

УДК 66.069.83; 544.772

Экспериментальное исследование характеристик распыливания авиационного керосина системой пневматического впрыска высокого давления*

**М.Д. Гарипов¹, Р.Ф. Зиннатуллин¹, А.А. Мелков¹, Э.М. Халилов¹,
В.А. Шаяхметов¹, О.А. Гобызов²**

¹*Уфимский университет науки и технологий*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: garry76@mail.ru

В представленной работе исследуются дисперсный состав и геометрические параметры струи, формируемой разработанной системой пневматического впрыска. В работе применялись две оптические методики исследования струи, основанные на обработке изображений, полученных методом Shadow Photography. Исследование эволюции импульсных струй проводилось с использованием высокоскоростной видеокамеры с макрообъективом, а дисперсный состав струи изучался с помощью цифровой камеры с дальнедействующим микроскопом и подсветкой, состоящей из люминесцентного фоновых экрана и импульсного лазера. Исследования проводились при соотношении массовых расходов воздуха к топливу 1 и 0,16. Значения среднего заулеровского диаметра составили 13 и 18 мкм при соотношении массовых расходов воздуха к топливу 1 и 0,16 соответственно.

Ключевые слова: пневматическая система впрыска, авиационный керосин, метод Shadow Photography, исследование дисперсного состава, глубина проникновения струи, средний заулеровский диаметр.

Введение

Одной из актуальных задач в области авиационных поршневых двигателей, возникшей по ряду причин [1–6], включающих безопасность и логистику перевозок, является необходимость перевода двигателей на использование тяжелых видов топлив (авиационный керосин и дизельное топливо). К наиболее простым решениям этого вопроса относится использование дизелей, обладающих к тому же высокой топливной экономичностью. Однако дизели имеют высокое соотношение массы к мощности [7, 8]. С точки зрения соотношения массы к мощности лучшим решением является перевод двигателей с искровым зажиганием на тяжелые топлива. Однако, несмотря на определенные попытки организации сгорания тяжелых топлив с помощью традиционных для бензиновых двигателей рабочих процессов, удовлетворительно решить данный

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FEUE-2023-0007 (УУНТ).

вопрос в четырехтактных двигателях не удалось. Это объясняется двумя основными причинами: худшей испаряемостью тяжелых топлив, что затрудняет образование воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка, и меньшим октановым числом тяжелых топлив, что ведет к возникновению детонации.

Для возможности образования воспламеняемой смеси при использовании тяжелых топлив качество распыливания, одним из основных показателей которого является средний заутеровский диаметр (SMD или D_{32}), должно быть выше, чем в традиционных для бензиновых двигателей топливных системах [4, 5, 9], в которых D_{32} превышает 120 мкм [10].

Высокое качество распыливания позволяют получать топливные системы, применяемые в дизелях, где за счет комбинации высокого давления впрыска (до 200 МПа и выше) и малого диаметра отверстий распылителя (менее 0,2 мм) удастся получить величину SMD , лежащую приблизительно в диапазоне 20–30 мкм [11–13]. Для возможности работы в требуемых для поршневых двигателей с искровым зажиганием диапазонах частот вращения вала и нагрузок (особенно при неоднородном распределении топлива в камере сгорания) желательно, чтобы форсунка и свеча зажигания были расположены близко друг к другу [14]. При этом следует иметь в виду, что струи, формируемые традиционными топливными системами поршневых двигателей, во-первых, имеют вблизи сопла высокую концентрацию жидкой фазы, что ведет к снижению тепломассообменных процессов, а соответственно, и доли испаренного топлива вблизи сопла, даже в случае мелкодисперсного распыливания, и, во-вторых, для зоны вблизи распылителя характерно наличие высоких градиентов концентраций и скоростей на боковой границе струи, это приводит к тому, что зона с воспламеняемой концентрацией испаренного топлива становится узка для организации искрового воспламенения [14]. Вышеизложенное можно проиллюстрировать, например, с помощью результатов исследований [11, 12], в которых оптическая диагностика с определением границ образов зарегистрированных на изображении капель стала возможной лишь в области, близкой к боковой границе струи (расстояние от оси струи 6–8 мм) и расположенной на осевом расстоянии от 50 до 112 мм от сопла. Поэтому неудивительно, что в многотопливных дизелях с вспомогательным искровым зажиганием фирм MAN, Deutz и других [15–19] для воспламенения применяются многоискровые системы зажигания повышенной мощности. Однако если рассматривать искровое зажигание не как вспомогательный, а как основной способ воспламенения, то его желательно осуществлять единичным искровым разрядом (как в бензиновых двигателях).

