

большое. В отличие от гипотезы [4], поток из зоны реакции меняется весь период индукции.

Величина $\Delta\xi_p$ — разница между толщинами зоны реакции в момент установления теплового равновесия на границе и моментом $\Theta_n^2/2\pi$ не равна $\sqrt{2}$, как в [4]. Частично это может быть связано с условностью определения толщины зоны реакции. Кроме того, $\Delta\xi_p$ убывает с ростом $|\Theta_n|$, например при $|\Theta_n| = 5, 10, 15$ $\Delta\xi_p = 1,0; 0,8$ и $0,68$ соответственно (см. рис. 2). При других значениях $|\Theta_n|$ картина процесса остается прежней. Наиболее хорошо сохраняются свойства достижения теплового потока из зоны реакции, значения $\sqrt{2}$ в момент $\Theta_n^2/2\pi$.

Сравнение рис. 1 и 2 дает основание сделать вывод, что в [4] качественно верно дана трактовка процесса зажигания как образования зоны СВГ. Формула для расчета τ_0 может быть представлена в виде

$$\int_{\Theta_n^2/2\pi}^{\tau_0} \left(\frac{d\xi_p}{d\tau} \right) d\tau = \Delta\xi_p.$$

Выбирая некоторое среднее $\langle d\xi_p/d\tau \rangle$, получим

$$\tau_0 = \frac{\Theta_n^2}{2\pi} + \frac{\Delta\xi_p}{\langle d\xi_p/d\tau \rangle}. \quad (4)$$

В [4] $\Delta\xi_p = \sqrt{2}$ завышено по сравнению с расчетом на ЭВМ; $d\xi_p/d\tau = \sqrt{2}/|\Theta_n| = \text{const}$ и тоже завышено по сравнению с численными результатами. В совокупности две неточности компенсируются, давая неплохое совпадение по τ_0 . Рис. 2, б свидетельствует, что расчет $\Delta\xi_p/\langle d\xi_p/d\tau \rangle$ по [4] — не асимптотический, поскольку с ростом $|\Theta_n|$ скорость движения зоны $d\xi_p/d\tau$ все больше отличается от теоретического значения $\sqrt{2}/|\Theta_n|$. Аналогичное замечание справедливо для величины $\Delta\xi_p$, характера образования реакционной зоны и других характеристик. Но поскольку с ростом $|\Theta_n|$ доля второго слагаемого в (3) уменьшается, в целом формула хорошо аппроксимирует расчетную зависимость $\tau_0(\Theta_n)$.

Авторы благодарят В. Н. Вилюнова и Е. А. Некрасова за плодотворное обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Докл. АН СССР, 1963, 150, 2, 283.
2. Буркина Р. С., Вилюнов В. Н. ПМТФ, 1976, 6, 96.
3. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. — Н.: Наука, 1984.
4. Сепляревский Б. С. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. — Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1986.

Поступила в редакцию 9/XI 1987,
после доработки — 10/III 1988

УДК 621.436 : 536

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ РАСПЫЛЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ОСОБЕННОСТИ ЕГО СГОРАНИЯ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

А. Н. Бажайкин
(Новосибирск)

Отдельные стадии дизельного процесса имитируются и изучаются в установках постоянного объема, куда подается сжатый, нагретый воздух и впрыскивается форсункой под большим давлением моторное топливо. Горение образовавшейся при впрыске топливной струи определя-

ется влиянием различных факторов и главным образом начальной температурой воздуха T_0 , при которой происходит самовоспламенение топливоздушной смеси. Исследования [1, 2] показали, что при $T_0 > 650$ К рост T_0 приводит к увеличению длительности горения струи τ_r , причем эта зависимость наблюдалась при различных давлениях, коэффициентах избытка воздуха и видах топлива (дизельное, керосин, бензин Б-70). Повышение теплового режима привело также к ухудшению показателей дизельного двигателя [3] и характеристик сгорания распыленного топлива в замкнутом объеме [4]. Конкретное выяснение причин отмеченного явления представляет актуальную проблему.

В настоящей работе исследовано влияние T_0 и структуры струи на характеристики ее воспламенения и горения в замкнутом объеме. Диагностика процесса осуществлялась с помощью высокоскоростной кино съемки и одновременной регистрации давления в камере сгорания (КС).

