

В. Г. Камалтдинов, В. А. Марков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ  
И РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ  
С НЕРАЗДЕЛЕННОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ  
НА РЕЖИМАХ ПУСКА**

*Рассмотрены особенности процессов подачи и распыливания топлива в дизелях автотракторного типа на режимах пуска. Приведены результаты экспериментальных исследований системы топливоподачи дизеля типа 6ЧН15/16 на пусковых режимах.*

**E-mail:** vkamaltdinov@yandex.ru

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, камера сгорания, пусковые режимы, форсунка, распылитель, распыливающие отверстия, струи распыливаемого топлива.

Одним из основных требований, предъявляемых к транспортным дизельным двигателям, является обеспечение надежного запуска при отрицательных температурах окружающей среды [1, 2]. Эксплуатация дизелей в осенне-зимний период в нашей стране, где более 50 % территории относится к климатической зоне со средней температурой января ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , представляет значительные трудности. Запуск двигателя в этих условиях является одной из наиболее трудоемких операций, связанных с большими затратами средств и времени. При запусках дизельных двигателей ежедневные простои техники из-за низкой температуры окружающего воздуха достигают 0,3...1,5 ч [1]. Поэтому улучшение пусковых качеств двигателей любыми экономически оправданными способами является важной задачей.

Известны различные способы улучшения пусковых качеств дизелей, среди которых необходимо отметить подогрев воздушного заряда на впуске, подогрев топлива, смазывающего масла и охлаждающей жидкости, улучшение низкотемпературных свойств смазывающего масла, установка пусковых свечей зажигания, увеличение мощности стартеров, оптимизация степени сжатия, подача на впуск легковоспламеняющихся жидкостей и др. [3–7]. Одним из эффективных способов облегчения пуска дизелей является совершенствование процессов подачи и распыливания топлива на пусковых режимах.

Для улучшения пусковых качеств дизеля необходимо обеспечить оптимальный характер протекания процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания не только на основных эксплуатационных режимах, но и на режиме пуска. При этом следует отметить, что пусковые режимы работы топливной аппаратуры дизеля имеют некоторые особенности. Для облегчения холодного пуска дизеля обычно увеличивают цикловую подачу топлива в 1,5–2,5 раза по сравнению с номинальным режимом и уменьшают угол опережения впрыскивания на

5–10° поворота коленчатого вала (п.к.в), что приводит, соответственно, к изменению характеристик распыливания и к понижению температуры воздушного заряда в цилиндре в период впрыскивания [8]. В результате требования к процессам впрыскивания и распыливания топлива на пусковых и основных эксплуатационных режимах могут оказаться противоречивыми.

Работы по совершенствованию процессов впрыскивания и распыливания топлива в дизелях с неразделенными камерами сгорания (КС) показывают, что определяющее влияние на смесеобразование на режиме пуска оказывают конструкция и техническое состояние форсунок и, в первую очередь, распылителей форсунок. Повышение пусковых качеств дизелей может быть достигнуто путем улучшения мелкости распыливания топлива, подаваемого в КС, и более рациональным распределением топлива по объему камеры при уменьшении доли топлива, попадающего на стенки цилиндра [8–10]. Для этого необходимо обеспечить согласование геометрических характеристик струй топлива с формой КС.

