

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ВТОРИЧНОГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ НА ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОДНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. А. Бузуков

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментов, проведенных в бомбе постоянного объема, в которой поддерживали условия, характерные для пусковых режимов работы дизельных двигателей. В объеме на пути струи топливно-воздушной смеси устанавливали как охлаждаемые (до 286 К), так и неохлаждаемые вставки — пластины, имитирующие участок стенки камеры сгорания, на которых укрепляли лепестковые отражатели струи для реализации эффекта вторичного смесеобразования. Показано, что при повышенном давлении в среде (2,5 МПа и выше) наличие вставок, в том числе оснащенных отражателями независимо от их теплового состояния, влияет на воспламенение лишь при предельно низких температурах среды, при которых первичная вспышка паров топлива и продуктов его термического разложения осуществляется непосредственно вблизи поверхности вставки. При пониженном исходном давлении в среде (0,9 МПа) влияние вставки существенно: размещение неохлаждаемой поверхности снижает как период индукции (в 1,5 раза по сравнению с впрыском в свободный объем), так и предельную температуру вспышки. Но при охлаждении поверхности вставки задержка воспламенения увеличивается на 20 %, а предельная температура, при которой оно осуществляется, возрастает на 100 К. В таких условиях установка лепесткового отражателя струи на поверхности имитатора стенки существенно улучшает характеристики воспламенения смеси: снижаются период его задержки и предельная температура вспышки вплоть до значений, не превышающих измеренные при впрыске в свободный объем. Предполагается, что при вторичном выбросе смеси с кромки лепесткового отражателя в свободное пространство рабочего объема образуется замкнутый кольцевой вихрь, содержащий как жидкую фазу — капли топливного распыла, так и газообразную — пары топлива, продукты его частичного термического разложения и воздух.

Ключевые слова: дизельный двигатель, смесеобразование.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из нерешенных проблем современного моторостроения остается улучшение пусковых характеристик дизельных двигателей и, в частности, так называемого холодного пуска, осуществляемого при низкой температуре окружающей среды.

Разработано достаточно много процедур, с помощью которых удается перевести двигатель с прокрутки на устойчивый самостоятельный режим работы. Такие способы делятся на активные и пассивные. К активным относятся, прежде всего, способы переработки топлива, благоприятно влияющие на его способность к воспламенению. В качестве примера можно указать введение в топливо промотирующих добавок [1], использование каталитических поверхностей [2], электромагнитную обработку топлива [3], а также форкамерно-факельный подогрев воздуха на впуске за счет частичного

сжигания основного [4] или вспомогательного топлива [5]. Пассивные способы обычно связаны с разогревом корпуса двигателя, например, при подаче водяного пара в рубашку охлаждения [6] или за счет выделения тепла от прокачки вспомогательной сильновязкой жидкости в специальном контуре [7, 8]. Пар или сжатый воздух в рассматриваемых условиях применяются также и при раскрутке двигателя параллельно со стартером.

Несмотря на определенное количество предложенных технических решений, проблеме холодного пуска дизельных двигателей нельзя считать окончательно решенной, так как большинство этих способов недостаточно эффективны и требуют дополнительных и иногда сложных технических операций или специальных приспособлений. Кроме того, такие нововведения могут негативно сказаться на характеристиках работы двигателя в но-

минальном режиме. Проблема становится тем сложнее, чем ниже температура окружающей среды.

В последние годы наметился еще один подход к решению проблемы запуска холодного двигателя — совершенствование процесса смесеобразования. Это направление исследований базируется на следующих физических предпосылках. Показано [9, 10], что воспламенение и сгорание топливно-воздушной смеси определяются не только ходом предпламенных химических превращений, но в значительной степени и характеристиками потока в камере сгорания на стадии формирования зоны, содержащей реакционноспособную смесь, а также характером растекания топлива по стенкам камеры в этот период. Одна из форм использования указанного обстоятельства для улучшения характеристик воспламенения смеси и работы двигателя в режиме разгона заключается в разработке так называемого эффекта вторичного смесеобразования [11]. Действенность предложенного способа обеспечивается нейтрализацией некоторых неблагоприятных для самовоспламенения факторов. Если в режимах полной нагрузки параметры воздушного заряда в камере сгорания характеризуются относительно высокими значениями — $p_N = 3 \div 6$ МПа, $T_N = 800 \div 1000$ К, то при запуске они оказываются много ниже — $p_s = 1 \div 2,5$ МПа, $T_s = 600 \div 700$ К, а при низкой температуре окружающей среды — еще меньше. Из-за этого при запуске двигателя существенно возрастает период индукции, падает полнота сгорания и, таким образом, затягивается выход двигателя в режим постоянной работы. Обычно такое «зависание» двигателей и определяют как ухудшение его пусковых характеристик. Положение усугубляется еще и тем, что низкие обороты во время пуска ($n = 100 \div 300$ мин⁻¹) ведут к снижению давления впрыска топлива и, следовательно, к ухудшению его распыления. Оба указанных фактора (малая плотность среды и пониженное давление впрыска) приводят к возрастанию дальнобойности струи смеси и падению угла ее конусности [12, 13]. Если, кроме того, учесть снижение интенсивности движения воздушного заряда, то становится очевидным, что в таких условиях содержание топливного компонента в струе значительно увеличивается. Из-за этого затягиваются процессы образования сбалансированной по составу реакционноспособной топливно-воздушной смеси,

испарения жидкого компонента и предпламенных химических превращений и, как следствие, ухудшаются характеристики воспламенения.

Не менее важным негативным фактором является попадание струи смеси из-за ее повышенной дальнобойности на холодную стенку камеры сгорания. Это ведет к переходу режима смесеобразования из объемного в «пленочный». При этом известно, что пуск двигателя с пленочным смесеобразованием существенно сложнее, чем с объемным [14].

Таким образом, рассредоточение топливно-воздушной смеси по объему камеры сгорания и исключение оседания хотя бы части топлива на ее стенках должно способствовать более уверенному запуску двигателя даже при пониженной температуре окружающей среды. Такую задачу, как указывалось выше, можно решить путем реализации эффекта вторичного смесеобразования. Немногочисленные экспериментальные исследования [15, 16] показали, что положительный результат достигается оптимальным профилированием стенки камеры сгорания в том месте, куда падает струя топливно-воздушной смеси. Такое профилирование можно обеспечить, например, образованием специальной выемки или выступа на поверхности, с помощью которых осуществляются вторичный выброс смеси в свободное пространство и дополнительное диспергирование топлива. Благодаря этому удается существенно снизить предельную температуру вспышки и период индукции, а также повысить скорость тепловыделения [16]. В результате обеспечивается более быстрый переход двигателя через режим «зависания» (медленное вращение вала двигателя с редкими вспышками, мощность которых недостаточна для поддержания самостоятельной работы мотора) к рабочему режиму.