Высокое качество распыливания, но при более низких концентрациях жидкой фазы в струе, позволяют получать также форсунки с пневматическим (или паровым) распыливанием [20–24]. Как показала практика, именно использование пневмораспыливания в комбинации с подачей струи непосредственно в камеру сгорания позволяет решить вопрос образования воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка [25, 26]. В качестве примера может служить процесс смесеобразования, осуществленный разработчиками фирмы Orbital [27–30]. Использование в этом процессе непосредственного впрыска топливовоздушной смеси позволяет получить высокое качество распыливания тяжелых топлив, в том числе авиационного керосина ($D_{32} \approx 17–20$ мкм [25, 26]), что, в свою очередь, позволяет организовать воспламеняемую смесь в районе искрового разряда [31, 32]. Основным недостатком топливной системы Orbital является низкое давление впрыска (около 0,6 МПа), которое не позволяет задействовать поздние углы

опережения впрыска для организации бездетонационного сгорания [33]. Это не является критичным в условиях двухтактных двигателей с относительно низкими средними эффективными давлениями и низкими степенями сжатия либо двигателей с малыми рабочими объемами. Однако для четырехтактных двигателей, имеющих большее среднее эффективное давление либо большую степень сжатия, такая особенность системы оказывается критичной [33].

В работах [33–35] описывались форсунки с пневмораспыливанием, в которых давление впрыска существенно выше значений, реализуемых в системе фирмы Orbital. В указанных устройствах смесь воздуха и топлива сжимается в поршневом компрессоре, после чего подается через канал и распылитель непосредственно в камеру сгорания двигателя. Присутствие жидкости в линии высокого давления позволяет реализовать высокое давление впрыска без существенного усложнения конструкции, поскольку дает возможность обойтись без системы охлаждения сжатого воздуха. Основное внимание в работах [33–35] уделялось процессам внутри топливной системы и особенностям организации сгорания. В частности, была подтверждена возможность искрового воспламенения и бездетонационного сгорания авиационного керосина в условиях двухтактных и четырехтактных двигателей. Характеристики распыливания в указанных работах не изучались. В связи с этим в настоящей работе проводится экспериментальное исследование дисперсного состава, глубины проникновения и ширины струи авиационного керосина, формируемой рассматриваемой системой пневматического впрыска.