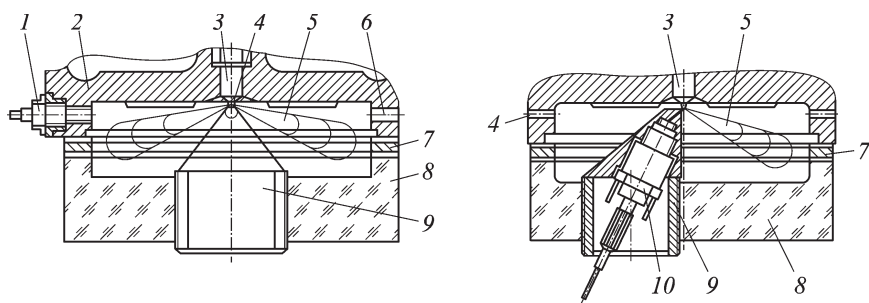
Характерным примером дизельного двигателя с неразделенной КС является дизель типа 6ЧН15/16, имеющий открытую КС в поршне, подобную КС “Гессельман”, но без выточек под клапаны. Для исследования геометрических характеристик струй распыливаемого топлива на пусковых режимах проведены безмоторные испытания топливной системы этого дизеля. Она включает многоплунжерный рядный топливный насос высокого давления (ТНВД) типа НК-12 с диаметром плунжеров  $d_{пл} = 12$  мм и их полным ходом  $h_{пл} = 10$  мм (в ТНВД использованы нагнетательные клапаны грибовидного типа диаметром  $d_{кл} = 8$  мм). Топливный насос соединен топливопроводами высокого давления со сливными форсунками закрытого типа с распылителями  $8 \times 0,3 \times 140^\circ$  (восемь распыливающих отверстий диаметром  $d_p = 0,3$  мм, выполненных под углом  $140^\circ$  к оси распылителя). Исследуемый дизель с описанной топливной аппаратурой применяется в качестве автотракторного двигателя, а также в качестве первичного двигателя дизель-генераторной установки [11, 12].

Следует отметить, что работа топливоподающей аппаратуры дизелей на пусковых режимах значительно отличается от ее работы на основных эксплуатационных режимах. Характерным для пусковых режимов является колебательное движение иглы форсунки, приводящее к так называемому дробящему впрыскиванию [8, 13–15]. При дробящем впрыскивании параметры состояния топлива перед отверстиями распылителя изменяются в зависимости от характера движения иглы. Поэтому колебания иглы оказывают влияние на параметры струй распыливаемого топлива и, следовательно, на процесс смесеобразования на режимах пуска.

Работа топливной системы дизеля типа 6ЧН15/16 исследовалась на универсальном безмоторном стенде с камерой постоянного объема – дизельной бомбой. Целью исследований являлось определение основных параметров процессов топливоподачи и распыливания при дробящем впрыскивании топлива на пусковых режимах в условиях, приближенных к реальным. Исследования особенностей топливоподачи и развития топливных струй на пусковых режимах проводились при одновременной регистрации на осциллографе Н117/1 давления в трубопроводе высокого давления, давления впрыскивания топлива (давления под иглой форсунки), подъема иглы форсунки и фотографировании топливных струй через прозрачное окно в дизельной бомбе. Схема регистрации параметров процессов подачи и распыливания топлива при экспериментальных исследованиях топливной системы дизеля типа 6ЧН15/16 представлена на рис. 1.

В процессе испытаний регистрация параметров процессов подачи и распыливания топлива проводилась через каждый градус п.к.в. при различных скоростных режимах (частотах вращения коленчатого вала двигателя  $n = 40 \dots 100 \text{ мин}^{-1}$ ) и противодавлениях в бомбе, имитирующих плотность реальной среды, в которую впрыскивалось топливо в дизеле при пуске (таблица).

Традиционный стробоскопический метод фоторегистрации струй распыливаемого топлива неприемлем для исследования топливной аппаратуры при низких пусковых частотах вращения коленчатого вала, так как в этом случае для достаточной экспозиции пленки процесс фоторегистрации затянется до нескольких минут. Это потребует точнейшего регулирования и высокой стабильности режима работы топливной аппаратуры, что практически обеспечить невозможно. К тому же образующийся при распыливании топлива туман не позволяет четко зарегистрировать границы топливных струй. Поэтому для получе-



**Рис. 1. Схема регистрации параметров процессов подачи и распыливания топлива при экспериментальных исследованиях топливной системы дизеля типа 6ЧН15/16:**