Эксперименты проводились в полом цилиндре (диаметр 150, высота 45 мм), ограниченном с торцов кварцевыми окнами [5]. В объем подавался сжатый ($p_0 = 3,2$ МПа) и нагретый ($T_0 = 650 \div 1000$ К) воздух и впрыскивалось дизельное топливо из штатной форсунки (В-2) закрытого типа с однодырчатым распылителем (диаметр сопла 0,3 мм). Коэффициент избытка воздуха в КС менялся в диапазоне 20—30 в зависимости от условий опытов. Закон подачи топлива соответствовал условиям дизеля и контролировался пьезодатчиком марки ЛХ-600. Изменение давления в КС при горении регистрировалось охлаждаемым пьезодатчиком ЛХ-601, а сигналы с датчиков — на двухлучевом запоминающем осциллографе С8-11. Визуальная картина горения фотографировалась кинокамерой ZL-1 со скоростью 6250 кадр/с (время экспозиции кадра 100 мкс).

Исследования топливной струи при впрыске в холодный (комнатной температуры) и нагретый воздух показали следующие ее особенности и характеристики. Холодная струя представляет собой конусообразное тело с елочной структурой в виде уложенных дискретным образом сгустков топлива [5] (рис. 1, а), причем концентрация топливного компонента в сердцевине значительно больше, чем в периферийных участках [6].

При впрыске топлива в нагретый (до температур самовоспламенения) воздух значительно изменяются форма и объем струи за счет интенсивного испарения. Визуализация процесса в ультрафиолетовых лучах показала [7], что размеры головной части струи увеличиваются в 2—3 раза и в результате получается грибообразная форма струи (рис. 1, б). Исследованиями установлено, что локальные температуры в периферийных участках испаряющейся струи на сотни градусов выше, чем в ее сердцевине. Следовательно, топливная смесь в оболочке струи находится в более благоприятных для воспламенения условиях (при наличии оптимальной концентрации топлива), чем во внутренних участках.

Кинограммы процесса давали качественную картину и количественную информацию о месторасположении очагов воспламенения, скорости распространения пламени и времени горения. Примеры типичных фрагментов кинограмм представлены на рис. 2.

Анализ результатов показал, что воспламенение происходит в одном очаге, инициирующем распространение пламени в разные стороны, преимущественно в осевом направлении. В зависимости от T_0 отмечены различия в картине воспламенения. С ростом температуры пламя появляется ближе к форсунке и быстрее охватывает объем струи, причем распространяется по ее оболочке со скоростью, изменяющейся скачкообразно, со средней частотой 3 кГц. В основной стадии горящая смесь представляет собой неоднородную по светимости совокупность чередующихся холодных и горячих зон, которые постоянно изменяются, мигрируют, появляются и исчезают. С повышением T_0 неоднородность усиливается, увеличиваются средние размеры темных и светлых зон. В за-



Рис. 1. Фотографии холодного (а) и испаряющегося (б) факела.

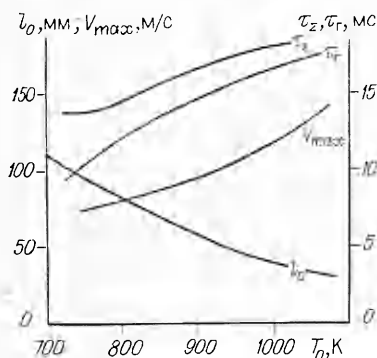


Рис. 3. Зависимости локализации очагов воспламенения, максимальной скорости распространения пламени, времени горения и суммарного времени пребывания топлива в КС от T_0 .

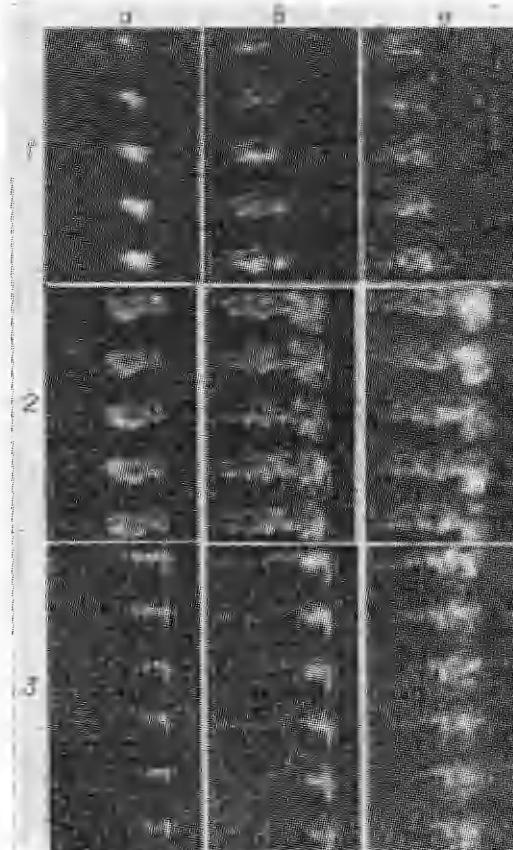


Рис. 2. Фрагменты кинограмм горящего факела при различных температурах самовоспламенения.