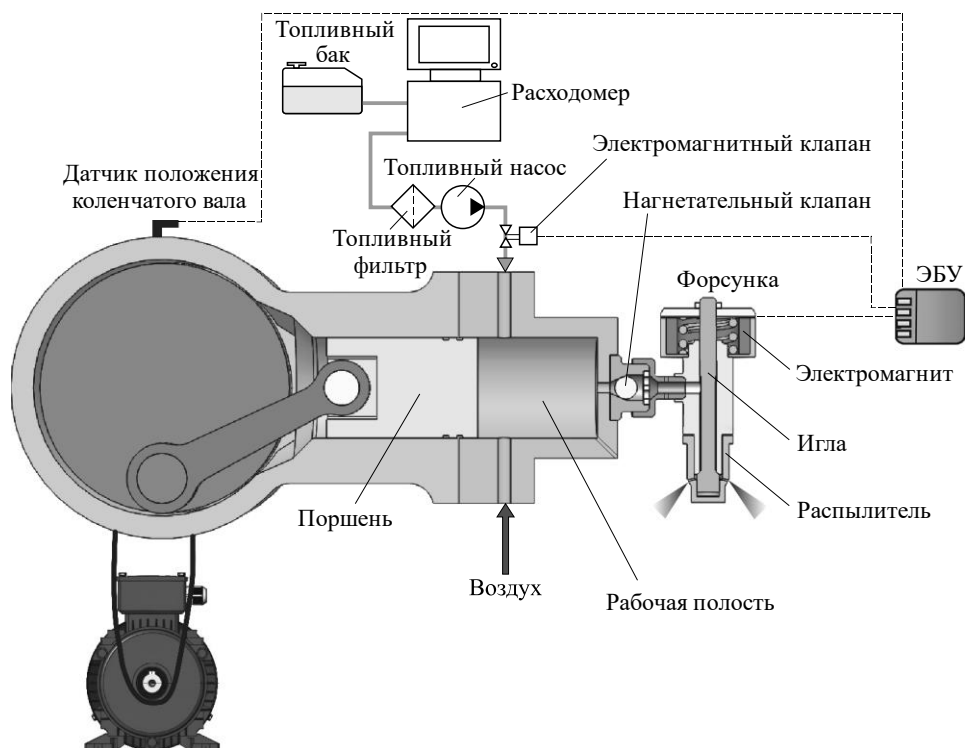
1. Объект исследования и методика проведения эксперимента

1.1. Конструкция системы впрыска

На рис. 1 представлена схема системы пневматического впрыска, описанной ранее в работах [33–35]. Воздух и топливо подаются в рабочую полость поршневого компрессора, где происходит их совместное сжатие. Расход топлива регулируется с помощью электромагнитного клапана, установленного на входе в рабочую полость. Расход воздуха не регулируется. В результате сжатия топливовоздушная смесь, пройдя через нагнетательный клапан, поступает в форсунку. Впрыск топливовоздушной смеси осуществляется после подачи управляющего сигнала с электронного блока управления (ЭБУ) на электромагнит форсунки. Продолжительность сигнала составляет 500 мкс. Впрыск прекращается после снятия управляющего сигнала и закрытия иглы форсунки под действием пружины. Форсунка имеет распылитель с тремя сопловыми отверстиями диаметром 0,6 мм. Для обеспечения синхронной работы системы относительно положения поршня компрессора использовался датчик положения коленчатого вала. На стенде для привода коленчатого вала компрессора применяется асинхронный двигатель.

1.2. Методы измерений

В работе использовались две оптические методики исследования струи. Обе методики предполагали проведение экспериментов в условиях окружающей среды. В первом случае проводилась высокоскоростная визуализация распространения струи методом Shadow Photography (SP). Регистрация ее изображений (теней) осуществлялась на ярком фоне с использованием высокоскоростной видеокамеры с макрообъективом. Для фоновой подсветки струи применялся импульсный диодный осветитель. На рис. 2 представлен



Асинхронный электродвигатель

Рис. 1. Схема системы пневматического впрыска авиационного керосина.

вид установки для высокоскоростной визуализации распространения струи. Ее характеристики приведены в табл. 1. Подобная методика высокоскоростной визуализации распространения струи рассматривалась в работах [4, 25, 32].

Вторая методика исследования предназначалась для определения дисперсного состава струи методом SP с использованием системы диагностики двухфазных потоков «ПОЛИС» компании ООО «Сигма-Про». В качестве источника света применялся