1 – электроразрядное устройство; 2 – головка цилиндра; 3 – форсунка; 4 – выпускное отверстие; 5 – струя распыливаемого топлива; 6 – впускное отверстие; 7 – проставка; 8 – прозрачная стенка; 9 – переходник; 10 – датчик давления PD-100 перед распыливающими отверстиями

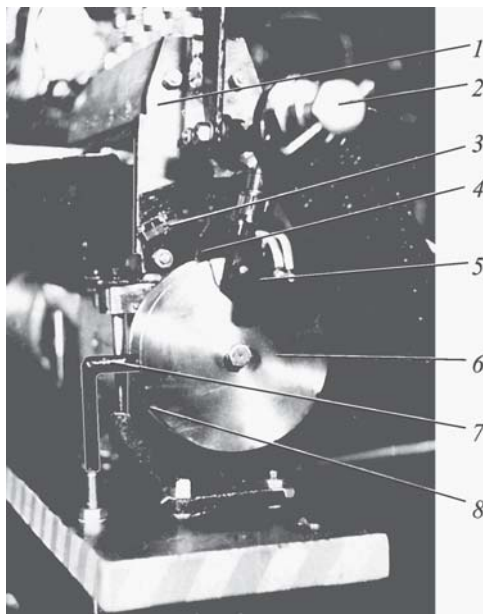
**Параметры воздуха в дизельной бомбе, имитирующие реальные параметры рабочего тела в цилиндре дизеля на пусковых режимах**

Параметры	Для дизеля с $\varepsilon_r = 8$ при $T_0 = 293$ К				Для дизеля с $\varepsilon_r = 12$ при $T_0 = 258$ К			
$n, \text{ мин}^{-1}$	40	60	80	100	40	60	80	100
$\Delta p_6, \text{ МПа}$	0,600	0,620	0,636	0,646	0,877	0,939	0,967	0,981
$\rho_6, \text{ кг/м}^3$	8,32	8,56	8,75	8,87	11,61	12,35	12,7	12,85

*Примечание:*  $n$  — частота вращения коленчатого вала;  $\Delta p_6$  — избыточное давление воздуха в дизельной бомбе;  $\rho_6$  — плотность воздуха в бомбе;  $\varepsilon_r$  — геометрическая степень сжатия;  $T_0$  — температура окружающей среды.

ния разовой экспозиции струй распыливаемого топлива в требуемый момент времени применялся импульсный источник с большой силой света. При этом продолжительность освещения рабочего объема дизельной бомбы составляла 0,1...0,2 мс, что соответствует менее 0,1° поворота кулачкового вала (менее 0,2° п.к.в.) на пусковых частотах вращения. Источник света устанавливался снаружи дизельной бомбы таким образом, чтобы при вспышке обеспечивалось освещение струй распыливаемого топлива через прозрачное окно.

При исследованиях процессов подачи и распыливания топлива на пусковых режимах температуры стенок дизельной бомбы и топливно-



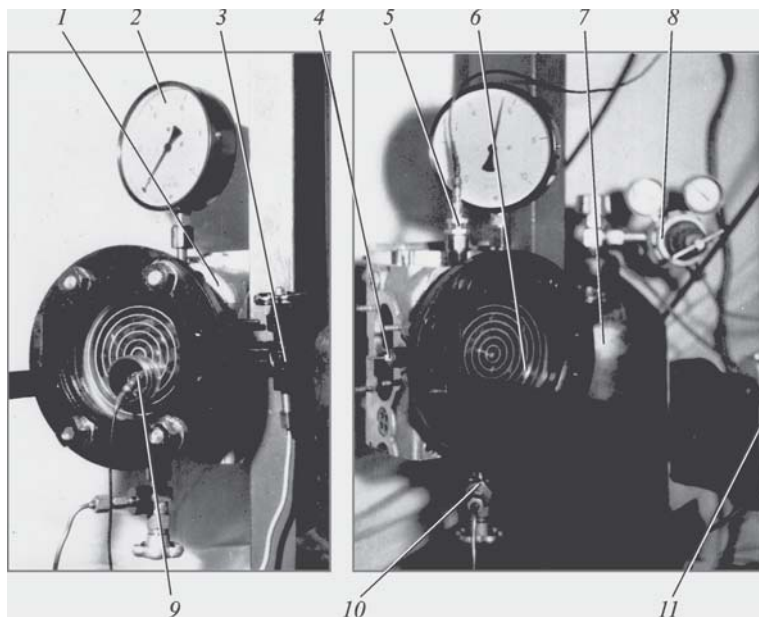
**Рис. 2. Установка электронного синхроконтakta:**