T_0 , К: а) 650, б) 800, в) 1000; 1 — воспламенение; 2 — середина горения; 3 — догорание.

ключительной стадии медленно догорают сердцевина и пристенные участки струи, причем с ростом T_0 увеличивается τ_r . На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость $\tau_r(T_0)$, показывающая, что повышение температуры не интенсифицирует горение, а, наоборот, затягивает его. Это обстоятельство подтверждается и при рассмотрении суммарного времени $\tau_z = \tau_i + \tau_r$ (τ_i — период задержки воспламенения, определеннй ниже) от начала подачи до полного сгорания топлива. Из рис. 3 видно, что τ_z увеличивается с ростом T_0 , несмотря на то, что при этом сокращается τ_i , т. е. ускоряются предпламенные физические процессы (испарение, смешение) и химические реакции. Следовательно, при повышении температуры воздуха в КС появляются факторы, тормозящие продуктивное сгорание смеси, особенно, как показала киносъемка, внутренних ее участков.

Кроме рассмотренных характеристик (τ_r , τ_z) на рис. 3 представлены зависимости месторасположения очагов воспламенения (l_0 — расстояние от очага до сопла форсунки) и максимальных скоростей распространения пламени (v_{max}). Кривые $l_0(T_0)$ и $v_{max}(T_0)$ подтверждают наблюдения, сделанные при анализе кинограмм рис. 2.

Влияние T_0 на качественный вид кривых давления $p(t)$ и τ_i иллюстрируется на рис. 4. Зависимости $p(t)$ совмещены по времени с давлением в топливной системе p_T и периодом впрыска топлива τ_s . При низких температурах ($T_0 = 690$ К) воспламенение происходит с относительно большой задержкой и ступенчатым подъемом давления, которое затем пульсирует (средняя частота 3 кГц) и плавно достигает мак-

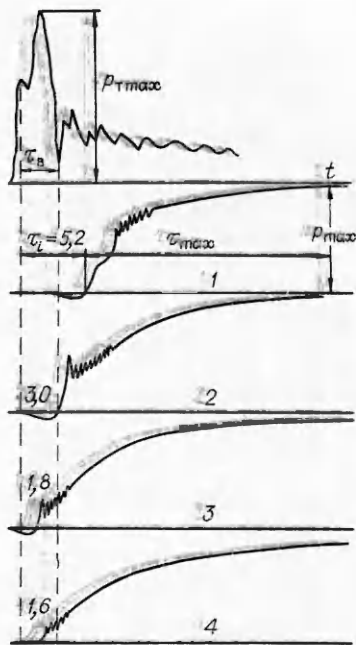


Рис. 4. Давление в топливной системе $p_r(t)$ и в камере сгорания $p(t)$ при $T_0 = 690$ (1), 750 (2), 850 (3) и 990 К (4).

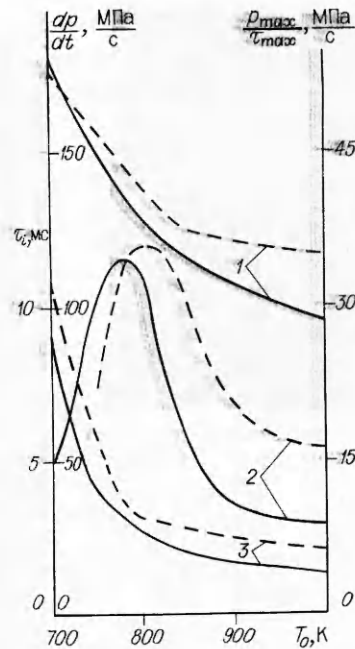


Рис. 5. Зависимости задержки воспламенения, скорости подъема давления при воспламенении и средней скорости нарастания давления от T_0 . — свободная струя; - - струя с перестроенной структурой; 1 — p_{\max}/τ_{\max} ; 2 — dp/dt ; 3 — τ_i .

симула при полном сгорании смеси. С повышением T_0 сокращается τ_i и резко интенсифицируется воспламенение, характеризуемое всплеском давления. Дальнейший рост T_0 приводит к еще более быстрому воспламенению, которое, однако, становится более вялым и идет при незавершенном впрыске топлива; менее интенсивно топливо горит и в основной стадии процесса.

