

УДК 621.43.056+519.6

Д.А. ДОЛМАТОВ¹¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ГОРЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ И ПАРНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПРИ БЫСТРОМ ИСПАРЕНИИ

Статья рассматривает вопросы влияния скорости испарения жидкого углеводородного топлива и взаимного влияния близко расположенных капель на процессы горения и образования вредных веществ. Проведено численное моделирование физико-химических процессов в приповерхностном слое капли и в богатой остаточными топливными радикалами зоне между двумя испаряющимися каплями при высокой детализации кинетической схемы горения. Выполнен сравнительный анализ влияния начального диаметра и расположения капель на процессы окисления при различных температурах, оценен вклад соотношения скоростей испарения и окисления в генерацию оксидов азота.

Ключевые слова: испарение топлива, углеводородный радикал, поверхность капли, интенсивность реакций, соотношение скоростей

Введение и постановка задачи

Гетерогенное горение углеводородных топлив представляет значительный интерес как с академической, так и с прикладной точки зрения вследствие широкой распространенности устройств, использующих жидкие топлива. Наряду с изучением процессов в соответствующих узлах двигателей, силовых установок, котлов и т.д., заключающемся в численных и натурных экспериментах по получению достоверных полей параметров при горении жидкого топлива [1, 2] в последнее время существует тенденция к исследованию процессов на микроуровне, соответствующем деформации и горению отдельной капли либо небольшого капельного кластера, включающего до 6 – 8 индивидуальных капель. Важность подобного подхода очевидна и связана с необходимостью корректной трансляции физико-химических характеристик процесса разрушения капель и, соответственно, изменения реакционной способности и состава среды.

Неоднократно указывалось [3, 4, 5], что как натурные, так и численные эксперименты свидетельствуют о существенных различиях в процессе горения одиночной капли (достаточно высокий коэффициент избытка воздуха, сильное измельчение топливных капель, <10 мкм) и сопряженного капельного топливного кластера, т.е. структуры течения, в которой капли топлива находятся друг от друга на расстоянии менее $3 - 5 d_0$, где d_0 – средний начальный диаметр капли топлива. Вместе с тем различия в характеристиках подобных процессов и их зависимость от условий протекания до настоящего времени остаются недостаточно подробно изученными,

в связи с чем задача численного моделирования процессов горения различных капель топлива является актуальной и своевременной.

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбраны сферические капли жидкого углеводородного топлива различного химического состава и начального диаметра, движущиеся по линейным непересекающимся траекториям с постоянной скоростью в среде с постоянным давлением, но переменной температурой. Для упрощения математической модели предполагается, что при испарении происходит центросимметричное изменение размера капель при сохранении сферической формы. Целью исследования является изучение взаимосвязей основных характеристик среды с начальными условиями, геометрическими и химическими параметрами воздушно-капельной смеси.

Влияние геометрических характеристик капельной взвеси

Для ограничения области дальнейших изысканий целесообразно ввести характерный детерминирующий критерий, определяющий соотношение между теплофизической скоростью испарения капли и химической скоростью горения топлива. Очевидно, что на начальных этапах горения капли (и, в большинстве случаев [6], до ее полного испарения) будет наблюдаться активное изменение формы и объема как самой капли, так и присоединенной области с повышенной реакционной способностью и значимыми концентрациями органических соединений. Известны результаты численного моделирования термического и электрохимического горения одиночной

капли жидкого топлива с учетом деформации под воздействием термогазодинамических сил и химических реакций [6, 7]. Как следует из упомянутых результатов, области с ненулевым содержанием остаточных алкильных радикалов и кислородсодержащих органических соединений могут достигать от 3 до 10 начальных диаметров капли и существенно эволюционируют по мере развития горения; при этом, разумеется, скорость полного окисления газообразных углеводородов заметно уступает скорости их поступления в реакционную зону, поскольку в противном случае наблюдалось бы быстрое уменьшение вышеназванной области. В то же время известны случаи медленного выгорания капли топлива, при которых реакции горения происходят в основном в сравнительно тонком приповерхностном слое постоянной толщины (порядка $0,2 - 0,8 d_0$), а массо- и энергообмен с основным потоком осуществляется за счет конвекции окончательных продуктов сгорания [4]. Таким образом, для различения характерных типов физико-химических процессов горения целесообразно ввести параметр скорости выгорания γ_{ce} , характеризующий соотношение скоростей объемного расходования в ходе реакций и испарения углеводородных радикалов:

