УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ Н-АЛКАНОВ В ВОЗДУХЕ

Орловская С.Г., Шкоропадо М.С., Каримова Ф.Ф., Шкоропадо А.С., Кисса В.Д.

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина

АННОТАЦИЯ

Экспериментально изучены процессы горения одиночных капель и систем из двух капель н-алканов (октадекана $C_{18}H_{38}$ и докозана $C_{22}H_{46}$) в воздухе при нормальных условиях. Определены константы скорости горения алканов, найдены значения критического межкапельного расстояния, при котором не происходит воспламенение капли от горящей соседней. Определены временные зависимости высоты пламени каждой из капель и общего факела в случае слияния пламен.

ВВЕДЕНИЕ

Альтернативные виды топлива находят все более широкое применение в энергетике и на транспорте благодаря их экологичности и эффективности. Так в последние годы активно разрабатывается топливо на основе парафина для гибридных ракетных двигателей. Исследования, проведенные за рубежом [1], показали, что парафиновый заряд характеризуется высокой линейной скоростью горения и обеспечивает достаточный удельный импульс. Установлено, что парафиновое топливо распыляется потоком окислителя и сгорает в виде капель. Поэтому для моделирования процессов в камере сгорания требуются данные по характеристикам горения как одиночных капель парафина, так и совокупностей капель. Такие данные позволят определить оптимальный состав топливной композиции для обеспечения требуемых технических характеристик двигателя. Особенности распространения пламени в струях необходимо учитывать при организации сжигания жидкого топлива в промышленных печах, двигателях внутреннего сгорания и других устройствах. В зависимости от среднего расстояния между каплями имеет место горение одиночных капель либо совокупности капель. Поэтому целью работы является изучение кинетики горения капель парафинового топлива, определение характеристик воспламенения и горения, а также геометрических размеров пламени отдельных и совокупностей капель [2,3].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования горения одиночных и двойных капель октадекана ($C_{18}H_{38}$) и докозана ($C_{22}H_{46}$) проводились на специальном стенде, блок-схема которого представлена на рис.1. Капли парафина (4, 5), подвешивались на верхний и нижний вольфрамовые подвесы (2, 3) сферической формы с диаметром 0.58 мм. Подвесы закреплены на штативе (1). Капля поджигалась искровым разрядом от катушки Румкорфа (11). Пламя горящей капли регистрировалось Web – камерой Genius iSlim 1300 (6). Непрерывная съемка самой капли осуществлялась с помощью Web – камеры Trust WB–1400T (8), через объектив микроскопа (10) с увеличением x16.

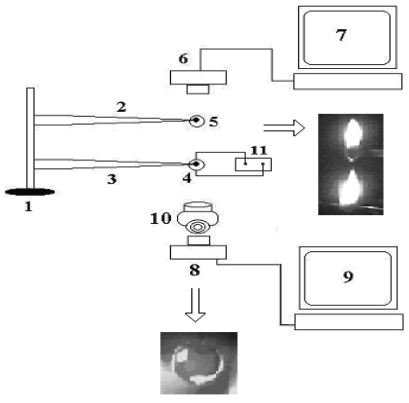

Рис.1 Блок-схема установки.

Видеофайлы от камер передавались на персональные компьютеры (7, 9). В системе двух капель искровым разрядом поджигалась нижняя капля, от которой затем воспламенялась верхняя. Расстояние между каплями регулировалось микровинтом.

Затем видео-файлы кадрировали и полученные цифровые изображения обрабатывали на компьютере с использованием инструментария Image Processing Toolbox пакета Matlab 7.0. Форма капель отличалась от сферической, поэтому мы находили эффективный диаметр капель.

Таким образом, были определены зависимости от времени диаметра и квадрата диаметра капель, а также измерены геометрические размеры (высота) пламени каждой капли по отдельности и общего факела в процессе горения капель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

После предварительной обработки полученных экспериментальных данных строились зависимости безразмерного квадрата диаметра капель октадекана и докозана от времени от времени горения. Установлено, что полученные зависимости близки к линейным (рис. 2), что свидетельствует о выполнении закона Срезневского и диффузионном режиме горения.

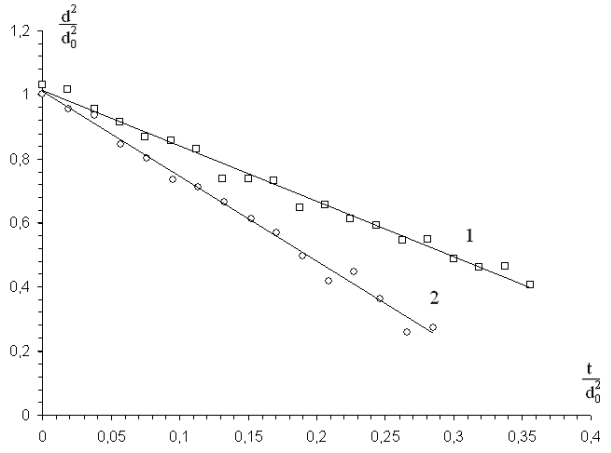

Рис.2 Зависимость $d^2/d_0^2 = f\left(t/d_0^2\right)$: 1 – докозан ($C_{22}H_{46}$); 2 – октадекан ($C_{18}H_{38}$).

