

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИМСЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Н. И. Майоров, И. К. Федосеева

(Москва)

Разработка новых методов сжигания топлив, особенно низкокалорийных, обеспечивающих увеличение скорости их выгорания, представляет большой практический интерес. Из опыта сжигания быстрогорящих топливно-кислородных смесей известно, что горение интенсифицируется, если перед фронтом пламени формируется ударная волна (УВ).

При горении низкокалорийных горючих смесей УВ не образуются, но их можно ввести извне, например из форкамеры, наполненной быстрогорящей топливно-кислородной смесью.

В настоящей работе описаны эксперименты, проведенные в форкамере [1], позволяющей воспламенить топливную смесь фронтом пламени, распространяющимся за УВ, генерируемой в форкамере. При этом УВ, вышедшая в камеру сгорания, приводит в движение, сжимает и прогревает находящуюся в ней смесь, в силу чего условия ее воспламенения и сгорания улучшаются. Фронт пламени, выходящий из форкамеры вслед за УВ, поджигает уже предварительно подготовленную смесь.

Форкамера длиной $l = 175$ и диаметром $d = 1,5 \div 8$ мм выполнена в виде полузамкнутого патрубка, у закрытого конца которого расположена свеча зажигания, а открытый ее конец соединен с рабочей камерой сгорания через диафрагму, выдерживающую перепад давлений в 0,15 МПа. Длину и диаметр форкамеры выбирали так, чтобы при сгорании в ней топливно-кислородной смеси до момента выхода пламени в основную камеру перед ним успела бы сформироваться УВ.

Камера сгорания — это канал квадратного сечения 36×36 с $l = 470$ мм, в переднюю и заднюю стенки которого вмонтированы оптические стекла, позволяющие просматривать все сечение на длине 200 мм. Форкамеру помещали у одного конца канала, а затем у другого, и при достаточной хорошей воспроизводимости можно составить представление о протекании процесса по всей длине камеры. Опыты проводили как в замкнутой, так и в полузамкнутой камере. В качестве горючей смеси использовали стехиометрические водородно- и метано-кислородную смеси в форкамере и метано-воздушную с 7% CH_4 в основной. Начальное давление в форкамере в большинстве случаев $p_0 = 0,1$ МПа, а в основной камере $p_0 = 0,1$ МПа = const.

Распространение пламени визуализировали методом Тенлера и фотографировали. Для визуализации движения газа перед фронтом пламени использовали тепловые метки, созданные искусственно. О скорости газа судили также по перемещению поверхности контактного разрыва, возникающей при распаде произвольного разрыва при переходе УВ из рабочей камеры в атмосферу. Опыты показали, что при использовании форкамеры с $d = 1,5$ мм смесь в канале не поджигалась. Надежное воспламенение рабочей смеси наблюдалось только при увеличении выходного отверстия до 4 мм. В связи с этим во всех остальных опытах форкамеры имели диаметры 4, 6 и 8 мм.

Типичная теплорограмма (временная развертка) начальной стадии исследуемого процесса приведена на рис. 1 (1—4 — соответственно УВ, волна разрежения, фронт пламени и тепловые неоднородности). Ударная волна, сформированная в форкамере с $d = 4$ мм, заполненной смесью $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, выходя в канал, уменьшает скорость распространения до 390 м/с. Вслед за УВ из форкамеры выходит фронт пламени и поджигает смесь. Скорость его распространения по мере удаления от форкамеры также постепенно уменьшается, на расстоянии 15—18 см она становится постоянной: $v = 30$ м/с.

Распределение скорости газа между УВ и фронтом пламени на данной стадии, полученное для двух моментов времени по перемещению

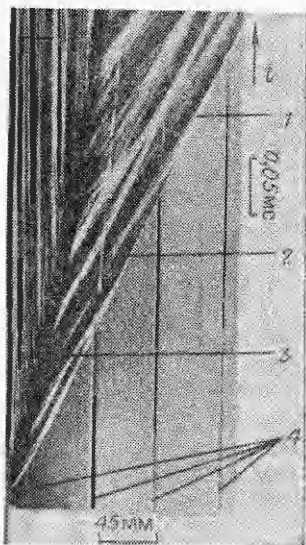


Рис. 1.

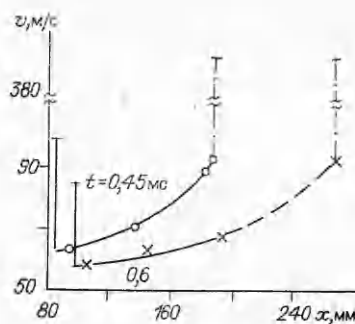


Рис. 2.

тепловых меток, приведено на рис. 2. На оси абсцисс отложено расстояние от форкамеры, на оси ординат — скорость. Вертикальными линиями отмечены положения фронта пламени (сплошная) и УВ (штрихпунктирная). Горизонтальные линии проведены на уровнях, соответствующих скоростям пламени и УВ в те

же моменты времени. Кривые 1, 2 характеризуют измеренные значения скоростей газа. Скорость газа непосредственно за УВ получена расчетным путем. Участки кривых, на которых не проводили измерений, обозначены штриховыми линиями. Как видно из рис. 2, скорость газа перед фронтом пламени составляет несколько десятков метров в секунду, что и обуславливает достаточно высокую скорость распространения фронта пламени (при искровом зажигании в смеси того же состава $v = 2,3$ м/с).

