

ВЛИЯНИЕ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА НА ПРОЦЕСС САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ СТУКА В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СМЕСИ

Т. Ихара, Т. Танака, К. Вакаи

Университет г. Гифу, инженерный факультет, 1-1 Янагидо Гифу, Япония, ihara@gifu-u.ac.jp

На установке адиабатического сжатия проведено экспериментальное исследование влияния степени неомогенности смеси и октанового числа на процесс самовоспламенения и явление стука в стратифицированных смесях воздуха с топливами (*n*-гептан, изооктан, *n*-гексан и *n*-пентан), которые отличаются октановыми числами (0, 100, 25 и 62 соответственно). В нижней части экспериментального сосуда создавалась более богатая топливом смесь. В горизонтальном направлении градиент концентрации топлива отсутствовал. Результаты экспериментов показали, что быстрое сгорание смеси вызвано не распространением пламени, а последовательным послойным самовоспламенением. Несмотря на то, что периоды индукции самовоспламенения стратифицированной смеси не зависят от градиента концентрации топлива в смеси, они постоянны при постоянном среднем эквивалентном отношении и сокращаются с его уменьшением. Начиная с определенного значения градиента интенсивность стука уменьшается с ростом градиента для всех исследованных топлив независимо от их октанового числа.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, самовоспламенение, интенсивность стука, период индукции, октановое число, стратифицированные смеси.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время от автомобильных двигателей требуется более высокая эффективность и меньшее количество вредных выбросов. Поэтому двигатели с самовоспламенением от сжатия гомогенных смесей (ССГС) постоянно совершенствуются. Однако условия зажигания в двигателях с ССГС строго определены. Кроме того, при использовании более высоких значений эквивалентного отношения (коэффициента избытка топлива) для увеличения коэффициента полезного действия возникает явление стука, аналогичное стуку в бензиновых двигателях с искровым зажиганием [1]. Поэтому двигатели с ССГС не способны работать при этих условиях. Предполагается, что для предотвращения стука и влияния на условия самовоспламенения будут использоваться стратифицированные смеси: наличие градиента концентрации топлива, когда смеси у стенок беднее, чем в центре сосуда, может предотвратить возникновение стука, подобно тому, как это происходит в бензиновых двигателях с неомогенными смесями [2].

Цель работы — проведение экспериментов по самовоспламенению стратифицирован-

ных смесей для того, чтобы исследовать механизм появления стука и влияние градиента концентрации топлива и октанового числа на самовоспламенение и интенсивность стука.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

На рис. 1 показаны основная часть установки адиабатического сжатия (УАС) и оптическая система для получения прямых изображений процесса самовоспламенения и горения смеси в сосуде [3]. Диаметр экспериментального сосуда 65 мм. Степень сжатия контролировалась в соответствии с типом топлива. Для *n*-гептана она равнялась 10.5. Начальная температура 300 К, начальное давление 0.1 МПа. Высокоскоростная видеокамера (Kodak HS4540) и система усиления изображения располагались перед сосудом так, чтобы можно было получить прямое изображение процесса горения вдоль оси цилиндра. Внутри сосуда устанавливался датчик давления (Kyowa Electronic Instruments, PE-100KJ).

Жидкое топливо инжесктировалось в нижнюю часть камеры с помощью шприца и иглы, изогнутый конец которой направлен вдоль оси камеры. Инжесктированное топливо направлялось горизонтально в сторону окна камеры и однородно разбрызгивалось по нижней части цилиндра. Какое-то время оно испарялось. Та-

Т. Ihara, Т. Tanaka, К. Wakai.

Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido Gifu Japan.