$$\gamma_{ce} = \frac{v_{C_xH_y}|_e}{v_{C_xH_y}|_r}, \quad (1)$$

где $v_{C_xH_y}|_r$ – скорость объемного расходования газообразных углеводородов в ходе химических реакций:

$$v_{C_xH_y}|_r = v_{C_xH_y} \int_V v_{\Sigma} dV, \quad (2)$$

где $v_{C_xH_y}$ – удельный молярный объем углеводородов при данной температуре и давлении, $\text{м}^3/\text{моль}$;

v_{Σ} – суммарная скорость производства-расходования углеводородов, $\text{моль}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ (без учета знака величины);

$v_{C_xH_y}|_e$ – объемная скорость испарения углеводородов, совпадающая со скоростью испарения капли:

$$v_{C_xH_y}|_e = \frac{dV_{\text{drop}}}{dt}. \quad (3)$$

В (2) интегрирование ведется либо по замкнутому объему, в котором наблюдается ненулевое содержание нерасщепленных углеводородов топлива, либо по замкнутому объему с содержанием промежуточных реагентов выше некоторой заранее заданной контрольной величины.

Нетрудно видеть, что условно быстрому испарению капли топлива соответствуют значения $\gamma_{ce} < 1$, а равновесному и условно медленному – $\gamma_{ce} \geq 1$. В настоящей работе будут рассмотрены процессы, соответствующие условно быстрому испарению с небольшими значениями коэффициента γ_{ce} . Следует отметить, что испарение малых капель топлива ($d_0 < 5 \text{ мкм}$) при установившемся фронте пламени, по-видимому, всегда является условно быстрым с весьма большими значениями γ_{ce} .

Исследователями неоднократно отмечалось, что горение разреженной топливной взвеси и плотного кластера существенно различаются, причем одной из основных причин существующих различий являются особенности зоны горения, образованной при слиянии внешних слоев горения двух близко расположенных капель. На рис. 1, 2 представлены поля параметров, полученных при расчете центросимметричного горения одиночной и парных капель при помощи программного пакета высокого уровня (начальные диаметры капель в обоих случаях $d_0 = 8 \text{ мкм}$; химический состав – смесь *n*-октана (50%), 2,4-диметилгексана (25%) и 3,3-этилметилпентана (25%); давление среды 5 атм; начальная температура капель топлива и воздуха – 420 К; максимальная температура среды – 2450 К; средняя температура среды в рассматриваемой зоне – от 1400 до 1500 К). При моделировании не учитывались нестационарные эффекты, связанные с конвективными микроточками вблизи жидкой поверхности капель, а также возможность физико-химического или турбулентного формирования нанокластеров с сильными градиентами концентраций и/или температур, в связи с чем полученные при расчетах изотермы представляют собой правильные поверхности.