Скорость распространения пламени зависит, при прочих равных условиях, от диаметра форкамеры. При его увеличении до 8 мм она возрастает практически по линейному закону примерно в 4,5 раза. Управлять скоростью распространения пламени в канале можно не только изменением d , но и варьируя начальное давление и состав горючей смеси в форкамере. Использование в форкамере водородно-кислородной смеси при $p_0 = 0,04$ МПа снижает скорость распространения пламени в рабочей камере до $v = 18$ м/с. Замена же водородно-кислородной смеси на метано-кислородную при $p_0 = 0,1$ МПа увеличивает v до 70 м/с.

Протекание начальной стадии рассматриваемого процесса не зависит от граничных условий на «холодном» конце рабочей камеры. Различие становится заметным после взаимодействия фронта пламени с волнами, отраженными от него. Отражение волн от закрытого конца камеры происходит без изменения знака, а от открытого конца — с переменной знака: например, волна сжатия отражается как волна разрежения.

При взаимодействии УВ, отраженной от торца камеры, с фронтом пламени, распространяющимся ей навстречу, пламя отбрасывается назад, что увеличивает время, необходимое для сгорания всей смеси. Отброс пламени и связанное с ним время полного сгорания смеси тем больше, чем выше интенсивность первой УВ I . Это обстоятельство следует учитывать при выборе оптимальной величины I , обеспечивающей сгорание за минимальное время. Если же навстречу фронту пламени распространяется волна разрежения, то при их взаимодействии увеличивается скорость газа в направлении распространения пламени.

На временной развертке (рис. 3) зарегистрировано взаимодействие комплекса волн сжатия 1 и разрежения 2 с фронтом пламени 3, распространяющимся в полузамкнутой камере для случая, когда в форкамере ($d = 4$ мм) сгорает метано-кислородная смесь. В результате этого взаимодействия скорость распространения пламени возрастает.

Увеличение v при этом связано с ростом скорости свежего газа перед пламенем. Визуальные наблюдения движения газа показали, что по мере приближения пламени к открытому концу камеры темп роста



Рис. 3.

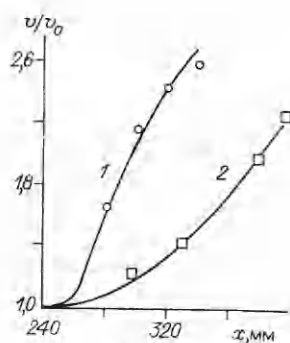


Рис. 4.

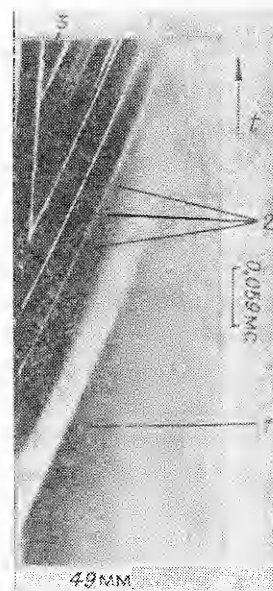


Рис. 5.

скорости повышается. Кривые, приведенные на рис. 4, характеризуют относительное изменение скорости распространения пламени v/v_0 (v_0 — скорость равномерного распространения пламени до момента его взаимодействия с отраженными волнами) в основной камере для случаев сгорания в форкамере метано- (кривая 1) и водородно-кислородной (2) смесей соответственно. Большее увеличение v при сгорании в форкамере метано-кислородной смеси, по-видимому, связано с тем, что скорость первой УВ, выходящей из нее и распространяющейся по каналу, примерно в 1,1—1,2 раза выше, чем при горении водородно-кислородной смеси. Возможность увеличения скорости сгорания смеси за счет воспламенения ее фронтом пламени, выходящим вслед за УВ из форкамеры, может быть использована в камерах импульсной очистки, поскольку мощность выхлопа пропорциональна скорости горения.

На рис. 5 представлена теплереограмма, характеризующая выход ударной волны 1 и следующих за ней волн сжатия 2 в атмосферу. Истечение продуктов реакции начинается через 5 мс после выхода УВ. На расстоянии 10 см от открытого конца канала скорость ударной волны составляет 357 м/с, скорость газа, определенная по перемещению поверхности контактного разрыва, 3—25 м/с, скорость истечения продуктов реакции — 88 м/с. Значения этих параметров, определяющих мощность выхлопа камеры в атмосферу, можно легко варьировать за счет изменения, например, d .

Интенсивность ударной волны при изменении диаметра форкамеры от 4 до 8 мм возрастает от $M = 1,08$ до 1,18 (M — число Маха волны), скорость газа, вытекающего из рабочей камеры в атмосферу, на расстоянии 10 см от открытого конца камеры \sim в 4,7 раза. По мере роста I и скорости газа перед фронтом пламени возрастает и скорость выхода продуктов реакции в атмосферу. Все вместе взятое приводит к повышению мощности выхлопа в целом.

Таким образом, из приведенного экспериментального материала следует, что воспламенение топливной смеси фронтом пламени, выходящим из форкамеры вслед за сформированной в ней УВ, является надежным средством интенсификации процесса сгорания горючих смесей и может быть использовано в различных топливно-сжигающих устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саламандра Г. Д., Майоров Н. И., Федосеева И. К. БИ, 1983, 4.
2. Подьмов В. Н. Химическое и нефтяное машиностроение. № 6.— М.: ЦНТИхимпештетмаш, 1982.

Поступила в редакцию 8/VII 1986,
после доработки — 30/IX 1986