К настоящему времени разработан ряд технических решений, обеспечивающих реализацию эффекта вторичного смесеобразования [17–20 и др.], однако недостаточно исследованы детали процессов, протекающих при падении топливно-воздушной струи на стенку камеры, имеющую специальную конфигурацию [15, 16, 20]. Существенным здесь является то, что во всех известных работах температура стенки камеры или ее имитатора всегда была равна температуре содержащегося в объеме воздуха, в то время как при моделировании холодного пуска необходимо поддерживать

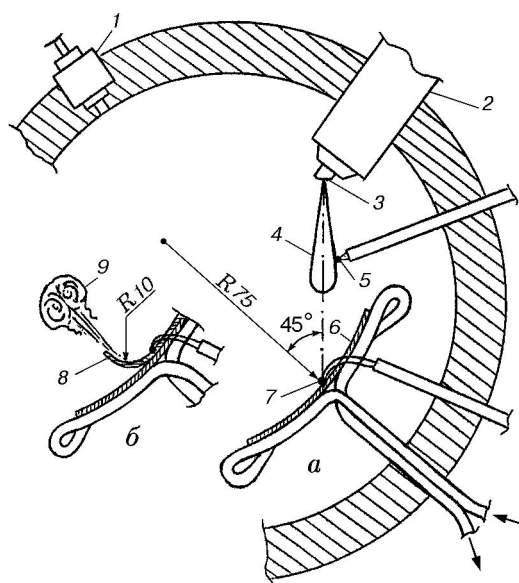


Рис. 1. Схема размещения вставок в рабочем объеме установки:

1 — пьезоэлектрический датчик давления в объеме, 2 — форсунка, 3 — сопло распылителя, 4 — струя топливно-воздушной смеси, 5 — термопарный датчик температуры воздуха, 6 — охлаждаемая пластина, имитирующая участок поверхности камеры сгорания, 7 — термопарный датчик температуры пластины, 8 — лепестковый отражатель струи, 9 — вторичный выброс смеси, принимающий форму кольцевого вихря

температуру этих элементов конструкции на уровне $250 \div 300$ К. Такая задача до настоящего времени не рассматривалась.

В данной работе представлены результаты экспериментальной проверки эффективности вторичного смесеобразования в условиях, когда параметры воздушного заряда в камере сгорания безмоторной установки соответствуют пусковым, а температура имитатора стенки камеры равна температуре воздуха в ней или поддерживается на уровне $286 \div 289$ К.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили в бомбе постоянного объема, подробное описание которой и методология обработки результатов измерений изложены в [1, 10, 15]. На рис. 1 схематически изображены приспособления, имитирующие участки «горячей» или «холодной» стенки камеры сгорания и обеспечивающие вторичный выброс топливно-воздушной смеси в свободное пространство. Струя смеси выбрасывается из

форсунки, закрытой теплозащитным кожухом и оснащенной распылителем с диаметром цилиндрического сопла 0,4 мм. Основной объем исследований выполнен при скорости работы топливного насоса $n = (150 \pm 25)$ мин⁻¹. Специально проведенное исследование [15] показало, что изменение скорости вращения вала насоса в пределах $125 \div 175$ мин⁻¹ практически не влияет на характеристики впрыска топлива, но дальнейшее увеличение n ведет к изменению режима работы топливной системы в целом. Установлено, что в описываемых опытах эффективная длительность впрыска составляет 9,5 мс, а цикловая подача — (100 ± 10) мг (единичный впрыск, топливо — летнее дизельное плотностью 822 кг/м³) при среднем давлении впрыска топлива 18 МПа.

Условия, моделирующие пусковые режимы работы двигателя, создавали не только снижением интенсивности впрыска (номинальное давление $40 \div 60$ МПа), но и заданием соответствующего уровня параметров воздушного заряда в рабочем объеме. В опытах исходную температуру воздуха T_V меняли в пределах $600 \div 800$ К и измеряли вблизи оси струи термопарой непосредственно перед каждым впрыском. Исходное давление в камере в трех сериях опытов поддерживали на уровне $p_V = 2,5, 1,7$ и $0,9$ МПа.

Следует отметить, что в описываемых экспериментах коэффициент избытка воздуха α в различных опытах менялся от 4 до 16 (объем камеры 1450 см³). Такие значения α не характерны ни для каких режимов работы дизельных двигателей (при пуске обычно $\alpha = 0,2 \div 0,4$). Но, так как в работе рассматриваются вопросы, связанные лишь с воспламенением смеси, а не с полной сгоранием, указанное обстоятельство имеет второстепенное значение.

В бомбе устанавливалась пластина (см. рис. 1, а), имитирующая элемент стенки камеры сгорания двигателя. Пластина охлаждалась с помощью плотно прилегающего к ней змеевика. В отсутствие подачи хладагента температура пластины равна температуре окружающего подогретого воздуха и прокачиваемого через змеевик хладагента. Температуру пластины контролировали термопарой, зачеканенной в ее поверхность в месте падения на нее струи топливно-воздушной смеси. В целях реализации эффекта вторичного смесеобразования на пластину прикрепляли лепестковый отра-

жатель (см. рис. 1, б), который разворачивал поток смеси, падающий на пластину, и снова направлял его в свободное пространство бомбы. Конфигурация отражателя соответствует рекомендациям работы [15].

Проведено пять серий опытов: 1 – топливо впрыскивали в свободный рабочий объем, не загроможденный дополнительными устройствами, 2 — в камере устанавливали пластину-имитатор, принимающую температуру окружающего воздуха (охлаждение отключено), 3 — на пластине в тех же условиях устанавливали лепестковый отражатель струи, 4 — опыты проводили без отражателя, но пластину охлаждали водой с температурой 285 К, 5 — на охлаждаемой пластине укрепляли лепестковый отражатель.