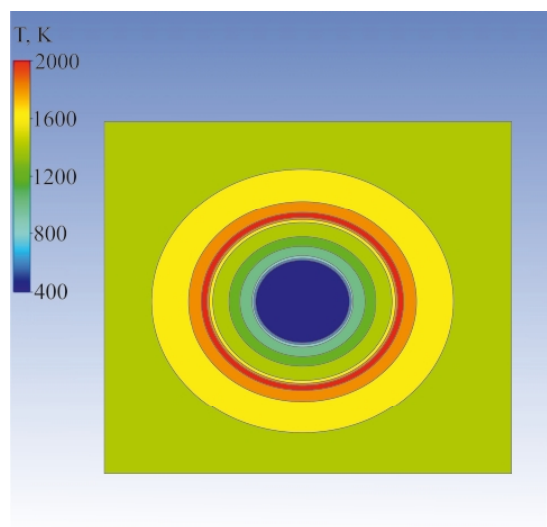


Рис. 1. Поле температур при горении одиночной капли топлива

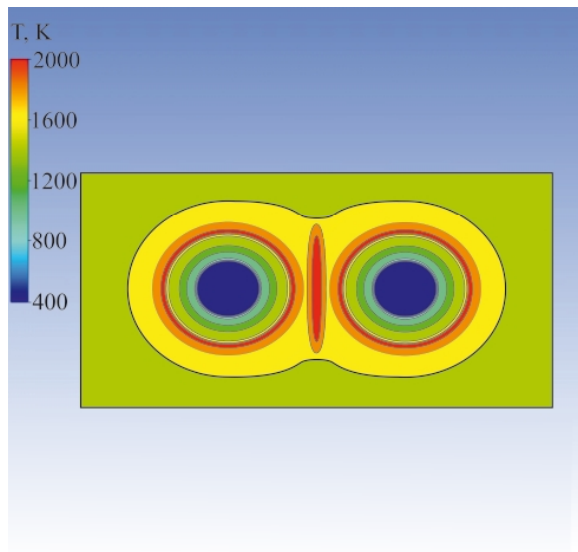


Рис. 2. Поле температур при горении двоекных капель топлива

Несмотря на известное огрубление расчетной схемы в связи с допущением о сферической симметрии испарения и выгорания капли, результаты расчетов хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными в части формирования зоны повышенной температуры и реакционной активности в медианном сечении между каплями. В рамках поставленных задач было проведено исследование зависимости максимальной температуры и концентраций характерных веществ при различных условиях горения. На рис. 3, 4 представлены зависимости вышеназванных параметров от начального диаметра капель при различных значениях коэффициента γ_{ce} .

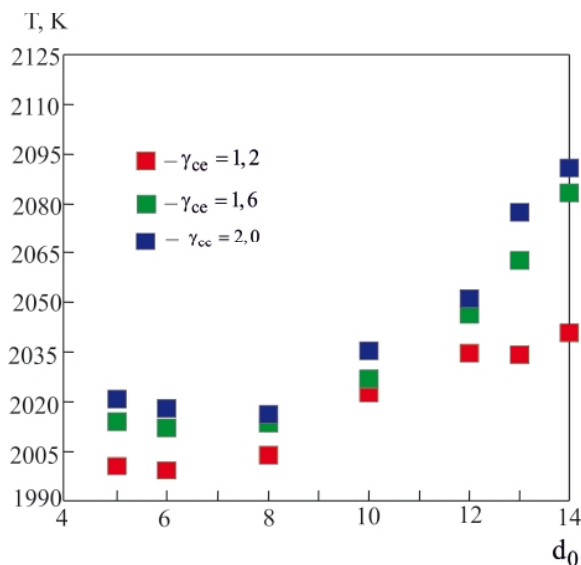


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры от начального диаметра (одиночная капля)

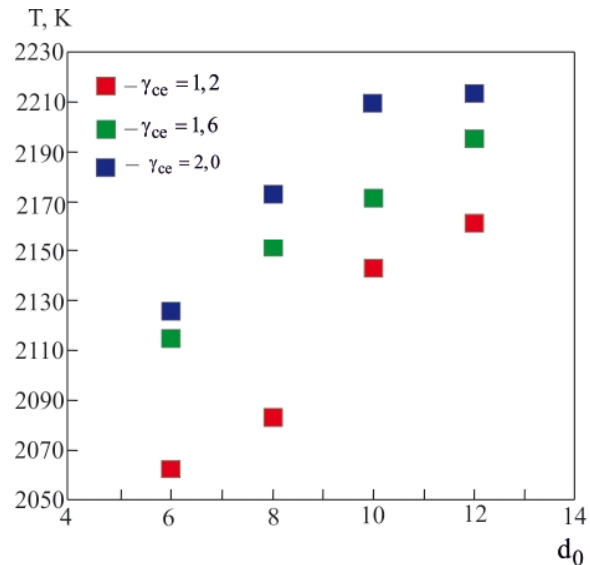


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры от начального диаметра (парные капли)