1 — ТНВД; 2 — упор рейки ТНВД; 3 — шкала; 4 — стрелка; 5 — синхроконттакт; 6 — диск с прорезью; 7 — рычаг регулировки момента разряда; 8 — кронштейн

воздушной смеси в ней составляли 291...293 К. Анализ динамики развития топливных струй осуществлялся в процессе топливоподачи от описанного ТНВД типа НК-12 при равномерном вращении его кулачкового вала. При этом проводилось осциллографирование процесса топливоподачи и фотографирование топливных струй. Момент освещения факелов устанавливался синхроконттактом (рис. 2): сначала он соответствовал началу впрыска топлива, в дальнейшем — каждому градусу п.к.в. вплоть до окончания впрыскивания. Перед переходом на следующий режим исследований рабочий объем дизельной бомбы тщательно продувался сжатым воздухом.

Камера сгорания постоянного объема изготовлена на базе отсека серийной головки цилиндра исследуемого дизеля (рис. 3). В ней установлены впускные и выпускные клапаны системы газораспределения дизеля и штатная форсунка с датчиком подъема иглы. После дообработки в головке дополнительно установлены краны 3 и 10 пневмосистемы, манометр 2, датчик 5 давления в рабочем объеме бомбы и датчик 9 давления перед распыливающими отверстиями распылителя, а также электроразрядное устройство 4.

Рабочий объем КС образован головкой цилиндра 2 (рис. 1) и стенкой 8 из прозрачного стекла для фото- и кинорегистрации. Подвод чистого сжатого воздуха осуществлялся через боковое впускное отверстие 6, а отвод отработанного рабочего тела и жидкого топлива — через выпускное отверстие 4. Распылитель форсунки 3 установлен таким образом, что ось одной из струй 5 распыленного топлива лежит в одной плоскости с осью электроразрядного устройства 1. Для получения темного фона при фотографировании струй распыливаемого топлива поверхность головки анодирована в черный цвет, тарелки клапанов системы газораспределения заворонены также в черный цвет. На внутренней поверхности стеклянной стенки рабочего объема КС нанесены концентрические окружности для измерения длины струй распыливаемого топлива.



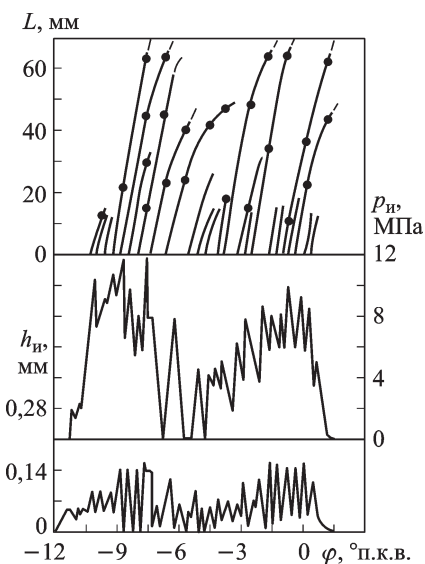
**Рис. 3. Камера сгорания постоянного объема:**