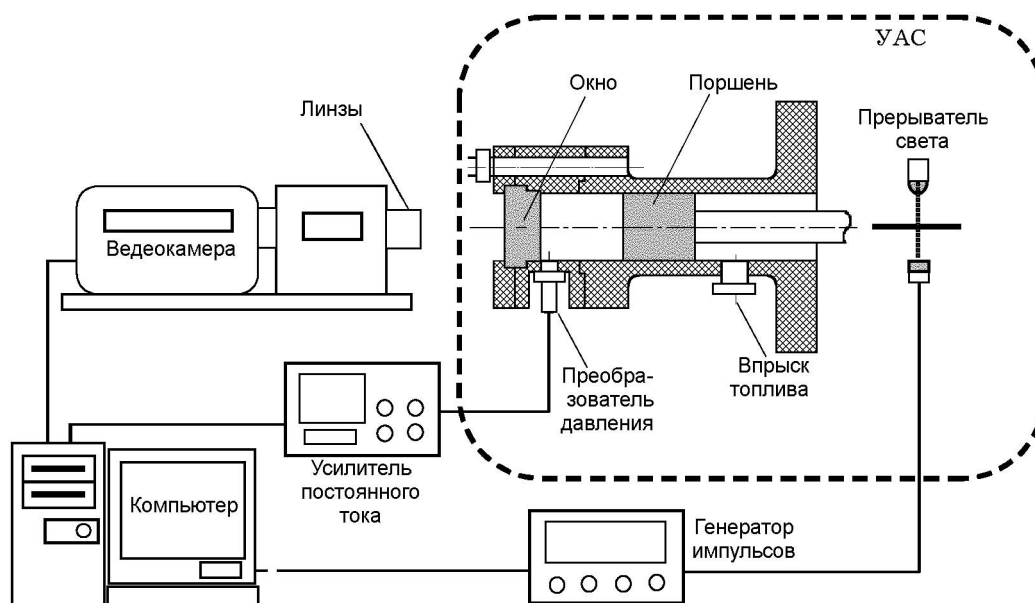


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ким образом, в нижней части камеры образовывалась более богатая смесь. Взаимосвязь между градиентом концентрации и временем выдержки смеси после инъекции находилась заранее с помощью инфракрасного абсорбционного метода. Луч гелий-неонового лазера (длина волны 3.39 мкм) пропускаться через реактор с двумя кварцевыми окнами на торцах, затем прошедший пучок детектировался на противоположной стороне инфракрасной камерой (Nikon LAIRD-S270A). Изменение концентрации топлива во времени определялось в соответствии с законом Ламберта — Бера. Для прозрачной акриловой прямоугольной камеры с помощью оптической шпирен-системы было установлено, что при таком способе подачи топлива градиент концентрации в горизонтальном направлении отсутствует. Разность между эквивалентными отношениями ϕ в нижней и верхней частях камеры характеризовала градиент концентрации $\Delta\phi$ и зависела от времени испарения. Среднее значение эквивалентного отношения ϕ варьировалось от 0.6 до 1.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прямые фотографии

На рис. 2 приведены прямые фотографии и зависимости давления от времени, которые разделены на низкочастотную (p) и высокочастотную (p_f) компоненты.

Время t отсчитывалось от момента завершения сжатия. Рис. 2,а соответствует случаю $\phi = 1.0$ и $\Delta\phi = 1.1$. В момент времени, когда давление p начинало быстро расти ($t = 54.22$ мс), появлялось слабое свечение пламени в верхней части камеры. Вслед за ним возникало более яркое свечение, распространяющееся сверху вниз со средней скоростью ≈ 53 м/с.

На рис. 2,б приведены результаты, полученные при $\phi = 0.8$ и $\Delta\phi = 1.1$. В этом случае смесь беднее, но значение градиента концентрации то же самое, что на рис. 2,а. Слабое свечение пламени появлялось сначала в верхней части сосуда, а затем в центральной ($t = 38.42 \div 40.64$ мс), при этом давление p росло незначительно. Более яркое свечение пламени возникало в центре или, скорее, немного ниже и распространялось вниз и вверх ($t = 40.86$ и 40.97 мс). Одновременно с ним появлялись высокочастотные колебания давления p_f . В этом случае пламя распространялось вверх со скоростью 22 м/с, а вниз — со скоростью 50 м/с. Для других значений ϕ и $\Delta\phi$, исследованных в этой работе, скорость распространения более яркого свечения пламени изменялась в диапазоне $20 \div 80$ м/с, что существенно больше нормальных скоростей распространения пламени по однородной смеси, оцененных при тех же условиях.