По тангенсу угла наклона линейных зависимостей были определены константы скорости горения (K_{bur}). Для докозана K_{bur} составляет 1,7 мм^2/с, а для октадекана - 2,6 мм^2/с при равных начальных диаметрах капель d_0 = 2,05 мм. Таким образом, константа скорости горения капель октадекана в 1,5 раз превышает константы скорости горения докозана [4].

Чтобы определить критическое значение межкапельного расстояния, выше которого капли горят отдельно, мы исследовали распространение пламени в простейшей системе из двух капель, расположенных по вертикали и по горизонтали. Нижнюю каплю поджигали от внешнего источника, а вторая воспламенялась от первой. При горизонтальном расположении капель воспламенение второй капли происходит при условии $1 < L/d_0 < 2$, где L – расстояние между центрами капель. При условии $L/d_0 \approx 3$, происходит плавление второй капли; если $L/d_0 > 4$ изменений второй капли не наблюдается.

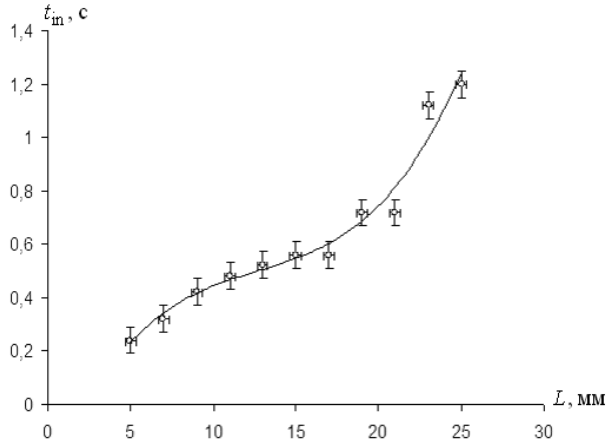

Рис.3 Время задержки воспламенения верхней капли октадекана (d_0 = 2,1 мм) как функция расстояния между каплями.

Найдена зависимость времени задержки воспламенения (периода индукции) верхней капли от межкапельного расстояния капель для случая расположения капель по вертикали (рис.3). Существует критическое значение расстояния L, выше которого верхняя капля не воспламеняется. Для рассматриваемого случая L >29 мм.

Установлено, что высота пламени максимальна, когда расстояние между каплями равно 11 мм. При этом высота пламени нижней капли достигает 22 мм, а суммарного факела около 60 мм.

На рис.4 представлены изображения раздельно горящих капель для случая, когда верхняя капля находится вне факела нижней (а). Она воспламеняется за счет конвективного нагрева, далее пламена не перекрываются (б). Высота пламени верхней капли выше, чем нижней, а время горения больше (рис.5).

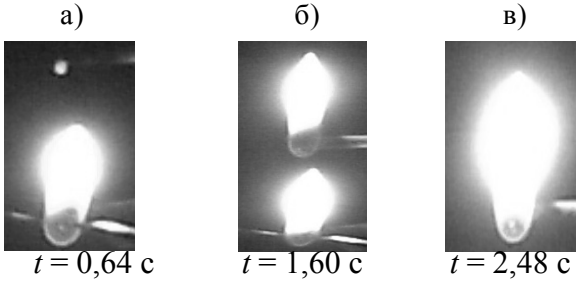

Рис.4 Пламена капель октадекана в разные моменты времени при L =23мм. а) горящая нижняя капля и расплавившаяся верхняя, б) две горящие капли, в) горящая верхняя капля (нижняя погасла).

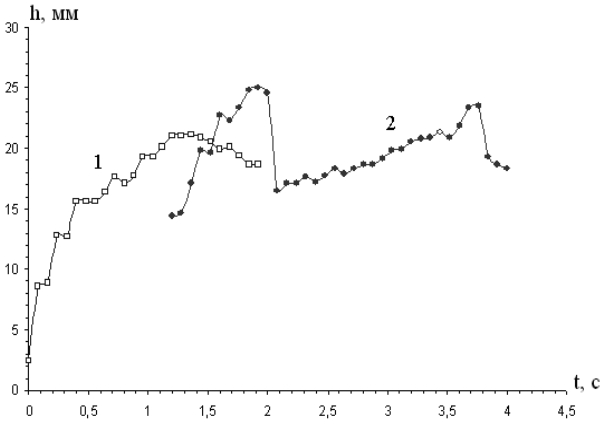

Рис.5 Изменение высоты пламени капель октадекана в процессе горения. 1 – нижняя капля; 2 – верхняя капля.

Последнее обстоятельство связано с тем, что верхняя капля горит в обедненной кислородом среде продуктов сгорания парафина.