1 — головка цилиндра; 2 — манометр; 3, 10 — впускной и выпускной краны; 4 — электроразрядное устройство; 5 — датчик давления; 6 — прозрачная стенка; 7 — баллон со сжатым воздухом; 8 — воздушный редуктор; 9 — датчик давления перед распыливающими отверстиями; 11 — фотоаппарат



Регулирование давления сжатого воздуха, поступающего из баллона 7 (см. рис. 3) в КС, осуществлялось воздушным редуктором 8, впускным 3 и выпускным 10 кранами. Оно контролировалось с использованием манометра 2 и измерялось датчиком давления 5, сигнал от которого после усиления выводился на осциллограф.

Давление перед распыливающими отверстиями форсунки на пусковых режимах не превышало 10 МПа, поэтому оно измерялось пьезокварцевым датчиком PD-100. Датчик 10 (см. рис. 1) устанавливался в специальный переходник 9, герметично закрепленный в прозрачной стенке 8 дизельной бомбы. Полость в переходнике 9 над датчиком давления 10 имела минимальные размеры (объем полости в датчике  $V_d = 45 \text{ мм}^3$ ) и сообщалась с полостью под иглой форсунки через канал диаметром  $d = 0,8 \text{ мм}$  в переходнике и носке распылителя. Герметичность канала достигалась прижатием сферической поверхности носка распылителя в коническое углубление переходника. Переходник установлен таким образом, чтобы не препятствовать нормальному развитию и фотографированию пяти струй распыленного топлива из восьми.



**Рис. 4.** Законы изменения давления впрыскивания топлива (давления под иглой форсунки  $p_n$ ), подъема иглы форсунки  $h_n$  и длины топливных струй  $L$  в процессе топливоподачи по углу поворота коленчатого вала  $\varphi$  при пусковой частоте вращения  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$  (точками обозначены длины струй, замеренные на фотографиях в соответствующий момент времени)

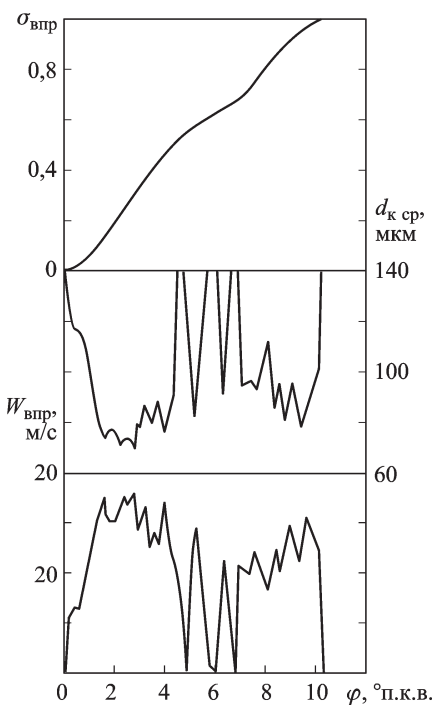
Результаты экспериментальных исследований процесса топливоподачи показали, что для исследуемой топливной аппаратуры при низких частотах вращения коленчатого вала характерно дробящее впрыскивание топлива. Причем происходит дробление не просто на отдельные впрыски (обычно 2...4 в зависимости от цикловой подачи и скоростного режима), следующие с некоторым интервалом, а каждый из них дробится еще на 5...7 микровпрысков. Это хорошо видно на осциллограммах подъема иглы форсунки  $h_n$  и давления под ней  $p_n$  (рис. 4). Ценность экспериментальных данных, представленных на рис. 4 состоит в том, что законы изменения давления перед распыливающими отверстиями получены при впрыскивании топлива не в объем с атмосферным давлением, а при противодавлениях, характерных для пусковых режимов дизеля, когда давления впрыскивания топлива и давления в КС соизмеримы.