В опытах измеряли основной параметр, определяющий характер воспламенения смеси, — период индукции τ_{ind} (время между началом впрыска и началом подъема давления в камере, вызванного сгоранием части смеси [21, 10, 1]). Воспламенение регистрировали пьезоэлектрическим датчиком. Инструментальная временная погрешность, допускаемая при установлении интервалов времени, составляет 5 %. Но ввиду нестабильности термохимических процессов на стадии подготовки смеси к воспламенению фактический разброс значений τ_{ind} достигал 15 %, увеличиваясь до 25 % при предельно низких температурах среды. Поэтому в целях повышения надежности получаемых результатов период индукции измеряли через каждые 5 К и, как минимум, дважды при «прогоне» температуры сверху вниз и обратно при постоянном давлении воздуха (точность поддержания давления в объеме 3 %). Полученные значения τ_{ind} осредняли в диапазоне температур ± 15 К и осредненные значения $\bar{\tau}_{ind}$ принимали как соответствующие T_V . Оценка показала, что благодаря такой процедуре обработки данных результирующая относительная погрешность определения $\bar{\tau}_{ind}$ не превышает 7 % [16].

Кроме периода индукции в настоящих экспериментах регистрировали еще два параметра — предельную (T_{lim}) и переходную (T_c) температуру. В качестве предельной брали температуру среды, при которой в объеме наблюдаются начальные проявления тепловыделения. В этом случае осциллограммы давления $p_V(t)$ фиксируют вялое, с большим временем индукции ($70 \div 90$ мс) его повышение. При этом вос-

пламеняется и горит пленка топлива, осевшего на стенке, что сопровождается обильным сажевыделением, но перехода такого поверхностного горения в объемное не происходит. Температуру T_{lim} измеряли датчиком, находящимся в среде (5 на рис. 1), в то время как процессы, приводящие к вспышке паров топлива и продуктов его термического разложения в приповерхностной зоне, в значительной мере определяются температурой поверхности стенки. Предельная температура не всегда совпадает с исходной температурой воздуха в бомбе (например, в случае охлаждения пластины), что не позволяет рассматривать ее как фундаментальную физико-химическую характеристику воспламенения топливно-воздушной смеси, образующейся при импульсном высоконапорном впрыске жидкого топлива в нагретую газовую среду. Однако для сравнительного анализа экспериментальных данных, полученных в опытах как с применением отражателя струи, так и без него, знание T_{lim} полезно. Очевидно, что при температурах, не достигающих значений T_{lim} , никаких эффектов, свидетельствующих о начале тепловыделения (подъем давления, появление свечения в камере и др.) не наблюдается.

Переходную температуру T_c фиксировали при переходе приповерхностного воспламенения в объемное. В этом случае давление в рабочем объеме возрастает резко и первичный очаг пламени возникает в теле струи в отдалении от поверхности пластины. Переходную температуру уже можно рассматривать в качестве фундаментального параметра, характеризующего свойства топлива и процесса в целом.

Так как в опытах при измерении температур T_c и T_{lim} (и соответствующих периодов индукции) наблюдался большой разброс, значения этих параметров уточняли, увеличивая количество опытов до 20. После осреднения результатов их принимали в качестве истинных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первую серию опытов проводили в целях получения опорных данных, позволяющих судить о процессах смесеобразования и воспламенения топливно-воздушной смеси при впрыске в свободный рабочий объем, не загроможденный препятствиями (расстояние от среза сопла распылителя до противоположной стенки корпуса камеры 110 мм). Результаты этих опытов (рис. 2) анализировали в сравнении с из-

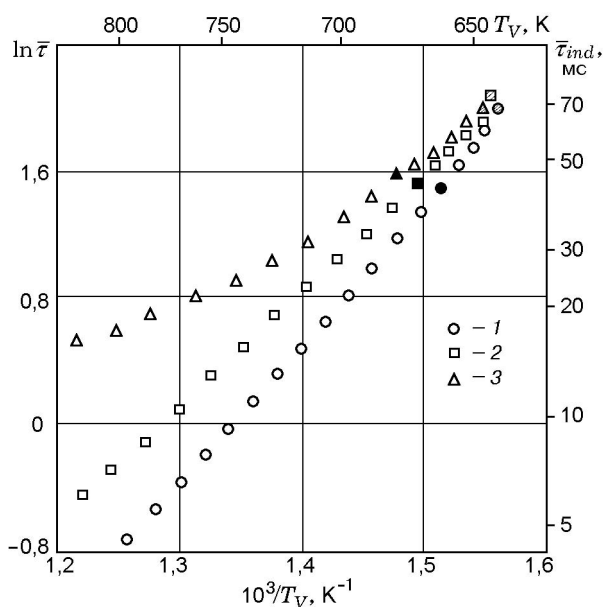


Рис. 2. Зависимость относительного периода индукции $\bar{\tau}$ от температуры среды при впрыске топлива в свободный объем, заполненный воздухом с давлением $p_V = 2,5$ (1), 1,7 (2), 0,9 МПа (3):

темные точки — T_c , заштрихованные — T_{lim}

вестными из литературы, что позволяло выявлять особенности протекающих в данных условиях газодинамических и физико-химических процессов. На рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости логарифма относительного периода индукции $\ln \bar{\tau}$ от обратной температуры воздуха в объеме $1/T_V$. Здесь $\bar{\tau} = \bar{\tau}_{ind}/\tau_{eff}$, τ_{eff} — эффективная длительность впрыска.

Форма представления данных общепринята при описании процессов, в которых осуществляется самовоспламенение распыленного жидкого топлива или газовых смесей в нагретом воздухе в условиях постоянного объема и в реальных камерах сгорания двигателей [21, 1, 10 и др.]. Преимущество такого подхода к результатам экспериментов заключается в том, что, измеряя наклон линий на графиках, можно определить эффективную энергию активации E данного химического превращения [21–23]. Но, как показывают эксперименты [9, 10], упомянутая классическая схема вычисления энергии активации правомерна лишь при определенных условиях опытов — при температурах воздушного заряда $T_V > 700$ К и его плотности $\rho_V > 6$ кг/м³. При более низких значениях T_V и ρ_V достоверных значений эффективной энергии активации получить не

удаётся [10] и такие попытки бесперспективны, так как при переходе через указанные выше границы меняется механизм взаимодействия струи топливно-воздушной смеси с газовой средой. При этом (см. выше) вместо квазикумулятивного взаимодействия [24], обеспечивающего относительно равномерное перемешивание распыленного топлива с воздухом в головном кольцевом вихре [25, 26], происходит «прострел» воздушной среды компактным газожидкостным бойком сравнительно высокой плотности [12].

