

ным концентрациям NO в области их активного образования, но более позднее замораживание оксидов азота в уточненном механизме Зельдовича (кривая 2) существенно снижает разницу в результатах. В итоге расход NO в струе для кривой 2 составляет 100 мг/с против 108 мг/с для кривой 1. Различие между кривыми 2 и 3 объясняется влиянием впрыска воды в зону горения, при котором содержание NO в продуктах сгорания снижается с 0,87 до 0,69 г/м³, при этом расход NO в струе уменьшится до 81 мг/с.

Рис. 4 иллюстрирует зависимость результирующей концентрации NO в продуктах сгорания от различного количества воды, подаваемой в факел. С увеличением расхода воды наблюдается монотонное снижение выхода NO, хотя и с существенно меняющимся градиентом. Точка перегиба на графике, соответствующая водотопливному отношению 8—9 %, возможно, является показателем наиболее экономичного и эффективного ввода воды, но окончательные выводы можно делать только после детальных технико-экономических расчетов.

Таким образом, созданная и апробированная модель двухфазного течения горячей газовой струи в спутном потоке воздуха с подачей воды в факел может быть использована при исследованиях и оптимизации процессов сжигания газового топлива в топочных камерах энергетических установок для определения наиболее эффективных режимов подачи воды в зону горения с учетом экологических требований по снижению выбросов оксидов азота в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тачтон Д. Энергетические машины и установки, 1985, 107, 3, 118.
2. Авдеевский В. С., Пирумов У. Г., Волков Э. П. и др. // Охрана окружающей среды от выбросов энергетических установок: Межведомств. тематический сборник № 50.— М.: Моск. энерг. ин-т. 1984.
3. Кудрявцев Н. Ю., Волков Э. П. Теплоэнергетика, 1988, 4, 49.
4. Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей.— М.: Машиностроение, 1964.
5. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами/Под ред. Л. Е. Стернина.— М.: Машиностроение, 1980.
6. Прудников А. Г., Волинский М. С., Сагалович В. И. Процессы смесеобразования и горения в воздушно-реактивных двигателях.— М.: Машиностроение, 1971.
7. Резников М. И., Липов Ю. М. Паровые котлы тепловых электростанций.— М.: Энергоиздат, 1981.
8. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред.— М.: Энергоиздат, 1981.
9. Spalding D. B. GENMIX — a General Computer Program for Two-Dimensional Parabolic Phenomena.— Oxford: Pergamon Press, 1978.
10. Устименко Б. П., Джакупов К. В., Кроль В. О. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах.— Алма-Ата: Наука, 1986.

г. Москва

Поступила в редакцию 14/X 1988

УДК 614.841.12

Ю. Н. Шебеко, С. Г. Цариченко, О. Я. Еременко,
В. Д. Келлер, А. В. Трунев

ГОРЕНИЕ БЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОТОКЕ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ

Внимание многих исследователей привлекают вопросы, связанные с распространением пламени по двухфазным средам, состоящим из газовой горючей смеси с распределенными равномерно в ней частицами твердого или жидкого негорючего вещества. В работе [1] изучено огнепреграждающее действие кипящего слоя твердых инертных частиц. В [2]

© 1990 Шебеко Ю. Н., Цариченко С. Г., Еременко О. Я., Келлер В. Д., Трунев А. В.

показана принципиальная возможность интенсификации процессов горения за счет многоточечного зажигания газовой смеси твердыми частицами, нагреваемыми излучением пламени. Эффект ускорения пламени в метановоздушной смеси при движении через нее легких песчинок выявлен в [3], а в [4] обнаружено существенное ускорение пламени вплоть до перехода в детонацию в водородно-воздушных смесях при орошении их крупнодисперсной распыленной водой. В последних двух случаях наблюдаемые эффекты обусловлены, вероятно, турбулизацией горючей смеси движущимися через нее инертными частицами. Однако детальных исследований упомянутого явления не проведено.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению распространения пламени в бедных водородно-воздушных смесях при воздействии на них распыленной крупнодисперсной воды для различных размеров капель и интенсивностей орошения.