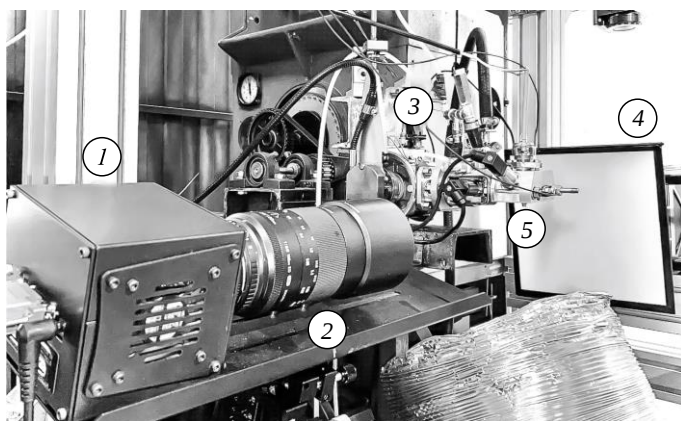


Рис. 2. Установка высокоскоростной визуализации распространения струи.

1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — макрообъектив,
3 — система пневматического впрыска,
4 — импульсный диодный источник, 5 — распылитель.

Таблица 1

Характеристики установки высокоскоростной визуализации распространения струи

Наименование параметра	Значение
Высокоскоростная видеокамера	Evercam HS 10000-32-M
Макрообъектив	Samyang 100 mm F2.8 ED UMC MACRO
Мощность излучения импульсного диодного источника, Вт	38
Длительность импульса диодного источника, мкс	5
Область измерения, мм	80,7 x 27,2
Частота съемки, кадр/с	16000 (10000 на полном кадре)
Размер кадра, пикс.	1280 x 432 (1280 x 1024 — полный кадр)
Пространственное разрешение, мкм/пикс.	63
Число кадров для каждого режима исследования, шт.	200

люминесцентный фоновый экран (кювета, заполненная раствором люминофора «Родамин 6Ж»), освещаемый расфокусированным лучом импульсного лазера. Регистрация теневых картин проводилась с помощью цифровой камеры с дальнедействующим микроскопом, обеспечивающим оптическое увеличение 6,9:1. Описание схемы с применением люминесценции фонового экрана можно найти в работах [36, 37]. Описанный подход дает возможность регистрировать «вмороженные» образы капель даже при высокой скорости их движения и большом оптическом увеличении. На рис. 3 представлен вид установки для определения дисперсного состава топливовоздушной струи. Характеристики системы диагностики «ПОЛИС» для данного исследования приведены в табл. 2. Для цифровой обработки полученных теневых изображений использовался алгоритм, реализованный в программе ActualFlow [38]. Он включает в себя этап пороговой бинаризации и алгоритм определения местоположения и диаметра сферических капель. Порог бинаризации подбирался индивидуально для каждого режима исследования в зависимости от среднего размера капель в рассматриваемой области. Также проводилась фильтрация капель по минимальному размеру и схожести с круглой формой. Схожие методики определения дисперсного состава применялись и в других работах, где исследовались характеристики распыливания жидкостей [22, 36–40].

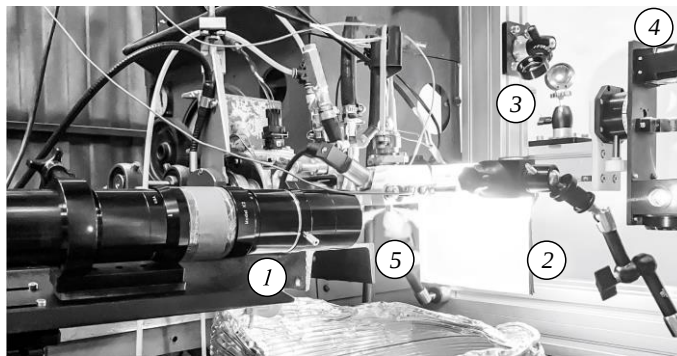


Рис. 3. Установка для определения дисперсного состава топливовоздушной струи.

1 — дальнедействующий микроскоп, 2 — фоновый экран с люминесцентным покрытием, 3 — дихроичное зеркало, 4 — формирующая расфокусированный луч оптика, 5 — спрей.