В целом температура зоны с повышенной реакционной способностью (и значительным ростом концентрации атомарного кислорода [7]) при горении близко расположенных парных капель превышает максимальную температуру приповерхностного слоя. Приведенные на рис. 4 данные для всего диапазона соответствуют именно зоне между каплями, в то время как максимальные температуры шарового слоя в непосредственной окрестности капли (рис. 1, 2) практически не отличаются от горения изолированной капли. Рост начального диаметра капли приводит к увеличению максимальной температуры, причем для одиночной капли коэффициент скоростей оказывает существенное влияние на характер изменения температуры – при $\gamma_{ce} = 1,2$ (и, очевидно, близких к равновесным значениям) температура с увеличением начального диаметра капли растет весьма медленно. Для двух близко расположенных капель (рис. 4) характер зависимости одинаков при всех исследованных значениях γ_{ce} , хотя более быстрому испарению соответствуют более высокие температуры вследствие увеличения производства и интенсификации окисления метильных радикалов в зоне между каплями. Следует также отметить, что зона максимума температур для двухкапельной схемы характеризуется повышенным производством оксидов азота по механизму Зельдовича.

Также была произведена оценка влияния расстояния между центрами капель на максимальную температуру и максимальное содержание NO. Результаты моделирования представлены на рис. 5, 6 (во всех случаях рассматривается горение двух капель). Весьма интересно наличие локального максимума температуры

при $\gamma_{ce} = 1,6$, что свидетельствует о сложном кинетическом характере процесса горения при быстром испарении.

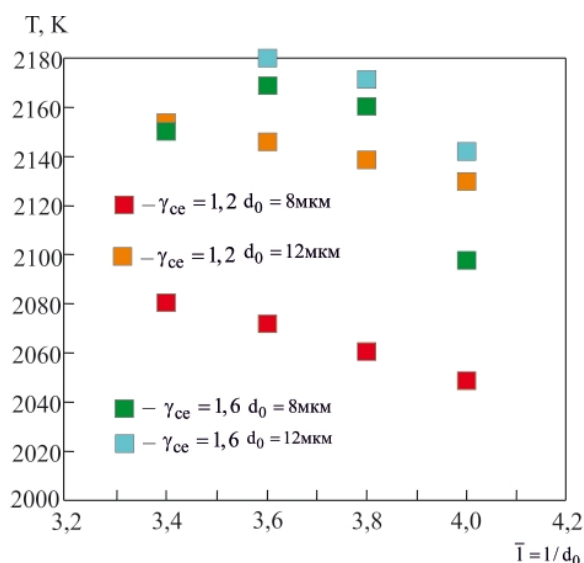


Рис. 5. Зависимость пиковых значений температуры от условий горения

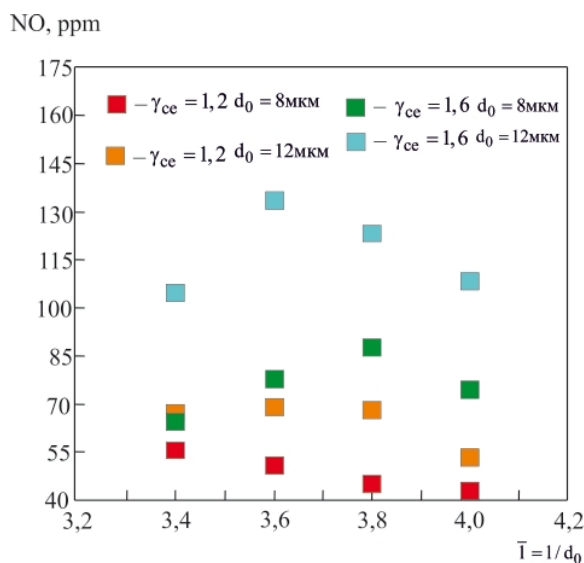


Рис. 6. Зависимость пиковых концентраций NO от условий горения

В целом влияние расстояния между центрами капель в диапазоне от 3,2 до 4,0 d_0 на протекание процессов в зоне максимума температур достаточно нелинейно. Как видно из рис. 6, положение эмиссионного максимума при $\gamma_{ce} = 1,6$ в значительной степени зависит от диаметра капли, причем у более крупных капель оптимум соответствует меньшему расстоянию, в то время как при близости процесса к равновесному для