Опыты проводили на экспериментальном стенде с вертикальным сосудом объемом 20 м³ (высота 5,5, диаметр 2,2 м), рассчитанным на давление $p = 1$ МПа. Газовую смесь готовили путем напуска в предварительно вакуумированный реакционный сосуд воздуха до атмосферного давления и определенного количества водорода из вспомогательного сосуда известного объема с дальнейшим перемешиванием образующейся смеси. Как показали предварительные измерения с помощью термокаталитических датчиков концентраций, достигалась достаточно высокая однородность распределения водорода по объему (разность объемных концентраций в различных точках камеры не превышала 0,5 %). Смесь зажигали в верхней части сосуда высоковольтной электрической дугой (для случая отсутствия орошения) или пережиганием тонкой проволоочки электрическим током (как с орошением, так и без него). Давление в сосуде при распространении пламени регистрировали датчиком давления Сапфир-22 с записью на светолучевой осциллограф. После каждого опыта продукты сгорания удаляли путем вакуумирования реакционного сосуда. Полноту выгорания водорода η оценивали по выражению

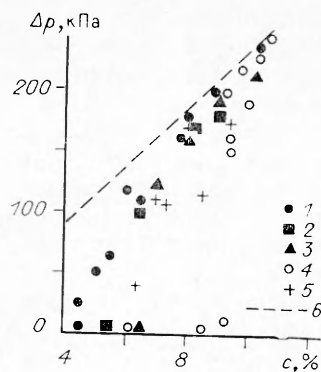
$$\eta = \Delta p / \Delta p_T,$$

где Δp — измеренное максимальное приращение давления в сосуде при сгорании водорода; Δp_T — рассчитанное термодинамически избыточное давление взрыва. В предварительных экспериментах по определению остаточной концентрации Н₂ термокаталитическими датчиками найдено, что указанное соотношение достаточно точно описывает полноту выгорания при сравнении с результатами прямых измерений остаточного содержания Н₂ после горения.

Распыленную воду получали с помощью распылителей трех видов, расположенных по оси сосуда в его верхней части. Параметры распыленной воды в сосуде приведены в таблице. Расход воды, диаметр капель, скорость падения для распылителей 2 и 3 рассчитаны, для распылителя 1 найдены экспериментально. При использовании распылителей 1 и 2 вода относительно равномерно распределена в объеме сосуда, а для распылителя 3 сосредоточена в конусе, имеющем диаметр основания на нижнем днище сосуда ~1,5 м.

В соответствии с результатами [5] при горении в камере большого объема бедных водородно-воздушных смесей с объемной концентраци-

Номер распылителя	Перепад давления, МПа	Расход воды, кг/с	Средний диаметр капель, мм	Средняя скорость падения капель, м/с	Массовая концентрация воды, г/м ³	Средняя удельная поверхность воды, м ² /м ³
1	0,1	2,8	1,2	10	70	0,36
2	0,44	0,36	0,6	4	30	0,25
3	0,44	0,073	0,4	2	10	0,19



Зависимость избыточного давления взрыва от концентрации водорода при различных условиях орошения распыленной водой.

1—3 — распылители; 4, 5 — без орошения при инициировании горения пережиганием проволоочки (5) и электрической дугой (4); 6 — результаты термодинамического расчета.

ей H_2 , $c < 8\%$ степень выгорания горючего газа $\eta \approx 0$ и повышения давления в сосуде (в пределах ошибки эксперимента) не наблюдается. Это связано с пузырьковым характером распространения пламени, обусловленным эффектом избирательной диффузии. Однако в условиях орошения распыленной водой избыточное давление взрыва и полнота выгорания отличны от нуля, достигая при $c \approx 6\%$ значений, близких к единице.

Вероятно, описанный эффект обусловлен турбулизацией горючей смеси перед фронтом пламени падающими каплями. Действительно, характерная величина числа Рейнольдса ($Re \approx 10^3$) для капель, генерируемых распылителем 1, соответствует турбулентному характеру движения газовой среды вблизи капли. В то же время, как показано в [6], турбулизация бедных водородно-воздушных смесей с $c = 4 \div 8\%$ приводит к повышению η , в результате чего давление взрыва отлично от нуля. Это качественно объясняет наблюдаемый эффект. Флегматизирующее влияние паров воды не сказывается, поскольку, по нашим оценкам, крупные капли, исследованные в настоящей работе, не успевают испариться в узком фронте пламени.

