возможно получить, сравнивая τ_k для эмульсии с величиной ($\tau_n + \tau_k$) для безводного топлива. Значение τ_k можно получить теоретически по описанной выше методике, а характеристику воспламенения K — из эмпирической зависимости [8] $K = d_k^2 / (\tau_n + \tau_k)$. При постоянстве T_c уравнение вида $\tau_k(d_k, T_c, \varphi) = d_k^2 / K$ связывает размер капли с влагосодержанием. На рис. 5 приведено решение такого уравнения для эмульсии мазута М-60 при $T_c = 850^\circ\text{C}$. Физический смысл полученной зависимости заключается в следующем. Уменьшение времени воспламенения при замене безводного топлива эмульсией можно ожидать только в том случае, если параметры капель лежат в заштрихованной области рисунка. Таким образом, положительный эффект в плане ускорения вос-

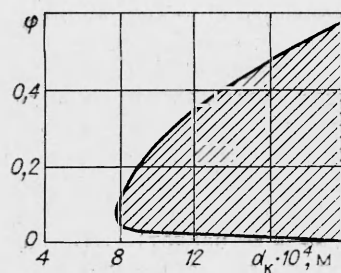


Рис. 5.

пламенения при использовании водотопливных эмульсий следует ожидать только для достаточно крупных капель, что согласуется с опубликованными ранее выводами [7], полученными при длительной эксплуатации целого ряда паровых котлов.

На основании приведенных в настоящей работе данных можно сделать следующие выводы:

- предлагаемый термоакустический способ и используемая методика позволяют непосредственно регистрировать зародыши кипения в водотопливных эмульсиях;
- разработанная модель процессов, происходящих при нагревании капель эмульсии, дает возможность оценивать влияние отдельных факторов на условия образования конкурентной фазы в диспергированной воде;
- температура фазовых переходов вода — пар в эмульсии зависит от объема капель и величины их влагосодержания, при этом в малых каплях вскипание воды происходит по гомогенной схеме зародышеобразования при температурах, соответствующих максимально возможному перегреву воды;
- полученные данные позволили установить взаимосвязь между образованием конкурентной фазы в воде и воспламенением капель;
- показаны значения диаметров капель эмульсии и их влагосодержания, при которых возможно ускорение процесса воспламенения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Иванов. Топливные эмульсии. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. О. Н. Лебедев, В. И. Марченко. Тр. НИИВТ. Вып. 114. Новосибирск, 1976.
3. А. Я. Исаков. ФГВ, 1985, 21, 1.
4. Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. Кавитация. М.: Мир, 1974.
5. В. П. Скрипов. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1974.
6. А. Ю. Бувенч, Ю. А. Корнеев. ИФЖ, 1976, 31, 4.
7. P. V. Thomson. Marine engineering review, 1979, 4.
8. Л. В. Кулагин, С. С. Охотников. Сжигание тяжелых жидких топлив. М.: Недра, 1967.

Поступила в редакцию 22/VII 1985

О ЗАЖИГАНИИ И ГОРЕНИИ ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ГАЗА

И. Г. Ассовский, Э. Г. Закиров, О. И. Лейпунский

(Москва — Казань)

Комбинированный радиационно-конвективный нагрев в потоке горячего газа — наиболее распространенная форма теплообмена при зажигании конденсированного топлива. Поступающее к поверхности топлива тепло обычно разделяют на конвективную и лучистую составляющие, которые в достаточной степени не зависят друг от друга [1]. В случае непрозрачного топлива, теплопередача в котором происходит лишь посредством теплопроводности, лучистая составляющая может быть учтена введением эффективного коэффициента теплообмена. При этом задача, по существу, аналогична зажиганию при конвективном нагреве, подробно исследованному в [2].

Принципиальное отличие возникает при рассмотрении полупрозрачного топлива, разогрев которого наряду с теплопроводностью осуществляется за счет объемного поглощения лучистой энергии. Появление в