На рис. 2 представлены результаты опытов, условия которых соответствуют двум указанным механизмам смесеобразования, причем оба они характерны для пуска дизельных двигателей различных размеров. При $p_V = 2,5$ МПа средняя плотность среды ≈ 15 кг/м³ и реализуется квазикумулятивный механизм развития струи. Но при $p_V = 0,9$ МПа плотность среды составляет всего ≈ 4 кг/м³ и согласно [13] такая струя продвигается в воздухе с высокой скоростью, минимально рассеивая диспергированное топливо в пространстве. Оценка [13] показывает, что плотность топливного компонента в последнем случае втрое превышает наблюдаемую в потоке смеси, развивающемся при $p_V = 2,5$ МПа. Серия опытов 2 ($p_V = 1,7$ МПа, $\rho_V = 8$ кг/м³) характеризуется переходными формами процесса смесеобразования. Зависимости на рис. 2 построены на основании лишь части характерных результатов опытов, произвольно выбранных из большого массива данных экспериментов.

Зависимости $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ для $p_V = 2,5$ и 1,7 МПа (см. рис. 2) при температурах, превышающих T_c , близки к параллельным прямым линиям, как это следует из классических представлений о процессе воспламенения [22]. Зависимость же $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ при $p_V = 0,9$ МПа имеет совершенно иной вид. Линия искривлена, значительно смещена в сторону высоких значений $\bar{\tau}$, повышенным значением отличается и температура T_c .

Дополнительным свидетельством «нестационарности» зависимости 3 служит невозможность каноническим образом оценить с ее помощью эффективную энергию активации. Из зависимостей 1 и 2 на рис. 2 следует, что $E = 75 \div 85$ кДж/моль, что соответствует литературным данным для дизельного топлива [17, 10]. Но зависимость 3 показывает, что $E \approx 30$ кДж/моль. Это значение существенно

ниже того, которое можно было бы принять как достоверное.

При более низких температурах (в диапазоне $T_c \div T_{lim}$) зависимости $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ сближаются и, в конечном счете, оканчиваются в одной точке T_{lim} , $\bar{\tau}_{lim}$ независимо от давления в бомбе. Это объясняется тем, что при малых температурах воспламеняется не первичная смесь, образующаяся в результате распыления топлива в воздухе, а его пары и продукты термохимического разложения, поступающие из пленки на поверхности прочного корпуса рабочего объема. Но так как этот процесс слабо зависит от давления в среде и в основном определяется температурой стенки (в данном случае она на $100 \div 150$ К ниже температуры T_V) и воздуха вблизи нее, то и температура T_{lim} оказывается практически независимой от плотности ρ_V .

Особо следует подчеркнуть, что приповерхностное возгорание, характеризуемое параметрами T_{lim} и $\bar{\tau}_{lim}$, непосредственно не связано с моментом контакта струи с препятствием. Это следует из того, что время пролета головной части струи от форсунки до стенки для трех рассматриваемых случаев составляет примерно 1, 2 и 3 мс [13]. В то же время измеренные значения периода индукции при предельных температурах оказываются равными нескольким десяткам миллисекунд. Поэтому образование реакционноспособной газовой смеси в данном случае носит «накопительный» характер. Отметим также, что переход к объемному воспламенению ($T_V > T_c$) не исключает предварительного попадания топлива на поверхность стенки. При переходных температурах, как показывают измерения, $\bar{\tau}_{ind} = 40 \div 50$ мс, что в несколько раз превышает длительность впрыска. Таким образом, объемное воспламенение происходит в то время, когда струя уже достигла стенки, часть топлива осела на ней и протекают процессы, подготавливающие воспламенение. Но здесь предпламенная переработка топлива в теле струи идет интенсивнее и поэтому объемное воспламенение происходит ранее приповерхностного. Впрочем, при достаточно высоких температуре и давлении в среде начало тепловыделения обычно наблюдается еще до того, как струя достигает стенки камеры сгорания [10].

Изложенные представления о характере развития струй топливно-воздушной смеси и ее воспламенении позволяют объяснить особен-

ности протекания этих процессов и в тех случаях, когда на пути струи установлено одно из указанных ранее препятствий (см. рис. 1, а, б). На рис. 3, а представлены результаты экспериментов при $p_V = 2,5$ МПа в условиях свободного объема и с различными вариантами неохлаждаемых и охлаждаемых вставок, в том числе оснащенных отражателями.

Прежде всего, отметим, что во всех вариантах условий опытов зависимости $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ при $T_V > T_c$ единообразны: точки лежат на одной линии независимо от наличия как самой пластины и ее температурного состояния, так и отражателей на ней, что обеспечивает возможность определения эффективной энергии активации ($E \approx 75$ кДж/моль). При этом точки T_c , $\bar{\tau}_c$ располагаются двумя группами. Первая (≈ 660 К, ≈ 40 мс) соответствует воспламенению в условиях, когда охлаждение пластин отключено (или пластина отсутствует), вторая (≈ 680 К, ≈ 30 мс) относится к серии опытов с охлаждаемой пластиной, в том числе с отражателем. Объяснить такое снижение температуры T_c можно образованием зоны охлажденного воздуха в окрестности пластины, что тормозит процесс образования первичного очага пламени вблизи нее.

При $T_V < T_c$ влияние вставки более заметно. Эксперименты показывают, что при падении струи на неохлаждаемую пластину температура вспышки снижается на ≈ 15 К по сравнению со случаем впрыска в свободный объем. Несмотря на то, что и в том и в другом случае происходит пристенное воспламенение, различие предельных температур объясняется различием температур самих поверхностей. Действительно, пластина нагрета практически до исходной температуры воздуха, в то время как корпус рабочего объема на несколько десятков градусов ниже. И наоборот, при охлаждении пластины условия воспламенения ухудшаются. При этом наблюдается своеобразный эффект: наряду с повышением температуры вспышки (в данном случае на ≈ 20 К) значительно снижается период индукции (на ≈ 30 %). Такое явление наблюдалось неоднократно [16] и объясняется тем, что повышение температуры среды оказывает большее влияние на скорость термического преобразования топлива, осевшего на стенке, чем топлива в объеме.