В системе двух капель октадекана при $L/d_0 > 10$ воспламенение верхней капли происходит под действием потока тепла от горящей нижней капли, при этом ее пламя не достигает поверхности верхней капли.

Исследования горения системы двух капель докозана показали, что при межкапельном расстоянии L >27мм нижняя капля не поджигает верхнюю, а только оплавляет ее.

На рисунках 5 и 6 приведены зависимости высоты пламен капель октадекана и докозана от времени горения при равных межкапельных расстояниях. Для октадекана (рис.5) удалось зафиксировать высоту пламени нижней (кривая 3) и верхней (кривая 2) капель, а также высоту общего факела (кривая 1). Для докозана (рис.6) центральная часть кривой соответствует высоте общего факела, левая и правая ветви – высоте пламени нижней и верхней капель соответственно.

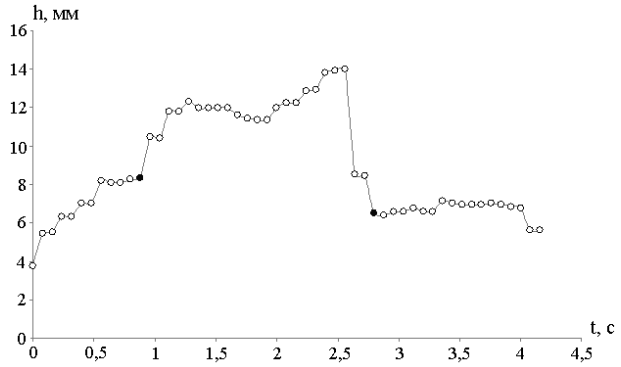

Рис.6 Высота пламени в системе двух капель для докозана.

Сопоставление данных зависимостей позволяет сделать вывод, что высота пламени системы двух капель октадекана значительно превышает высоту суммарного факела и отдельных пламен капель докозана.

В таблице 1 представлены полученные максимальные значения высоты общего пламени двух капель октадекана и докозана при разных значениях расстояния между каплями.

Таблица 1. Максимальная высота пламени в системе двух капель.

L,мм	7	9	11	15
h,мм ($C_{18}H_{38}$)	35,6	40,4	55,3	31,4
h, мм ($C_{22}H_{46}$)	13,6	16,3	26,2	28,6

Видно, что высота факела октадекана более, чем в два раза превышает высоту факела докозана. При этом максимальная высота пламени двух капель, возрастает с увеличением расстояния между ними. Время горения верхней капли зависит от расстояния между каплями. Это связано, с тем, что вторая капля попадает в разные зоны факела нижней капли.

ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований найдены константы скорости горения одиночных капель нормальных алканов.

- Установлено, что константа скорости горения октадекана в 1,5 раза превышает константу скорости горения докозана.
- Детально изучено горение системы двух капель (октадекана, докозана), определены условия воспламенения одной капли парафина от горящей соседней капли при горизонтальном и вертикальном расположении капель.
- Найдено время задержки воспламенения верхней капли в зависимости от межкапельного расстояния, время горения капель, суммарная высота факела, а также максимальное расстояние между каплями, при котором верхняя капля может воспламениться потоком тепла от горящей нижней капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Santos L.M.C., Almeida L.A.R., Fraga A.M., Veras C.A.G. (2006) ‘’Experimental investigation of a paraffin based hybrid rocket’’, *Thermal Engineering*, Vol.5, no.1, pp. 8-12.
2. Орловская С.Г. Исследование кинетики горения капель парафинового топлива для гибридных двигателей / С.Г. Орловская, М.С. Шкоропадо, Ф.Ф. Каримова, Т. М. Гошкович // III международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее». Днепропетровск, 2011.− С. 61-62. Orlovskaya S.G.(2011). “Study of burning kinetics of paraffin propellant for hybrid rockets”, III International Conference “Kosmicheskie tehnologii: nastoyaschee I buduschee”, Dnepropetrovsk, Ukraine, pp. 61-62.
3. Актан О.Ю. Фізичні основи конструювання двигуна на парафіновому паливі для гібридних ракет/ Ю. Ф. Забашта, В. Я. Черняк, С. Г. Орловська та ін.// Кінетика плавлення і горіння. Космічна наука і технологія.− 2011.– Т. 17, № 3. − С. 28-33. Aktan O. Yu. (2011). “Basic physics of paraffin propellant hybrid rockets”, *Kosmichna nauka I technologiya*, Vol. 17, no.3, pp. 28-33.
4. Орловская С.Г., Калинчак В.В., Шкоропадо М.С., Каримова Ф.Ф., Актан Е.Ю. Определение характеристик горения докозана // XXIV научная конференция стран СНГ, 20 – 24 сентября 2010 года «Дисперсные системы». Одесса, Украина, 2010. − С.222-223. Orlovskaya S.G.(2010). “Study of n-Docosane burning characteristics”, XXIV scientific conference “Dispersed systems”, Odessa, Ukraine, pp. 222-223.

© Орловская С.Г., Шкоропадо М.С., Каримова Ф.Ф., Шкоропадо А.С., Кисса В.Д.