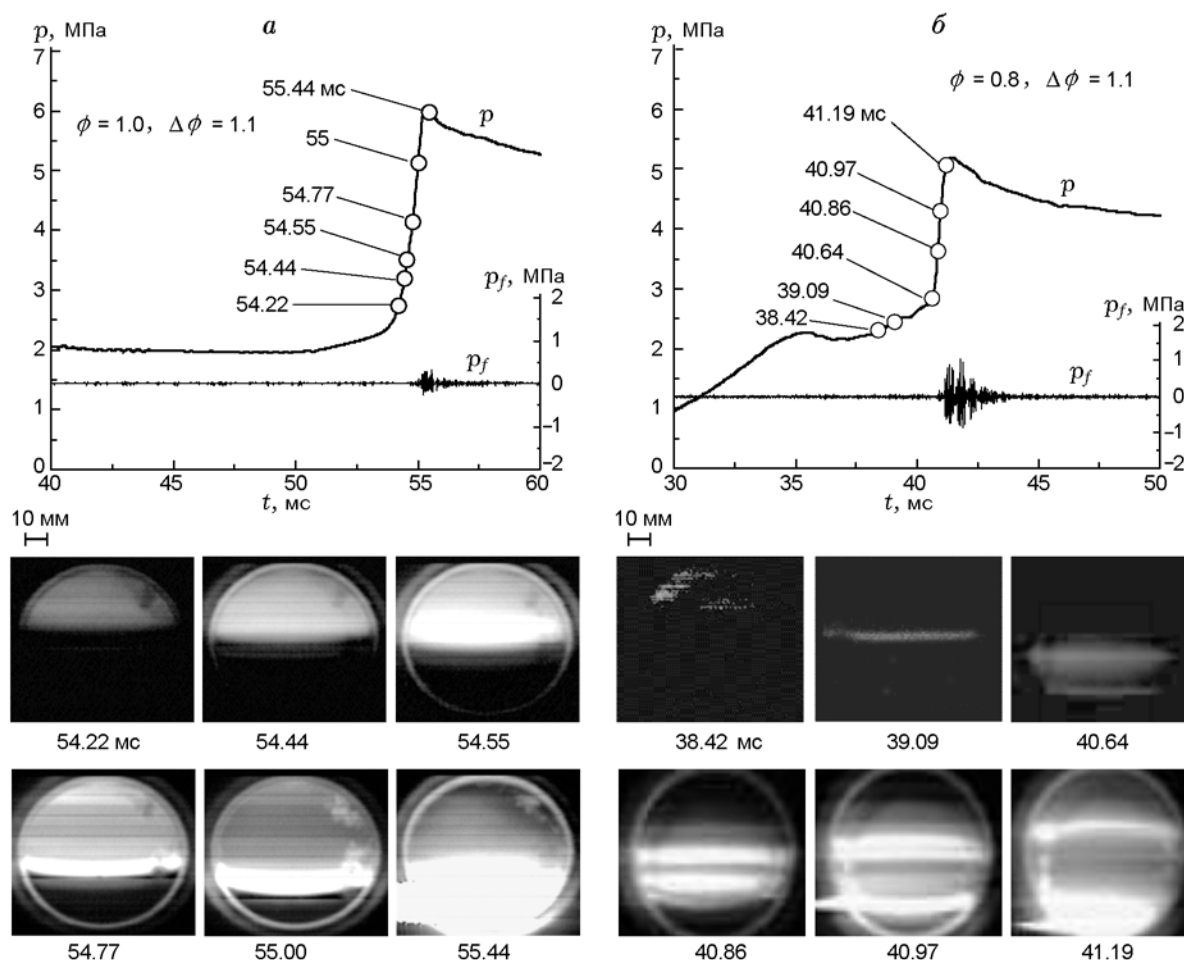


Рис. 2. Записи давление — время и прямые фотографии

Периоды индукции

Период индукции определялся в двух вариантах: τ_1 — промежуток времени между концом сжатия и моментом, когда начинает увеличиваться значение $p - p_i$, где p_i — давление в конце сжатия; τ — время от конца сжатия до момента, когда давление p достигает 20 % от максимального повышения давления.

На рис. 3 представлены зависимости периодов индукции τ , τ_1 от эквивалентного отношения ϕ и градиента концентрации $\Delta\phi$. Каждая точка на рисунке соответствует среднему значению результатов шести испытаний. Представлен также разброс данных от минимального до максимального значения. Видно, что период индукции гомогенной смеси τ_1 увеличивается с ростом эквивалентного отношения, в то время как период τ имеет минимум вблизи $\phi = 0.4$. Такая зависимость объясняется тем,

что температура после сжатия выше для более бедных смесей, поскольку их удельная теплоемкость ниже, а также тем, что n -гептан имеет отрицательный температурный коэффициент при температуре ≈ 700 К.