Важным результатом экспериментов оказывается следующее. Серии опытов 3 и 5 при

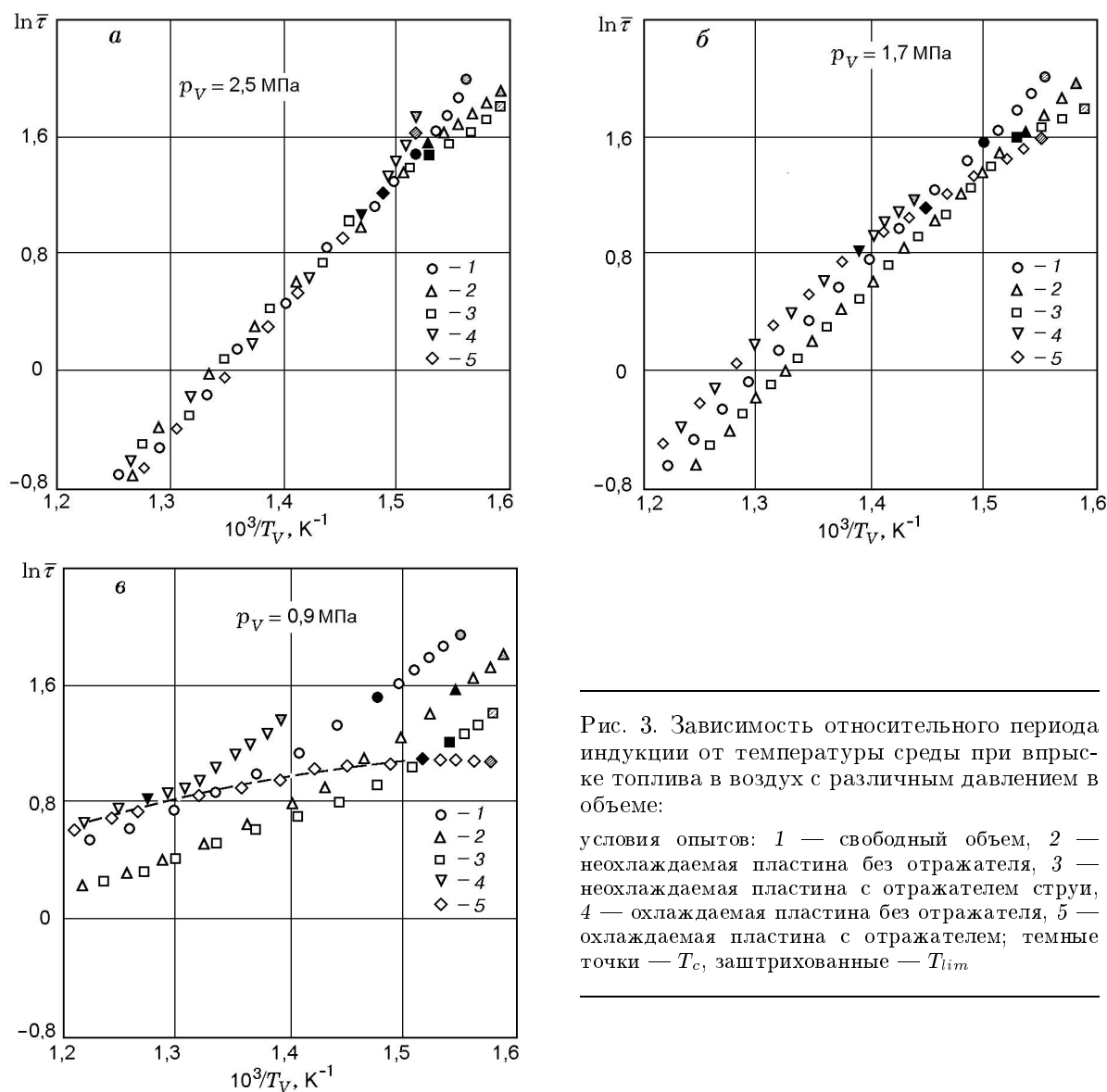


Рис. 3. Зависимость относительного периода индукции от температуры среды при впрыске топлива в воздух с различным давлением в объеме:

условия опытов: 1 — свободный объем, 2 — неохлаждаемая пластина без отражателя, 3 — неохлаждаемая пластина с отражателем струи, 4 — охлаждаемая пластина без отражателя, 5 — охлаждаемая пластина с отражателем; темные точки — T_c , заштрихованные — T_{lim}

$p_V = 2,5$ МПа показывают, что установка лепесткового отражателя струи на пластину мало влияет на характеристики воспламенения при температурах, близких к предельным. В обеих сериях опытов несколько снижается период индукции (не более 5%) при сохранении предельной температуры на одном уровне для «горячих» и «холодных» условий. Причина, по которой вторичное смесеобразование в рассматриваемых условиях практически себя не проявляет, заключается в следующем. При $p_V = 2,5$ МПа струя топливно-воздушной смеси на расстоянии 70 мм от сопла распылителя (см. рис. 1,а) имеет диаметр ≈ 20 мм (угол конусности $\approx 15^\circ$ [13]). Поэтому на поверх-

ность пластины падает относительно широкий газожидкостный поток, покрывающий не только участок в окрестности точки 7 на рис. 1, но и сам отражатель. Это обстоятельство автоматически исключает возможность вторичного выброса в свободное пространство сколь-нибудь значительной части смеси.

На рис. 3,б представлены результаты экспериментов, проведенных для всех пяти вариантов условий при $p_V = 1,7$ МПа. Полученные данные в значительной мере повторяют предыдущие, но наблюдаются и некоторые качественные и количественные отличия. Прежде всего, размещение холодного тела на пути топливно-воздушной струи (точки 4) ведет

к повышению значений $\bar{\tau}_{ind}$ на $6 \div 10\%$ по сравнению с впрыском в свободный объем при $T_V > T_c$. С другой стороны, подогрев пластины (точки 2) приводит к снижению значений $\bar{\tau}_{ind}$ на $5 \div 7\%$. Поэтому зависимость $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ при $T_V > T_c$ как бы «расслоена» на параллельные линии — «горячую», базовую и «холодную». Этот эффект, как указывалось выше, связан с соответствующим изменением температурного поля в окрестности горячего или холодного тела, затрагивающим зону формирования очага пламени.

Результаты опытов показывают, что особенно негативно на воспламенение смеси влияет охлаждение поверхности пластины при приближении к переходной или к предельной температуре (точки 4). Для того чтобы осуществилось как приповерхностное, так и объемное воспламенение, воздух в этих условиях подогревали до температур 685 и 720 К соответственно. В то же время относительный период индукции снизился по сравнению с остальными случаями более чем в два раза. Этот эффект уже обсуждался выше. Существенным здесь является результат, связанный с влиянием отражателя, благодаря чему реализуется эффект вторичного смесеобразования (точки 5). В данном случае условия для этого благоприятнее, чем при $p_V = 2,5$ МПа, так как струя более компактна (угол конусности $\approx 10^\circ$ [13]). При этом зафиксировано снижение температур T_c и T_{lim} по сравнению с базовыми на 30 и 15 К и снижение периода $\bar{\tau}_{lim}$ в полтора раза.