Таблица 2

Характеристики системы диагностики двухфазных потоков «ПОЛИС»
для определения дисперсного состава топливовоздушной струи

Наименование параметра	Значение
Минимальный размер определяемых капель, мкм	от 3,2
Тип лазера	Импульсный Nd: YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet)
Ширина импульса, нс	6–8
Задержка между импульсами, мкс	0,5
Энергия импульса, мДж	200
Длина волны, нм	535
Камера	Imperx B2320M
Фотоматрица	ПЗС-матрица KAI-04050
Дальнодействующий микроскоп	Infinity K2 Distamax CF-3 NTX
Оптическое увеличение	6,9:1
Частота съемки, кадр/с	8
Область измерения, мм	1,9×1,4
Размер кадра, пикс.	2352×1768 (4MP)
Пространственное разрешение, мкм/пикс.	0,8
Число кадров для каждого режима исследования, шт.	500

2. Режимные параметры и порядок проведения эксперимента

В качестве топлива в работе применялся авиационный керосин ТС-1. Исследования проводились при частоте вращения компрессора 750 мин⁻¹. Расход воздуха не регулировался. Массовый расход топлива выбирался в соответствии с режимами работы экспериментального двигателя [35] (см. Приложение А) на холостом ходу и полной нагрузке и составлял 0,135 и 0,815 кг/ч соответственно. При этом массовое расходное соотношение воздуха к топливу (Air to Liquid Ratio (ALR)) принимало значения 1 и 0,16 соответственно. Давление впрыска не регулировалось. Его значение менялось самопроизвольно в зависимости от расхода топлива и составляло в среднем 54 и 114 МПа при ALR, равном 1 и 0,16 соответственно. Измерение массового расхода топлива выполнялось с помощью расходомера AVL Fuel Balance 4210, основные технические характеристики которого приведены в табл. 3.

При высокоскоростной визуализации распространения струи съемка начиналась с момента генерации и передачи ЭБУ управляющего сигнала на электромагнит форсунки. Для каждого режима работы топливной системы было проведено пять съемок, в каждой из которых фиксировалось по 150 кадров за один впрыск.

При обработке полученных кадров дополнительно определялась глубина проникновения и ширина струи. Процедура обработки, изображенная на рис. 4, состояла из удаления

Таблица 3

Основные технические характеристики расходомера
AVL Fuel Balance 4210

Наименование	Значение
Рекомендуемый диапазон измерения, кг/ч	0 ÷ 150
Систематическая погрешность измерения, %	0,12
Максимальная частота измерений, Гц	10

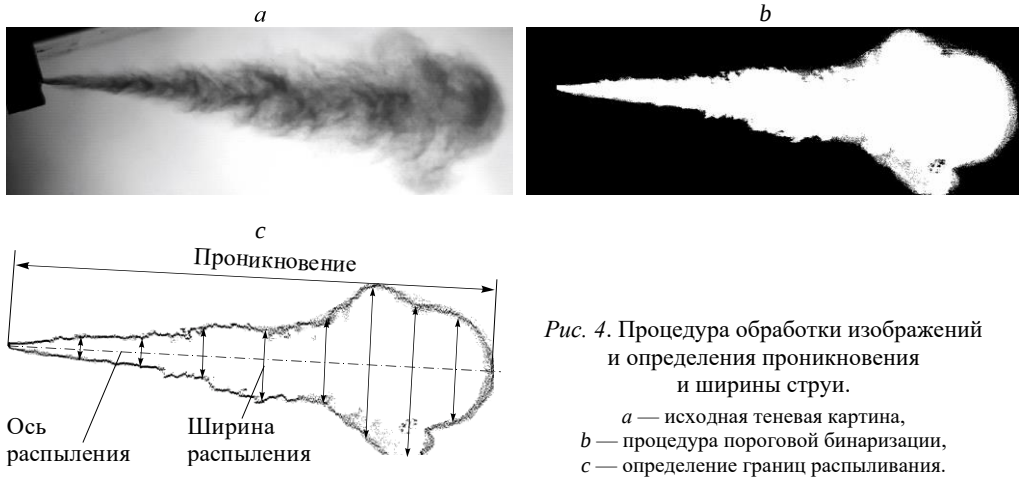


Рис. 4. Процедура обработки изображений и определения проникновения и ширины струи.

a — исходная теневая картина,
b — процедура пороговой бинаризации,
c — определение границ распыливания.