Каждая серия микровпрысков, слившихся в отдельный впрыск, образовывалась в результате частого подъема и опускания иглы форсунки в течение времени, пока давление в трубопроводе превышало давление предварительной затяжки пружины форсунки  $p_{\text{фо}}$ . Очевидно, что микровпрыски становились возможными в результате пульсаций давления топлива в каналах трубопровода высокого давления и форсунки, а также колебаний подвижных деталей форсунки: иглы, штанги и пружины. Пиковые значения давления топлива под иглой форсунки составляли от 0,3...6,3 МПа (при  $n = 40 \text{ мин}^{-1}$ ) до 4,5...11,5 МПа (при  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ ).

Из представленных осциллограмм следует, что начало подъема иглы форсунки  $h_{\text{и}}$  практически совпадало с началом роста давления  $p_{\text{и}}$ , тогда как при ее посадке датчик некоторое время регистрировал остаточное давление  $p_{\text{и}}$ . В результате осциллограмма давления получалась более плавной, и в некоторых случаях давления отдельных микровпрысков сливались в непрерывную кривую давления  $p_{\text{и}}$ , показывая сплошной впрыск топлива. На осциллограмме подъема иглы форсунки также видна неполная посадка иглы — в запорном конусе оставалась щель шириной 0,01...0,03 мм. Эта величина находилась на уровне точности измерения  $h_{\text{и}}$  и не имела практического значения. Если ею пренебречь, то по осциллограмме подъема иглы форсунки можно более точно определить окончание микровпрыска. Эффект искажения давления  $p_{\text{и}}$ , по-видимому, объясняется запирианием топлива в полости над датчиком давления 10 (см. рис. 1) при посадке иглы форсунки. В результате датчик регистрировал давление не перед распыливающими отверстиями, а в полости, которая практически закрыта запорным конусом иглы форсунки.

На основе обработки осциллограмм давления топлива под иглой форсунки выполнены расчеты параметров процесса впрыскивания топлива по программе, разработанной на кафедре “Двигатели внутреннего сгорания” Южно-Уральского государственного университета. Они проводились с шагом, уменьшенным до 0,2° п.к.в., что позволило смоделировать прерывистый характер процесса впрыскивания топлива. Результаты расчета параметров процессов подачи и распыливания топлива на скоростном режиме с  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$  приведены на рис. 5.

Распределение топлива по объему КС оценивалось по результатам фоторегистрации топливных струй в определенный момент их развития (рис. 6). По осциллограммам изменения давления  $p_{\text{и}}$  под иглой форсунки и подъема иглы  $h_{\text{и}}$  (см. рис. 5) уточнялось число зарегистрированных на фотографиях микровпрысков, произошедших до момента фотографирования. Динамика подачи топлива в КС определялась расчетным путем с использованием упомянутой расчетной программы. Из фотоснимков на рис. 6 следует, что отдельные микровпрыски



**Рис. 5. Параметры процессов подачи и распыливания топлива на скоростном режиме с  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ :**