Для проверки гипотезы о влиянии турбулизации газовой смеси на полноту ее выгорания проведены эксперименты с распылителями 2 и 3. Результаты показаны на рисунке вместе с данными для распылителя 1. Видно, что в случае использования распылителей 2 и 3 уменьшается избыточное давление взрыва (т. е. снижается и полнота выгорания) бедных водородно-воздушных смесей. Одним из вероятных объяснений наблюдаемого эффекта может быть уменьшение числа Re для отдельно взятой падающей капли (от 800 до 150 и 40), что согласуется с описанным выше представлением о повышении полноты выгорания смеси за счет турбулизации каплями воды. Аналогичные качественные представления развиты в работе [3] для объяснения эффекта ускорения пламени при его распространении в метановоздушной смеси под воздействием падающих песчинок.

Обращает на себя внимание различие данных по избыточному давлению взрыва, полученных без орошения с различными источниками инициирования. При инициировании горения пережиганием проволоочки избыточное давление взрыва и полнота выгорания существенно выше, чем в случае инициирования дугой, что обусловлено образованием в первом случае более турбулизованного фронта пламени.

Наличие орошения распыленной водой существенно сказывается на длительности импульса давления при сгорании водородно-воздушных смесей в сосуде. Так, при орошении водой, полученной от распылителя 1, полная длительность импульса давления τ в 2—3 раза ниже, чем в случае отсутствия орошения, что обусловлено испарением жидкости в продуктах сгорания. С уменьшением объемной концентрации воды при переходе от распылителя 1 к распылителям 2 и 3 величина эффекта убывает (значение τ в 2,0 и 1,2 раза ниже, чем без орошения).

Рассмотренный эффект обусловлен тем обстоятельством, что крупные капли воды не успевают существенно испариться в тонком фронте

пламени и проникают в горячие продукты сгорания, занимающие достаточно большой объем. Их испарение приводит к снижению температуры продуктов и соответствующему уменьшению давления в сосуде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюльпин А. Д., Глинкин М. А., Савицкий Л. М. // Проблемы охраны труда: Тез. докл. V науч. конф., 1986.
2. Moore S. R., Weiberg F. R. Proc. Roy. Soc. Lond., 1983, A385, 1789, 373.
3. Bulewics E. M., Kucherowics B. J. Polak Comb. and Flame, 1987, 70, 2, 127.
4. Thomas G. O., Edwards M. Y., Edwards D. H. Euromech 208: Book of Abstracts.— Göttingen: Max — Planck Inst., 1986.
5. Furno A. L., Cook E. B., Kuchta J. M. et al. // 13th Symp. (Intern.) on Comb.— Pittsburgh: The Comb. Inst., 1971.
6. Kumar R. K., Tamm H., Harrison W. C. Comb. Sci. Technol., 1983, 33, 2/4, 167.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 5/IV 1989

УДК 541.124

М. А. Гороховский, А. М. Саламатин

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ К ВАРИАЦИИ ВХОДНЫХ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При воспламенении жидких углеводородных топлив наряду с физическими процессами (распыл, испарение, смешение с воздухом) развиваются химические явления, связанные с образованием свободных радикалов при термическом разложении молекул [1—12]. В свою очередь, радикалы порождают цепной процесс, приводящий к взрывному тепловыделению в горючей смеси. Физические и химические процессы при воспламенении углеводородного топлива протекают параллельно, даже во время испарения в парах топлива и жидких каплях могут идти реакции окисления [1]. В [3] иллюстрируется развитие воспламенения от появления свечения до распространения пламени по всему объему дизельного впрыска. Показано, что процессы, управляемые химической кинетикой, связаны с горением предварительно перемешанной смеси, степень влияния химических реакций отражает степень гомогенизации предварительно гетерогенной системы.

В экспериментах [4, 5] отмечено, что при начальной температуре $T_0 < 750$ К время задержки воспламенения τ контролируется химической кинетикой. Одновременно существуют ситуации, когда физические явления определяют τ . Например, в случае большой T_0 изменяется механизм воспламенения. К моменту появления свечения смесь не успевает сформироваться, а пламя не может охватить весь объем впрыска пока не организуется диффузионный факел. Таким образом, при высокой T_0 период задержки воспламенения контролируется уже физическими процессами, и доминирующим фактором становится смешение [5, 7].

В настоящей работе процессы воспламенения моделируются в гомогенной предварительно перемешанной газовой смеси, т. е. предполагается, что воспламенение определяется химической кинетикой.

Существуют различные способы управления рабочим процессом в дизельных двигателях. Традиционно к ним относятся изменения давления в цилиндре, начальной температуры воздуха, состава топлива и стехиометрии воздушно-топливной смеси. Кроме того, используются промотирующие добавки для воздействия на эффективность рабочего процесса (присутствие ускоряющих веществ равносильно введению в камеру сго-