На рис. 3, б-г показаны периоды индукции для стратифицированных смесей. При $1.4 \geq \Delta\phi \geq 0.5$ для всех ϕ период индукции τ_1 почти постоянен. При $\phi = 1.0, 0.8$ и 0.6 соответственно $\tau_1 \approx 4, 2.5$ и 1.2 мс. Это объясняется тем, что τ_1 определяется наименьшим значением периода индукции, возможным в камере с негомогенной смесью. Например, в случае $\phi = 1.0$ и $\Delta\phi = 0.5$ локальное значение ϕ меняется от 0.7 до 1.2. При этом для $\phi = 0.7$ период индукции оказывается минимальным: $\tau_1 = 4$ мс. Это значение можно было бы предсказать на основе результатов для гомогенных смесей, представленных на рис. 3, а. Приведенные здесь ре-

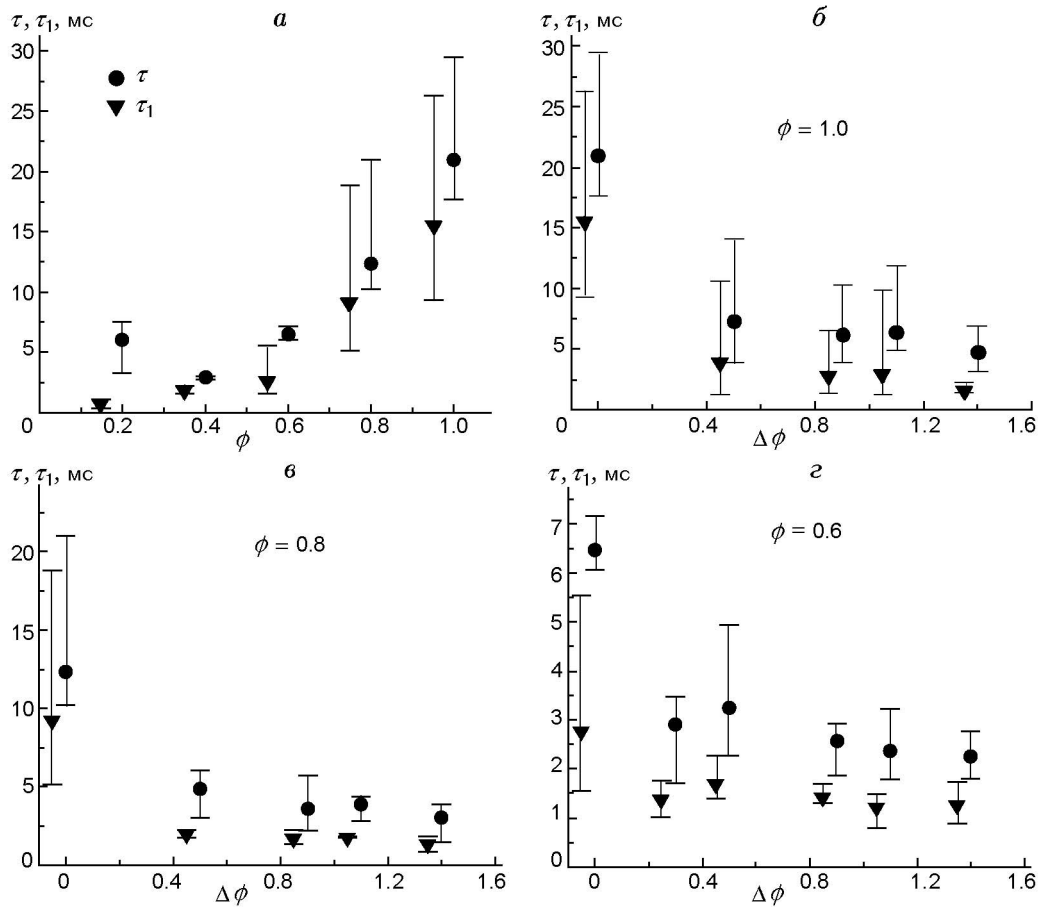


Рис. 3. Зависимость периода индукции от эквивалентного отношения ϕ для однородной (а) и стратифицированной смесей (б–г)

зультаты согласуются с периодами индукции для стратифицированных смесей. Аналогично, для других $\Delta\phi$ локальное значение ϕ , которому соответствует наименьший период τ_1 (4 мс), близко 0.5.