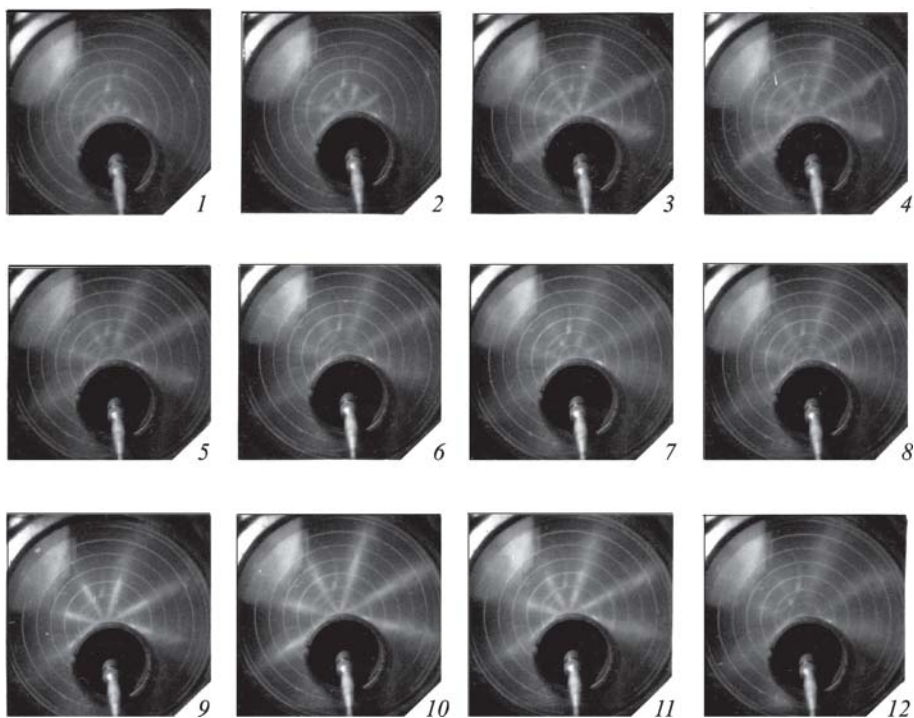
$\sigma_{\text{впр}}$  — закон подачи топлива (в относительных величинах);  $d_{\text{к ср}}$  — средний диаметр капель распыливаемого топлива;  $W_{\text{к}}$  — скорость движения капель на выходе из распыливающего отверстия

сливались в единую струю, т.е. каждая из восьми топливных струй образовывалась наложением нескольких микровпрысков. В результате обработки фотоматериалов и осциллограмм построены графики движения и распространения в КС отдельных порций топлива — струек, образовавших при микровпрыске. Зависимость их длины  $L$  от угла п.к.в.  $\varphi$  показана на рис. 4. Здесь точками обозначены длины струек от отдельных микровпрысков. Струйка топлива выходила из распыливающего отверстия с начальной скоростью, равной скорости движения капель, затем длина и ширина струи увеличивалась по мере подпитывания ее свежими каплями топлива. По окончании микровпрыска струйка отрывалась от носка распылителя и некоторое время ( $0,1 \dots 0,3 \cdot \text{мс}$ ) продолжала движение вперед. Затем скорость струйки замедлялась и она рассеивалась. Последующие струйки проходили те же стадии своего развития, что и первая.

На фотографиях (рис. 6) видно, что головная часть струй заметно светлее остальной, следовательно, в ней скапливалось несколько больше капель топлива, вылетевших с наибольшими скоростями примерно в середине процесса микровпрыска. В то же время в шлейфе струй оставалась значительная часть топлива вследствие различия скоростей движения капель в процессе микровпрыска. При наложении струй, благодаря различной их длине, после первой серии микровпрысков (фото 6, 7 на рис. 6) и по окончании впрыска (фото 12 на рис. 6) топливо почти равномерно распределялось в объеме, занимаемом топливной струей.

Топливная струя достигала максимальной длины, как правило, уже при первой серии микровпрысков. Например, при  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$  и противодавлении в бомбе  $\Delta p_6 = 0,64 \text{ МПа}$  длина струи становилась равной  $L = 70 \text{ мм}$  через  $4^\circ$  п.к.в. (через  $6,5 \text{ мс}$ ) после начала впрыска (см. рис. 4). При большем противодавлении ( $\Delta p_6 = 0,98 \text{ МПа}$ ) макси-





**Рис. 6.** Развитие топливных струй в процессе топливоподачи при частоте вращения коленчатого вала  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$  (показаны кадры, сделанные через каждый градус п.к.в.)

мальная длина факела уменьшилась до  $L = 65 \text{ мм}$ , скорость его движения также снизилась. Однако при этом топливо более равномерно распределялось в объеме струи.