В опытах 2 и 3 (неохлаждаемая пластина без отражателя и с ним) наблюдается снижение температур T_c и T_{lim} по сравнению с базовыми значениями на $15 \div 20$ К и периодов индукции $\bar{\tau}_c$ и $\bar{\tau}_{lim}$ на несколько процентов. Причем при установке отражателя струи на неохлаждаемую пластину (точки 3) характеристики воспламенения улучшаются незначительно, что соответствует полученному ранее результату.

Прежде чем приступить к анализу данных экспериментов, в которых топливо впрыскивали в воздух с давлением $p_V = 0,9$ МПа, необходимо учесть ряд обстоятельств. Поскольку в этом случае угол раскрытия струи не превышает 6° [13], диаметр натекающей на пластину струи не больше 15 мм, что обеспечивает хорошие условия для вторичного выброса смеси. При малом давлении в среде скорость продвижения головного участка струи сравни-

тельно велика (≈ 150 м/с против 90 м/с в воздухе с $p_V = 2,5$ МПа), а плотность жидкого компонента в теле струи повышена почти в три раза [13]. Благодаря этому взаимодействие газожидкостного потока с пластиной идет намного интенсивнее, чем в рассмотренных ранее случаях, и вторичный выброс смеси носит более активный характер. Кроме того, такая струя обладает высоким «звукопроводностью» («свойство продольной упругости» [12]). Это означает, что вверх по струе от точки ее контакта с поверхностью распространяются акустические сигналы, под воздействием которых возможно перестроение структуры потока смеси, а также изменение ее теплового состояния [27]. Все указанные факторы ведут к принципиально отличному от предыдущих результатам опытов по установлению зависимости $\bar{\tau}_{ind}(1/T_V)$. О том, что это действительно так, свидетельствуют данные, приведенные на рис. 2.

На рис. 3, в представлены данные для всех пяти вариантов условий опытов, где точки 1 воспроизводят базовую зависимость из рис. 2. Опыты показывают, что в случае «теплой стенки» практически во всем диапазоне температур наблюдается «расслоение» зависимостей, отмеченное при рассмотрении результатов опытов, представленных на рис. 3, б. Но здесь смещение зависимости $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ относительно зависимости 3 более существенное: $\bar{\tau}$ снижается в полтора-два раза. Такой результат связан с тем, что рабочая поверхность вставки расположена ближе к форсунке, чем к корпусу бомбы, и имеет повышенную температуру. Под действием этих факторов не только ускоряются предпламенные процессы, но и снижаются температуры T_c (на 40 К), T_{lim} (на 15 К) и период индукции (на 10%).

Существенное изменение характера воспламенения смеси происходит при установке лепесткового отражателя на неохлаждаемую пластину. При $T_V > 800$ К зависимости 3, 2 и базовая совпадают, так как в этом случае в камере происходит объемное воспламенение смеси с малым временем задержки и газотермодинамические процессы на поверхности пластины и вблизи нее не успевают повлиять на это — эффект вторичного смесеобразования не работает. Но его активное проявление наблюдается уже при $T_V < 750$ К, т. е. еще до достижения температуры T_c . Действие его заключается, во-первых, в постоянном уменьшении $\bar{\tau}$ по

мере снижения температуры среды, во-вторых, значения $\bar{\tau}_c$ и $\bar{\tau}_{lim}$ оказываются на 40 % ниже, хотя температуры T_c и T_{lim} близки к полученным в опыте 2. Таким образом, можно утверждать, что установка отражателя струи даже на неохлаждаемую пластину в данных условиях существенно улучшает характеристики воспламенения по сравнению с их базовыми значениями: переходная температура падает с 685 до 635 К, предельная — с 640 до 625 К, переходный период индукции — с 48 до 31 мс и предельный — с 67 до 38 мс.

На рис. 3, в зависимость 4 отображает результаты экспериментов с использованием системы охлаждения пластины (ее поверхность в зависимости от степени прогрева воздуха принимала температуру $286 \div 289$ К). Видно, что при относительно высоких температурах зависимость смещена относительно базовой в сторону увеличения $\bar{\tau}$ на ≈ 20 % (эффект «расслоения», см. выше). Но наиболее важный результат заключается в том, что холодная поверхность на пути струи топливно-воздушной смеси отрицательно влияет на температуры T_c и T_{lim} (повышение на 100 и 80 К соответственно). Такое резкое ухудшение характеристик воспламенения наглядно показывает, насколько усложняется пуск дизельного двигателя, если стенки камеры сгорания не прогреты.

Иная картина наблюдается в случае, когда на охлаждаемую пластину устанавливают отражатель струи (точки 5). При температуре ≈ 800 К (и, по-видимому, более высокой) зависимость $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ для охлаждаемой пластины с отражателем и без него практически совпадают. Это объясняется тем, что в таких условиях объемное воспламенение в струе происходит еще до того, как она входит в прямой контакт с пластиной. Но начиная с температуры ≈ 730 К и вплоть до $T_{lim} = 635$ К период индукции остается почти постоянным ($\bar{\tau}_{ind} = 25 \div 30$ мс). Поэтому рассматриваемая зависимость имеет отличный от всех остальных наклон (штриховая линия на рис. 3, в), что говорит об изменении традиционного хода процессов смесеобразования и термической переработки топлива. Опыты показали, что по сравнению с базовыми в данном случае снизились значения контрольных температур (переходной на 25 К и предельной на 15 К), а также значения $\bar{\tau}_c$ и $\bar{\tau}_{lim}$ (на 50 и 80 % соответственно). Более того, полученное в этих опытах предельное значение пери-

ода индукции вообще имеет наименьшее абсолютное значение (28 мс) из всех результатов, полученных при впрыске в воздух с исходным давлением $p_V = 0,9$ МПа.