Скорость повышения давления и интенсивность стука

Для определения интенсивности стука и выяснения взаимосвязи между скоростью повышения давления и возникновением стука использовались две характерные величины — $\Delta p/\Delta t$ и KI . Первая представляет собой среднюю скорость повышения давления за время, в течение которого давление p возрастает от 20 до 80 % максимального давления. Величина KI определяется так же, как это делалось для стука в бензиновых двигателях [4], по формуле

$$KI = \left(\sum_n (p_f - p)^2 \right) / n, \quad (1)$$

где n — число измерений давлений.

На рис. 4 приведены результаты для однородной смеси. Как видно на рис. 4,а, $\Delta p/\Delta t$ близко к нулю и не зависит от ϕ при $\phi < 0.4$. В области $0.4 \leq \phi \leq 1.0$ значения $\Delta p/\Delta t$ увеличиваются с ростом ϕ . Изменение величины KI носит аналогичный характер (см. рис. 4,б). Подобно стуку в дизельном двигателе, скорость повышения давления может быть причиной появления стука при горении однородных смесей.

На рис. 5 представлены результаты для стратифицированной смеси. Величина $\Delta p/\Delta t$ монотонно уменьшается с ростом $\Delta\phi$. Параметр KI не изменяется при малых значениях $\Delta\phi$ и всех ϕ . При больших значениях $\Delta\phi$ величина KI уменьшается с увеличением $\Delta\phi$. На рис. 5 значение $\Delta\phi = 0$ соответствует однородной смеси. Очевидно, что параметр KI для стратифицированной смеси равен или меньше значения KI для однородной смеси. С изменением ϕ значение $\Delta\phi$, при котором возникает

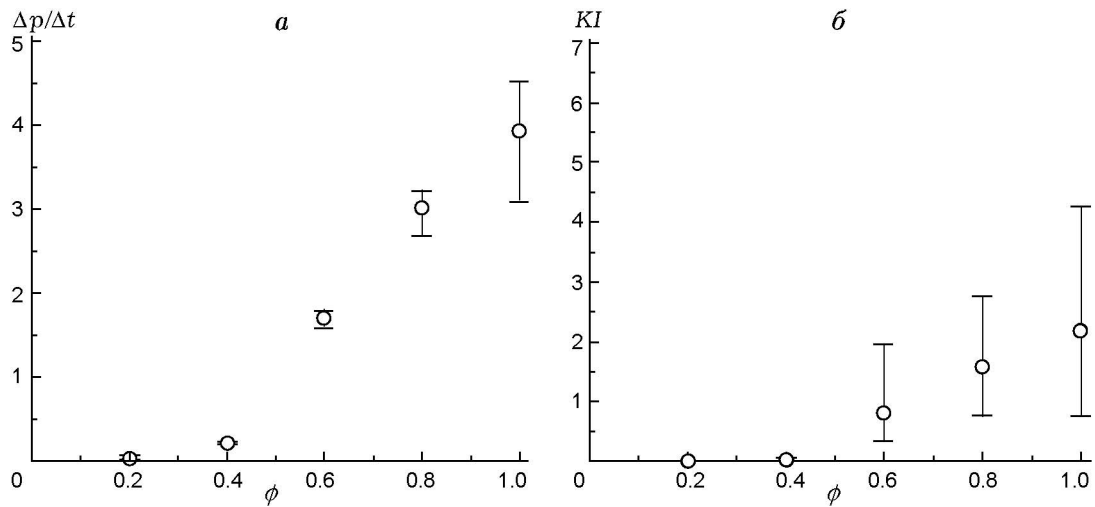


Рис. 4. Зависимости скорости повышения давления (а) и интенсивности стука (б) от эквивалентного отношения ϕ для однородных смесей