Таким образом, результаты, полученные при экспериментальных исследованиях процесса топливоподачи и развития топливных струй, дают представление о строении факела на режимах с низкой частотой вращения коленчатого вала. Эти данные позволяют провести дальнейшие расчетные исследования распределения концентрации паров топлива и температуры топливно-воздушной смеси в КС при холодном пуске дизеля.

*Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о з л о в В. Е., К в а й т С. М., Ч и ж к о в Ю. П. Особенности эксплуатации автотракторных двигателей зимой. – М.: Колос, 1977. – 159 с.
2. Л е о н о в О. Б., П а т р а х а л ь ц е в Н. Н., Ф о м и н А. В. Проблема неустойчивого пуска дизеля и пути ее решения // Изв. вузов. Машиностроение. – 1998. – № 10–12. – С. 69–75.

3. Купершмидт В. Л. Средства облегчения пуска двигателей в холодных условиях // Тракторы и сельскохозяйств. машины. – 2001. – № 1. – С. 30–32.
4. Купершмидт В. Л., Эфрос В. В. Влияние степени сжатия на пусковые характеристики дизеля с неразделенной камерой сгорания // Тракторы и сельскохозяйств. машины. – 1968. – № 1. – С. 26–28.
5. Особенности рабочего процесса и теплообмена в быстроходных дизелях при пуске / А.К. Костин, Л.И. Михайлов, Ж.О. Сазаев и др. // Двигателестроение. – 1981. – № 12. – С. 46–48.
6. Патрахальцев Н. Н., Соболев И. А., Казачков С. А. Совершенствование пусковых и динамических характеристик дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха // Двигателестроение. – 2009. – № 3. – С. 32–36.
7. Способ оценки необходимой прокрутки коленчатого вала при пуске двигателя / Е.Х. Кадышевич, М.А. Миселев, А.К. Костин и др. // Двигателестроение. – 1980. – № 6. – С. 51–53.
8. Марков В. А., Девянин С. Н., Мальчук В. И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 360 с.
9. Характеристики впрыска и распыливания топлива на пусковых режимах дизеля / С.Н. Девянин, В.И. Мальчук, В.А. Марков и др. // Грузовик &. – 2004. – № 7. – С. 22–27.
10. Девянин С. Н., Марков В. А., Тихонов А. В. Исследования работы топливной аппаратуры дизеля при пуске // Грузовик &. – 2004. – № 8. – С. 32–34. – № 9. – С. 24–28. – № 10. – С. 6–9.
11. Файнлейб Б. Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
12. Камалтдинов В. Г., Абелиович Е. В. Экспериментальные исследования особенностей топливоподачи и распределения топлива по камере сгорания на режимах пуска дизеля с объемным смесеобразованием // В сб.: Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения. Челябинск: Изд-во Южно-Уральского гос. ун-та, 2006. – С. 323–328.
13. Трусов В. И., Дмитренко В. П., Масляный Г. Д. Форсунки автотракторных дизелей. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.
14. Толшин В. И., Трусов В. И. Влияние трения в паре игла–распылитель форсунки дизеля на характер автоколебаний // Двигателестроение. – 1980. – № 6. – С. 35–37.
15. Толшин В. И., Трусов В. И., Девянин С. Н. Работа форсунок транспортных дизелей на режиме пуска // Двигателестроение. – 1984. – № 10. – С. 50–52.

Статья поступила в редакцию 22.03.2010

Вячеслав Гилимянович Камалтдинов родился в 1953 г., окончил в 1976 г. Челябинский политехнический институт им. Ленинского комсомола. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Двигатели внутреннего сгорания” Южно-Уральского государственного университета. Автор 22 научных работ в области рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания.

V.G. Kamaltdinov (b. 1953) graduated from the Chelyabinsk Polytechnic Institute n. a. Lenin's Komsomol in 1976. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of "Internal Combustion Engines" department of the South-Ural State University. Author of 22 publications in the field of working process of internal combustion engines.