капель с $d_0 = 8$ мкм наблюдается монотонное уменьшение пиковых значений NO, а при $d_0 = 12$ мкм существует слабо выраженный максимум в районе $\bar{T} = 3,6..3,7$. Анализ химической кинетики процесса свидетельствует о скачке производства кислородсодержащих органических соединений при наблюдении максимума NO при $\gamma_{ce} = 1,6$, что может служить причиной дополнительного производства оксидов азота по сравнительно медленным механизмам и подлежит дальнейшему исследованию.

Для оценки степени влияния коэффициента соотношения скоростей испарения и окисления на физико-химические процессы в пламенах и возможности использования данной величины как инвариантного критерия при исследовании горения капель жидкого топлива необходимо изучение процессов при более широком диапазоне значений γ_{ce} и внешних условий.

Литература

1. Law C.K. Recent advances in droplet vaporization and combustion / C.K. Law // Prog. Energy Combust. – Sci., 1982. – Vol. 8. – PP.171 – 201.
2. Godsavage G.A.E. Studies of the combustion of drops in a fuel spray – the burning of single drop in fuel / G.A.E Godsavage // Proc.4th Symposium on Combustion. – Williams and Wikings Co., Baltimore, 1953. – PP 818 – 830.
3. Взаимодействие капли горячего с газовым потоком [Текст] / А.А. Борисов, С.М. Фролов, В.А. Сметанюк, С.А. Полихов, К. Сегал // Химическая физика. – 2005. – №7.
4. Hara H. The effect of initial diameter of free droplet combustion with spherical flame [Text] / H. Hara, S. Kumagai // Proc.25th Symp. On Combustion. – Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1994. – PP.423 – 430.
5. Kent J.C. Quasi-steady diffusion-controlled droplet evaporation and condensation / J.C. Kent // Appl. Scient. Res. Ser., 1973. – PP.315 – 359.
6. Sirignano W.A. Fuel droplet vaporization and spray combustion theory / W.A. Sirignano // Prog. Energy Combust. – Sci., 1983. – Vol. 9. – PP.291 – 322.
7. Численное моделирование течений реагирующих газочапельных и газовых смесей в экспериментах по воспламенению метанола / В.А. Волков, В.Ю. Гидаспов, У.Г. Пирумов, В.Ю. Стрельцов // ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 1998. – Т. 36. – №3. – С.424-434.

Поступила в редакцию 12.07.2013

Д.А. Долматов. Горіння одиноких та парних крапель рідкого палива при швидкому випаровуванні

У статті розглянуто питання впливу швидкості випаровування рідкого вуглеводневого палива та взаємного впливу близько розташованих краплин на процеси горіння та утворення шкідливих речовин. Проведено числове моделювання фізико-хімічних процесів у при поверхневому шару краплини і в багатій залишковими паливними радикалами зоні між двома краплинами, що випаровуються, при високій деталізації кінетичної схеми горіння. Виповнено порівняльний аналіз впливу початкового діаметру та розташування краплин на процеси оксидації, оцінено вклад співвідношення швидкостей випаровування та окислення у генерацію оксидів азоту.

Ключові слова: випаровування палива, вуглеводневий радикал, поверхня краплини, інтенсивність реакцій, коефіцієнт співвідношення швидкостей

D.A. Dolmatov. Combustion of single and twin liquid fuel droplet during fast evaporation

The article contains analysis of liquid hydrocarbon evaporation speed and reciprocal position of close situated droplets influence on combustion process and NOx generation. There was completed the numerical modeling of close-to-surface layer and enriched by free hydrocarbon radicals zone between droplet, the physical chemistry of combustion processes with detailed kinetic scheme has been investigated. The dependence of oxidation processes from initial diameter and droplet mutual position is researched. There also was evaluated the links between NOx generation and evaporation/reaction speed.

Key words: fuel evaporation, hydrocarbon radical, droplet surface, reaction activity, speed ratio coefficient