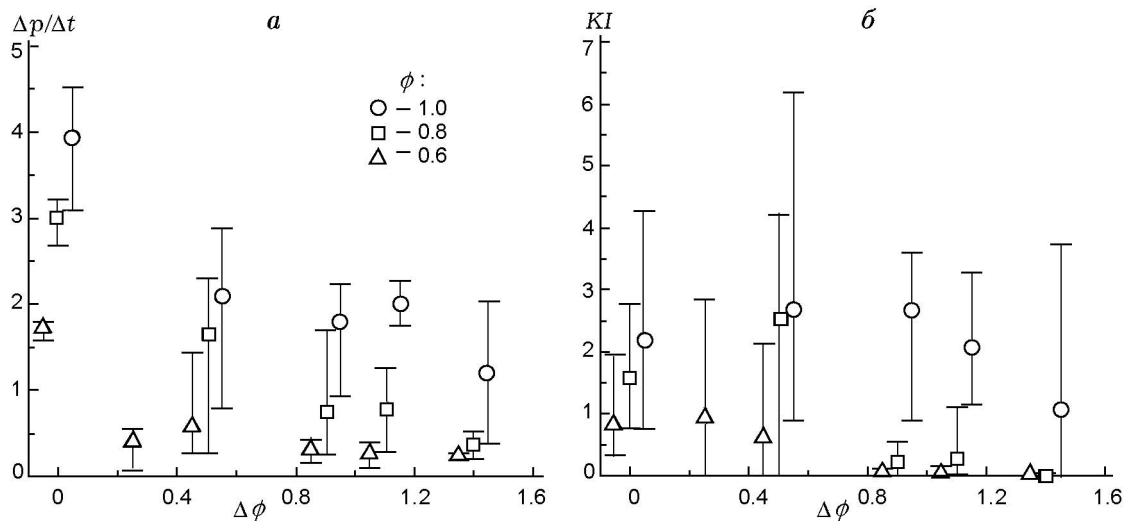


Рис. 5. Зависимости скорости повышения давления (а) и интенсивности стука (б) от эквивалентного отношения ϕ для стратифицированных смесей

стук, изменяется от $\Delta\phi = 0.3$ для $\phi = 0.6$ до $\Delta\phi = 0.9$ для $\phi = 1.0$. При одних и тех же $\Delta\phi$ чем беднее смесь, тем слабее стук.

Влияние октанового числа

Для выяснения роли октанового числа (ОЧ) при горении стратифицированных смесей использовались изооктан, *n*-пентан и *n*-гексан. Принимая во внимание, что исследование проводилось для реальных двигателей, коэффициенты сжатия подбирались так, чтобы период индукции для однородной смеси каждого топлива, эквивалентное отношение которого

Характеристики исследуемых топлив

Топливо	Октановое число	Степень сжатия	T_c , К, при ϕ		
			1.0	0.8	0.6
<i>n</i> -гептан	0	10.5	660	674	687
<i>n</i> -гексан	25	12.6	657	670	687
<i>n</i> -пентан	62	13.3	675	687	706
изооктан	100	13.3	671	685	697