Качественные наблюдения подтверждаются данными обработки осциллограмм (рис. 5), представленными в виде зависимостей τ_i , dp/dt (скорость нарастания давления при воспламенении) и p_{\max}/τ_{\max} (средняя скорость нарастания давления) от T_0 , обозначенных сплошными линиями. Кривая $\tau_i(T_0)$ идет в соответствии с известным законом $\tau_i \sim \exp(E/RT_0)$ [9] (E — энергия активации, R — газовая постоянная).

Сложным образом изменяется интенсивность начала процесса, когда сгорает часть смеси, подготовленная к воспламенению [10]. При низких температурах рост T_0 увеличивает значения dp/dt . При $T_0 > 780$ К обратная картина: воспламенение становится все более вялым и при $T_0 > 950$ К его интенсивность стабилизируется. Повышение температуры неблагоприятно сказывается и на среднем тепловыделении, которое (см. рис. 5) снижается в 2 раза в исследуемом диапазоне T_0 . Причины ухудшения сгорания струи с ростом T_0 заключаются во влиянии ее структуры на особенности воспламенения и горения. Выше отмечалось, что повышение температуры ускоряет охват пламенем оболочки струи; в то же время тепловыделение при воспламенении уменьшается (см. рис. 5, 2). Это можно объяснить утоньшением слоя, по которому распространяется пламя (см. рис. 2), и, следовательно, уменьшением массы сгорающего слоя. Если учесть, что при этом сокращается τ_i , внутренние участки смеси без достаточной предпламенной подготовки оказываются быстро охваченными пламенем, подобно скорлупе, препятствующей доступу свежего воздуха к переобогащенной топливом сердцевине струи. Кроме того, из-за малых τ_i смесь воспламеняется при незавершенном впрыске (см. рис. 4), так что жидкое топливо поступает в пламя, ока-

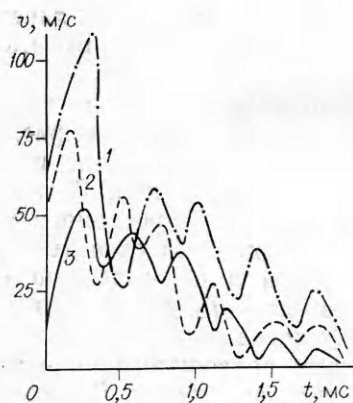


Рис. 6. Временное изменение скорости распространения пламени в осевом направлении факела.
 T_0 , К: 1 — 1040; 2 — 920; 3 — 770.

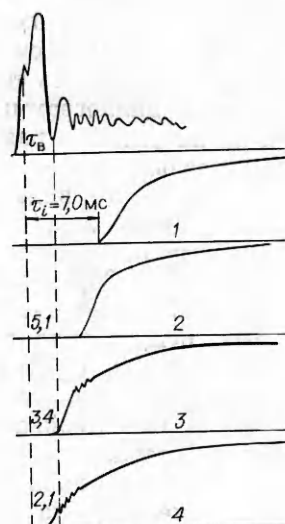


Рис. 7. Осциллограммы давления при горении факела с перестроенной структурой.
 T_0 , К: 1 — 690; 2 — 750; 3 — 850; 4 — 990.

зывая гасящее действие и ухудшая условия сгорания внутренних участков струи, что и показали кино съемки (см. рис. 2).

Описанные представления являются возможным объяснением полученных результатов и нуждаются в экспериментальных подтверждениях. Кроме того, должны быть выяснены причины зависимостей $l_0(T_0)$, скачкообразного распространения пламени, пульсации давления в КС и т. д. Для этого тщательно анализировались результаты диагностики холодной струи, в частности формирование елочной структуры (см. рис. 1, а) из сгустков топлива. Выяснено, что сгустки периодически образуются в виде выбросов материала струи в стороны от ее боковой поверхности со средней частотой 3 кГц. После возникновения выбросы движутся спутно струе, практически не смешиваясь друг с другом [7]. Можно предположить, что очаги воспламенения появляются в районе выбросов, образовавшихся в начале впрыска. С ростом T_0 эти движущиеся участки смеси воспламеняются быстрее и обнаруживаются ближе к форсунке, что и обуславливает зависимость $l_0(T_0)$ на рис. 3. Следовательно, воспламенение можно связать не с условиями в смеси в целом, а с ее локальными участками.