Обобщенные выводы по результатам серий опытов 4 и 5 можно сформулировать следующим образом. При высоких температурах среды смесь воспламеняется так же, как и при других вариантах условий: струя не успевает провзаимодействовать с пластиной независимо от ее температурного состояния и наличия или отсутствия отражателя. При понижении температуры среды роль охлаждаемой пластины как объекта, создающего вокруг себя поле низких температур, возрастает и сводится к торможению предпламенных процессов и, как следствие, к повышению значений $\bar{\tau}$ по сравнению с базовыми. В рассматриваемых условиях ($p_V = 0,9$ МПа) воспламенение настолько затруднено, что для его инициирования приходится температуру воздуха в камере поднимать до 720 К. Если же поток смеси, попадая на пластину и скользя по ее наклонной поверхности, набегаем на лепестковый отражатель и с его помощью выбрасывается в свободное пространство, то все газотермические процессы переносятся из приповерхностного слоя в зону, расположенную непосредственно за кромкой отражателя. Эта зона формируется в течение всей длительности впрыска и пополняется топливно-воздушной смесью, прошедшей предварительную механическую (дополнительное диспергирование) и тепловую обработку. Можно предполагать, что в таких условиях выброс порции смеси с кромки отражателя (длительность ≈ 10 мс, скорость несколько десятков метров в секунду) приведет к образованию замкнутого кольцевого вихря [28], заполненного многокомпонентной средой — жидким топливом в виде мельчайших капелек (20 \div 50 мкм), парами топлива, продуктами его деструкции и воздухом (область 9 на рис. 1, б). Такое предположение небезосновательно: экспериментально показано, что даже при нормальном падении струи смеси [29] или отдельной капли [30] на жесткую поверхность на фронте растекающегося по ней потока образуется вихревая зона. Таким образом, в замкнутом газодинамическом образовании (кольцевом вихре) подготовка смеси к воспламенению идет по пути, отличному от всех предыдущих вариантов и завершается быстрее. Отсюда — особый наклон зависимости 5 на рис. 3, в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено несколько серий экспериментов, в которых впрыск топлива осуществляли как в свободный рабочий объем установки (бомба постоянного объема), так и в условиях, когда на пути струи топливно-воздушной смеси размещали охлаждаемую до 286 К или неохлаждаемую пластину-имитатор холодной или прогретой стенки камеры сгорания дизельного двигателя. Для реализации эффекта вторичного смесеобразования в части опытов на пластине устанавливали лепестковый отражатель струи.

2. В качестве параметров, характеризующих условия воспламенения топливно-воздушной смеси, измеряли предельную температуру, при которой наблюдается вспышка паров и продуктов термического разложения топлива, осевшего на поверхности стенки; переходную температуру, при которой осуществляется переход от приповерхностного воспламенения к объемному; соответствующие этим температурам времена периодов индукции, а также текущую зависимость относительного периода индукции от температуры среды во всем ее диапазоне.

3. Развита полученный ранее результат, свидетельствующий о том, что при плотности воздуха в камере $\rho_V < 6 \text{ кг/м}^3$ происходит смена механизмов смесеобразования: вместо квазикумулятивного взаимодействия струи со средой происходит превращение струи в компактный газожидкостный боек с высоким содержанием топливного компонента, который пронизывает пространство с высокой скоростью, практически не оставляя после себя распыленного до мелкодисперсного состояния топлива. Это обстоятельство, как показали настоящие эксперименты, меняет характер воспламенения смеси: если в обычных условиях зависимость периода индукции от температуры воздуха соответствует кинетике Аррениуса, то при малых плотностях среды такая классическая связь нарушается.

4. При повышенных давлениях в среде (2,5 МПа и выше) и температуре $T_V > T_c$ влияние теплового состояния стенки практически не сказывается на условиях воспламенения, так как в этом случае оно осуществляется еще до того, как очаг пламени образуется в непосредственной близости к поверхности пластины. Но при снижении давления (вплоть до 0,9 МПа) наличие холодного или горяче-

го препятствия на пути топливно-воздушной струи приводит к возрастанию или, наоборот, к снижению периода индукции, тем больше, чем ниже давление. Это объясняется соответствующим изменением температурного поля вблизи холодной или горячей поверхности, захватывающим зону формирования первичного очага пламени.

5. В режиме приповерхностного воспламенения наличие горячей стенки даже при повышенном давлении ведет к снижению переходной и предельной температур и предельного периода индукции. И наоборот, при охлаждении имитатора стенки камеры сгорания значения указанных температур возрастают (особенно заметен этот эффект при давлении в среде 0,9 МПа — возрастание на $80 \div 100 \text{ К}$), но снижаются соответствующие этим критическим температурам периоды индукции.

6. Наличие отражателя струи существенно влияет на процесс воспламенения лишь в том случае, если его устанавливают на охлаждаемой пластине. При повышенном давлении в среде оно заключается в снижении переходной и предельной температур в среднем на $10 \div 15 \text{ К}$, а соответствующих периодов индукции — на $15 \div 25 \%$. При пониженном давлении влияние отражателя оказывается более существенным: наряду со снижением контрольных температур (предельная температура, например, падает с 720 до 635 К) соответствующие времена индукции сокращаются на 50 и на 80 %. При этом показано, что при малых значениях T_V температура среды перестает влиять на относительный период индукции, т. е. зависимость $\ln \bar{\tau}(1/T_V)$ выпадает из семейства остальных, характеризующих воспламенение в среде с давлением 0,9 МПа. Предполагается, что это связано с особенностями процесса смесеобразования: при импульсном выбросе смеси с кромки отражателя формируется многокомпонентный кольцевой вихрь, тело которого заполнено жидкой фазой — каплями диспергированного топлива, его парами, продуктами термического разложения и воздухом. В такой замкнутой системе подготовленные к воспламенению процессы идут значительно быстрее и с меньшими энергетическими потерями, чем в линейной первичной струе топливно-воздушной смеси, развивающейся в объеме.