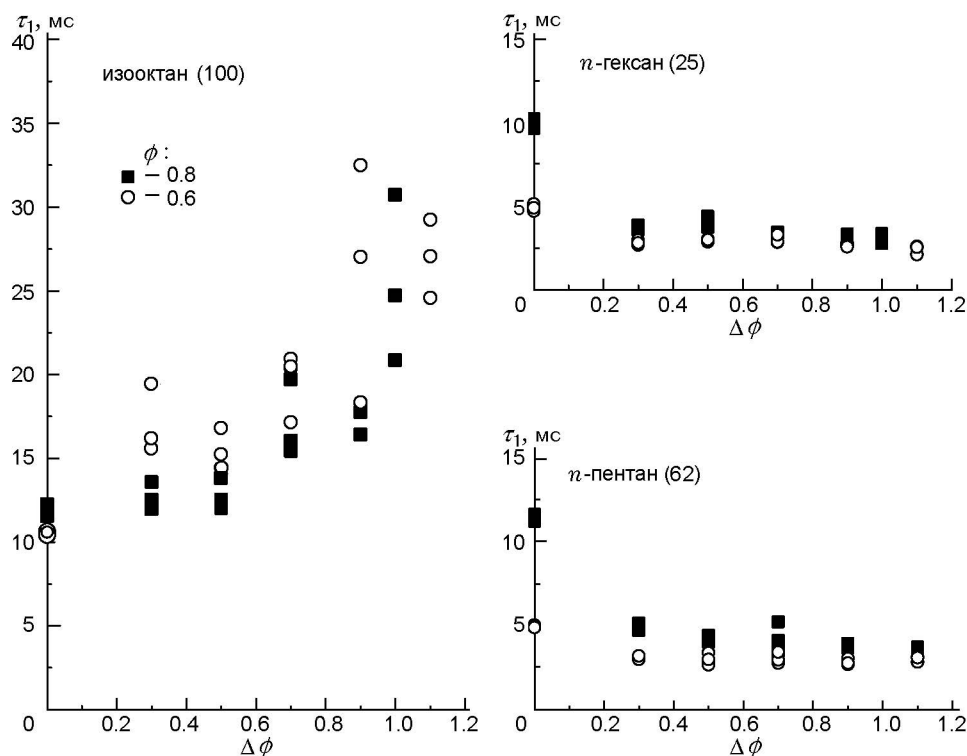


Рис. 6. Зависимость $\tau_1(\Delta\phi)$ для топлив с разным значением октанового числа

го равно 1, был бы равен периоду индукции для *n*-гептана (15 мс). Степень сжатия и температура после сжатия для каждого топлива приведены в таблице. Зависимости $\tau_1(\Delta\phi)$ для изооктана, *n*-пентана и *n*-гексана представлены на рис. 6. Величина ϕ изменялась в пределах $0.8 \div 0.6$. Для *n*-пентана (ОЧ=62) и *n*-гексана (ОЧ=25) периоды индукции не зависели от ϕ и $\Delta\phi$ и равнялись 4 мс. Этот период индукции почти такой же, как наименьшие периоды индукции для гомогенной смеси при $\phi = 0.2 \div 1.0$, и обусловлено это теми же причинами, что и в случае *n*-гептана, как упоминалось выше.

С другой стороны, для изооктана (ОЧ=100) период индукции остается постоянным в диапазоне $0 \leq \Delta\phi \leq 0.6$, а при $\Delta\phi \geq 0.6$ увеличивается с ростом $\Delta\phi$ как для $\phi = 0.8$, так и для $\phi = 0.6$. При $0 \leq \Delta\phi \leq 0.6$ наименьший период индукции локальной области превышает видимый период индукции этой смеси. При $\Delta\phi \geq 0.6$ того количества смеси, которое воспламеняется в первую очередь, недостаточно для определения периода индукции. Скорость повышения давления при этом умеренная, потому что следующая

воспламеняющаяся смесь (она беднее смеси, воспламеняющейся первой) имеет сильную зависимость периода индукции от эквивалентного отношения. В результате периоды индукции увеличиваются.

На рис. 7 представлена зависимость интенсивности стука KI от $\Delta\phi$ для топлив с различным октановым числом. В стратифицированных смесях изооктана (ОЧ=100) и *n*-гептана (ОЧ=0) стук не появляется ($KI = 0$). При $\phi = 0.8$ значение KI *n*-пентана (ОЧ=62) линейно уменьшается с увеличением $\Delta\phi$ и достигает нуля при $\Delta\phi = 1.1$. Для *n*-гексана (ОЧ=25) значение KI достигает максимума при $\Delta\phi = 0.3$ и затем сокращается до нуля при $\Delta\phi = 1.1$. При $\phi = 0.6$ *n*-пентан (ОЧ=62) имеет ту же тенденцию, что и при $\phi = 0.8$. Напротив, при ϕ , отличающемся от $\phi = 0.8$, величина KI для *n*-гексана (ОЧ=25) не имеет максимума и монотонно уменьшается до нуля при $\Delta\phi = 1.1$. Из этих результатов следует, что для всех исследованных топлив интенсивность стука в условиях стратифицированных смесей сокращается независимо от октанового числа.