Из анализа результатов следовало, что скачкообразное распространение пламени, пульсации давления в КС и расположение сгустков выбросов в теле струи происходят с одинаковой частотой (3 кГц). Это позволяет предположить, что фронт пламени, изменение скорости которого $v(t)$ представлено на рис. 6, перемещается по елочной оболочке струи в соответствии с последовательностью образования выбросов. При движении пламя быстро поглощает готовые к воспламенению выбросы, что дает скачок $v(t)$ и всплеск $p(t)$ (см. рис. 4); при подходе к неподготовленным участкам пламя тормозится: зависимости $v(t)$ и $p(t)$ убывают, и т. д. Полное воспламенение оболочки струи совпадает по времени с исчезновением пульсаций давления.

Косвенным подтверждением высказанных выше представлений о влиянии строения струи на особенности ее сгорания явились результаты исследования горения струи с перестроенной структурой. Под сопло форсунки устанавливался стальной шарик диаметром 3 мм на расстоянии h , который разбивал центральную часть струи, направляя часть топлива в оболочку и разреживая сердцевину. При оптимальном h концентрационная неоднородность струи нивелировалась, а перемешивание в оболочке различных порций топлива препятствовало спокойному раз-

виту предпламенных процессов. Этим частично устранялись две причины ухудшения горения смеси при повышенных T_0 : раннее воспламенение и переобогащенность топливом сердцевины.

Типичные осциллограммы для оптимального значения $h = 25$ мм представлены на рис. 7. Сравнение с кривыми $p(t)$ на рис. 4 обнаруживает значительное изменение характеристик горения перестроенной струи и качественного вида закона тепловыделения. Эпюры давления имеют более гладкий вид, свидетельствующий о равномерном распространении пламени по практически однородной оболочке (елочная структура размывается). Обработка осциллограмм показала, что τ_i увеличилась в среднем в 1,5 раза во всем диапазоне T_0 . При средних и высоких температурах существенно интенсифицировалось воспламенение: dp/dt увеличилось в 2 раза. Средняя скорость тепловыделения повысилась на 10—20 % (см. рис. 5, p_{\max}/τ_{\max} — штриховая линия). Следовательно, целенаправленная перестройка структуры струи способствовала возрастанию задержки воспламенения и интенсификации сгорания смеси (при $h = 25$ мм объем топливной струи практически не изменялся).

Следует отметить, что на горение струи с измененной структурой могли влиять и такие факторы, как увеличение объема струи и изменение характеристик распыления. Поэтому проведены дополнительные опыты, в которых варьировались значения h , p_0 и обороты вала топливного насоса, влияющие на эти факторы. Приближение шарика к соплу форсунки (h уменьшалось до 15 мм) увеличивало объем струи, сокращало τ , (топливо разбрызгивалось в стороны и воспламенялось на горячих стенках КС) и увеличивало интенсивность тепловыделения. Наоборот, удаление шарика на расстояние, большее 25 мм, снижало его воздействие на горение струи и при $h > 50$ мм эффект не ощущался. Подобные результаты наблюдались при различных значениях p_0 и оборотах вала насоса, которые подтвердили основное влияние на воспламенение и горение струи ее структуры (при постоянстве ее объема).

Таким образом, в работе рассмотрено влияние структуры топливной струи и температуры воздуха перед впрыском топлива на характеристики ее воспламенения и горения. Показано, что ухудшение сгорания топливоздушнoй смеси с ростом T_0 обусловлено ранним воспламенением и различием локальных условий в оболочке струи и во внутренних ее участках. Полученные представления подтверждены экспериментально при исследовании горения топливной струи с измененной структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов Д. Н., Свиридов Ю. Б. Изв. АН СССР. ОТН, 1958, 4, 133.
2. Свиридов Ю. Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях.— Л.: Машиностроение, 1972.
3. Godfrey D. I., Parker D. A. et al. // Proc. 6th Army Mater. Technol. Conf., Wash., 1979.— N. Y., 1983.
4. Бажайкин А. Н. Структура газофазных пламен.— Новосибирск, 1987.
5. Баев В. К., Бажайкин А. Н. и др. Двигателестроение, 1981, 2.
6. Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях.— Л.: Судостроение, 1971.
7. Бажайкин А. Н. Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и на новых топливах.— М., 1987.
8. Камфер Г. М., Корчагин В. А. Изв. вузов. Машиностроение, 1968, 6, 127.
9. Todes O. M. Acta Physicochimica, URSS, 1936, 5, 6, 785.
10. Махов В. Э., Гусаков С. В. ФГВ, 1983, 19, 5, 21.

Поступила в редакцию 25/IV 1988,
после доработки — 26/IX 1988