7. Таким образом, экспериментально показано, что эффект вторичного смесеобразования,

реализованный в данном случае с помощью лепесткового отражателя струи, действительно улучшает характеристики воспламенения смеси в условиях, свойственных пусковым режимам работы непрогретых дизельных двигателей. И этот эффект практически не влияет на рабочий процесс при переходе от пускового к режимам холостого хода или малых нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузуков А. А. Промотирующее влияние алкилнитратов на самовоспламенение керосино-воздушной смеси // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 12–20.
2. Гордиенко В. А., Зуев Ю. Ю., Ковалев А. А., Макальский Л. М. Использование каталитических процессов в двигателях внутреннего сгорания для повышения качества их работы // Наука и техника на речном транспорте. 1999. № 7. С. 3–4.
3. Устройство подготовки топлива: Пат. 2140008 Россия, МПК⁶ F 02 M 27/04 / Бабин Ю. Ф.; АОЗТ «СКИФ-1». № 97103743.06; Заявл. 19.03.97; Оpubл. 20.10.99, Бюл. № 29.
4. Свиридов Ю. Б., Малявинский Л. В., Вихерт М. М. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. Л.: Машиностроение, 1979.
5. Система предпускового испарения бензина. Fuel vaporization system for starting an internal combustion engine: Пат. 5934260 США, МПК⁶ F 02 M 37/04 / Gadkaree Kishor P., Servati Hamid B., Then Paul M.; Corning Inc. № 08/943917; Заявл. 03.10.97; Оpubл. 10.08.99, НПК 123/520.
6. Устройство для подачи пара на пуск двигателя. Vorrichtung zur Zufuhrung von Dampf zur Einblende einer Brennkraftmaschine: Заявка 19750181 Германия, МПК⁶ F 02 M 25/035 / Rosen Per, Wettergard Jan; Munfors Euroform Gmb H. № 19750181.8; Заявл. 13.11.97; Оpubл. 27.05.99.
7. Подогреватель. Heater utilizing fluid frictional head: Пат. 5943991 США, МПК⁶ F 02 N 17/02 / Moroi Takahiro, Ban Takashi; K.K. Toyota Jidoshoki Seisakusho. № 08/956213. Заявл. 22.10.97; Оpubл. 31.08.99; Приор. 21.11.96, № 8-311008 (Япония); НПК 123/142,5.
8. Способ ускорения прогрева двигателя после пуска. Verfahren zum Aufheizen eines Katalysators beim Start einer Brennkraftmaschine: Заявка 19790699 Германия, МПК⁶ F 02 D 41/16 / Cianciara Wojciech, Mader Ralph; Siemens AG. № 19740699.8; Заявл. 16.09.97; Оpubл. 18.03.99.
9. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Задержка воспламенения топлив при впрыске в нагретый воздух // Нестационарное смесеобразование и горение в замкнутом объеме: Сб. трудов. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979. С. 4–14.
10. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Болдырев И. В. и др. Задержка воспламенения бензина при впрыске в модель камеры сгорания двигателя // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 2. С. 28–35.
11. Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Эффект вторичного смесеобразования как средство улучшения воспламеняемости смеси в дизеле // Проблемы совершенствования рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докладов Всесоюз. науч. конф., Москва (4–6 февраля 1986). М.: Моск. автомобильно-дорожный ин-т, 1986. С. 85–86.
12. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Качественные особенности развития факела при впрыске топлива в среду с противодавлением до 10 атм // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1981. № 2. С. 66–70.
13. Бузуков А. А. Особенности развития импульсной высокоскоростной топливовоздушной струи в условиях камеры сгорания дизеля // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 4. С. 389–397.
14. Степанов В. Н., Шлоссер Б. Экспериментальное подтверждение нецелесообразности вращения заряда в цилиндре дизеля при пуске в условиях низких температур // Двигателестроение. 1984. № 9. С. 5–7.
15. Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Воспламенение в условиях взаимодействия струи топливовоздушной смеси со стенкой камеры сгорания дизеля // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 7–17.
16. Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Влияние эффекта вторичного смесеобразования на воспламенение и сгорание топлива в дизеле // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 33–42.
17. Двигатель внутреннего сгорания: Пат. 2062334 Россия, МКИ⁶ F 02 B 23/06 / Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П.; Институт теоретической и прикладной механики СО РАН. № 93047219; Заявл. 11.10.93; Оpubл. 20.06.96, Бюл. № 17.
18. Предкамерный дизель. Diesel engine using fuel jet impingement and diffusion: Пат. 5613471 США, МКИ⁶ F 02 B 3/00 / Yasuhito Yaoita; Wellstone Terras. № 369148; Заявл. 05.10.95; Оpubл. 23.03.97; НКИ 123–298.
19. Zhang L., Ueda T., Kurihara H., Yokota K. Effect of chamber geometry on flame behavior in a DI diesel engine // Trans. Japan Soc. Mech. Eng., B. 1996. V. 62, N 660. P. 3213–3219.
20. Ebara T., Arai M. Behavior of impingement spray (1st Report, wall jet behavior and internal structure of spray) // Trans. Japan Soc. Mech. Eng., B. 1998. V. 64, N 626. P. 3510–3516.

21. Семенов В. И. Исследование индикаторного периода задержки воспламенения многотопливного дизеля с камерой в поршне // Изв. вузов. Машиностроение. 1970. № 1. С. 81–85.
22. Андреев Е. А., Нейман М. Б. Исследование условий воспламенения газовых смесей. III. Период индукции и область термического воспламенения смесей этана с кислородом // Журн. физ. химии. 1933. Т. IV, вып. 1. С. 33–40.
23. Борисов А. А., Кнорре В. Г., Пчельников А. В. и др. Воспламенение воздушных смесей пропана в широком диапазоне температур // Хим. физика. 2000. Т. 19, № 8. С. 68–73.
24. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. О кумулятивном механизме развития высоконапорной топливной струи // Двигателестроение. 1981. № 2. С. 5–8.
25. Бузуков А. А. Исследование развития струи жидкого топлива при высоконапорном импульсном впрыске в газовую среду. I. Физическая модель // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1999. Т. 40, № 1. С. 158–165.
26. Бузуков А. А. Исследование развития струи жидкого топлива при высоконапорном импульсном впрыске в газовую среду. II. Расчет и эксперимент // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1999. Т. 40, № 1. С. 166–173.
27. Buzukov A. A. Reduction of the limits of ignition of an air-fuel mixture upon the normal incidence of the jet onto a plane surface // Stability and Turbulence of Homogeneous and Heterogeneous Flow: Abstracts of Intern. Conf., Novosibirsk, Russia (April 21–23, 1999). Novosibirsk: Novosib. State Univ. of Civil Engineering, 1999. P. II–32.
28. Бузуков А. А. Особенности образования и движения кольцевых вихрей в воде // Журн. прикл. механики техн. физики. 1971. Т. 12, № 2. С. 153–160.
29. Senda J., Kobayashi M., Iwashita S., Fujimoto H. Modeling of diesel spray impinging on flat wall // Trans. Japan Soc. Mech. Eng. B. 1994. V. 60, N 578. P. 3563–3570.
30. Eames, Dalziel S. B. Resuspension by an impacting sphere // Physics of Fluids: Gallery of Fluid Motion. 1999. V. 11, N 9. P. S11.

Поступила в редакцию 15/1 2001 г.