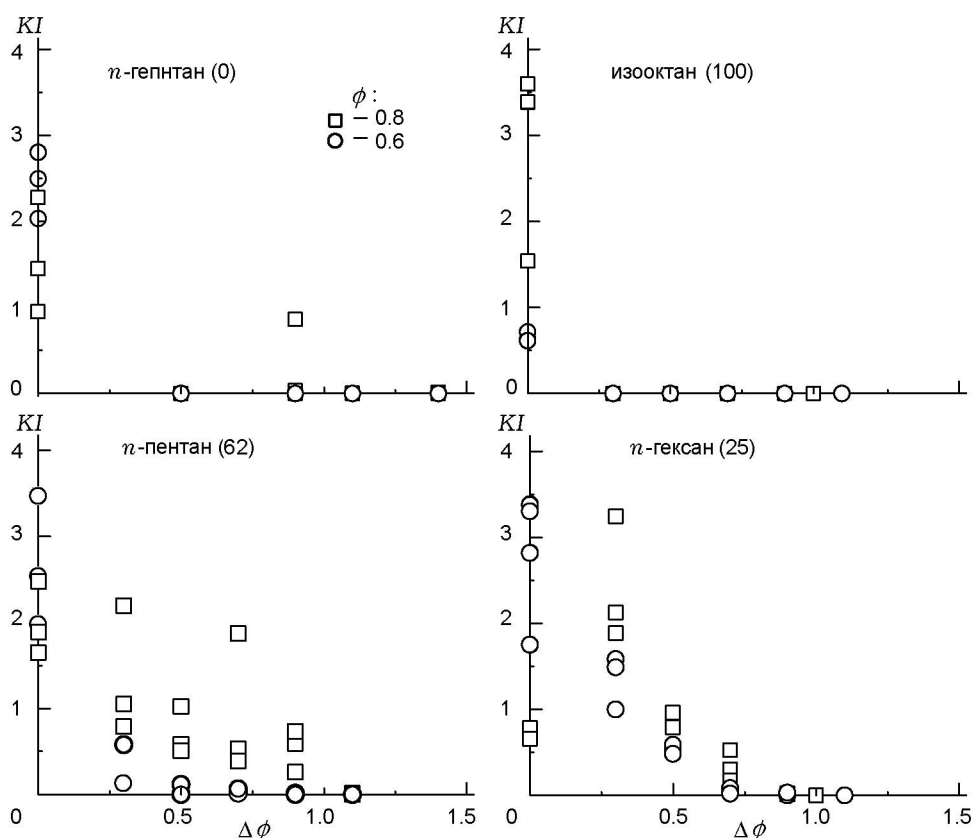


Рис. 7. Зависимость $KI(\Delta\phi)$ для стратифицированных смесей и топлив с разным значением октанового числа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально методом адиабатического сжатия исследован механизм стука и влияние градиента концентрации топлива и октанового числа в стратифицированных смесях на самовоспламенение и интенсивность стука.

Для *n*-гептана установлено:

- скорость распространения пламени в стратифицированной смеси, полученная из данных прямых изображений пламени, много больше ламинарной скорости для соответствующей смеси, что обусловлено последовательным послойным самовоспламенением;

- периоды индукции стратифицированной смеси не зависят от градиента концентрации топлива в смеси, почти постоянны для близких значений средних эквивалентных отношений и уменьшаются с уменьшением среднего эквивалентного отношения;

- скорость роста давления при горении стратифицированной смеси увеличивается с уменьшением градиента смеси при $0.4 \leq \Delta\phi \leq 1.0$;

- для гомогенных условий чем меньше среднее эквивалентное отношение, тем меньше интенсивность стука;

- при малых градиентах интенсивность стука для одинаковых средних эквивалентных соотношений аналогична интенсивности стука для гомогенных смесей. При достижении градиентом концентрации топлива определенного значения интенсивность стука становится достаточно малой.

Для других топлив получены следующие результаты:

- периоды индукции *n*-пентана и *n*-гексана ведут себя аналогично периоду индукции *n*-гептана;

- для изооктана и *n*-гептана стук не обнаруживается, за исключением случая нулевого градиента концентрации;

- для всех изученных топлив интенсивность стука уменьшается для стратифицированных смесей независимо от октанового числа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Noda T., Kubo M., Kimura S., Itoh T.** Knocking prediction by using non-dimensional engine cycle simulation with chemical kinetic model // Proc. 17th Intern. Combustion Engine Symp., Japan. — 2002. — P. 95–100.
2. **Lim O. T., Nakano H., Iida N.** The research of the effects of thermal stratification on *n*-heptane/iso-octane-air mixture HCCI combustion using a R.C.M // Proc. 2006 JSAE Annual Congress, HCCI I. — 2006. — P. 1–6.
3. **Chien X. J., Wakai K., Takahashi S., Ihara T., Shibata K.** Resistance wire CT pyrometry used to analyse the knocking problem in direct injection engines // Measurement Sci. and Technol. — 2005. — V. 16. — P. 707–715.
4. **Konig G., Sheppard C. G. W.** End gas autoignition and knock in a spark ignition engine // SAE Trans. — 1990. — 902135. — P. 820–839.

Поступила в редакцию 25/X 2008 г.