фонового шума и пороговой бинаризации теневой картины. Из бинаризованного изображения в дальнейшем были получены границы распыливания, на основе которых путем подсчета пикселей измерялись необходимые геометрические параметры струи. Аналогичный способ обработки, соответствующий требованиям стандарта SAE J2715 («Измерение и характеристика распыления бензиновых топливных форсунок»), рассматривался в работах [4, 25, 32, 41]. Глубина проникновения струи определялась путем измерения расстояния от сопла до переднего фронта струи. Также определялась скорость переднего фронта струи. Результаты измерений соответствуют рассчитанным средним значениям по пяти испытаниям, проведенным для каждого режима.

Исследование дисперсного состава выполнялось на расстоянии около 38 мм от сопла на оси струи (схематически показано на рис. 5). Это связано с тем, что вблизи сопла велика концентрация жидкой фазы, а процесс диспергирования не завершен, в связи с этим возможности оптической диагностики на этом участке ограничены. Выбранное отдаление, как показала практика, позволяет провести оптическую диагностику с определением границ образов зарегистрированных на изображении капель.

В представленном исследовании в качестве объектива использовался дальнедействующий микроскоп, позволяющий добиться оптического увеличения 6,9:1. При таком увеличении 1 пиксель соответствует 0,8 мкм. Основным источником ошибки при измерении диаметра капель в данном методе является погрешность определения границы образа капли, оцениваемая на уровне 0,5 пиксель [21, 22], что в условиях настоящей работы соответствует 0,4 мкм и представляет собой естественное ограничение дискретизации изображения. Поскольку погрешность может возникать на двух противолежащих границах капли, суммарную погрешность определения размера следует оценивать как

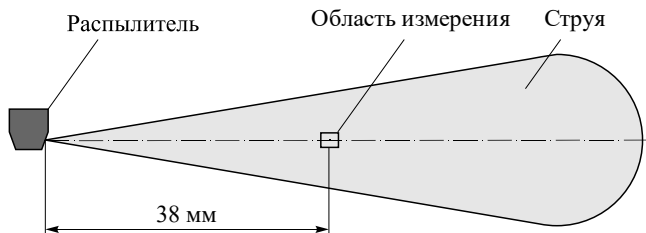


Рис. 5. Схема расположения области измерения относительно сопла.

не превышающую 1 пикс. В работах [21, 22] минимальный размер, который учитывался при обработке результатов эксперимента, составлял 1 мкм. Однако во избежание включения в статистику капель, размер которых определяется с большой относительной погрешностью, капли, имеющие диаметр менее 3,2 мкм (4 пикс.), не учитывались при определении дисперсного состава струи.

Для оценки изменения среднего заутеровского диаметра (D_{32}) с течением времени регистрация дисперсного состава проводилась в разные моменты впрыска. Вся продолжительность впрыска была разбита на 11 временных позиций. Регистрация с интервалом 1 мс начиналась с момента появления переднего фронта струи в области измерения и заканчивалась в момент прекращения движения потока (моменты определялись по высокоскоростной визуализации). В каждой из временных позиций было зафиксировано по 500 кадров, полученных из разных впрысков.

Дополнительно проводилось исследование распределения капель по размеру и определение D_{32} за весь впрыск путем совокупного анализа всех полученных кадров (в сумме 5500 кадров на каждый режим работы).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Исследование эволюции струи

Анализ кадров распространения струи показал, что ее развитие в радиальном направлении сходно для двух режимов: при $ALR = 1$ и $ALR = 0,16$.

На рис. 6 и 7 представлена эволюция струй при различных массовых расходных соотношениях воздуха к топливу. Как можно видеть из рисунков, независимо от ALR струя

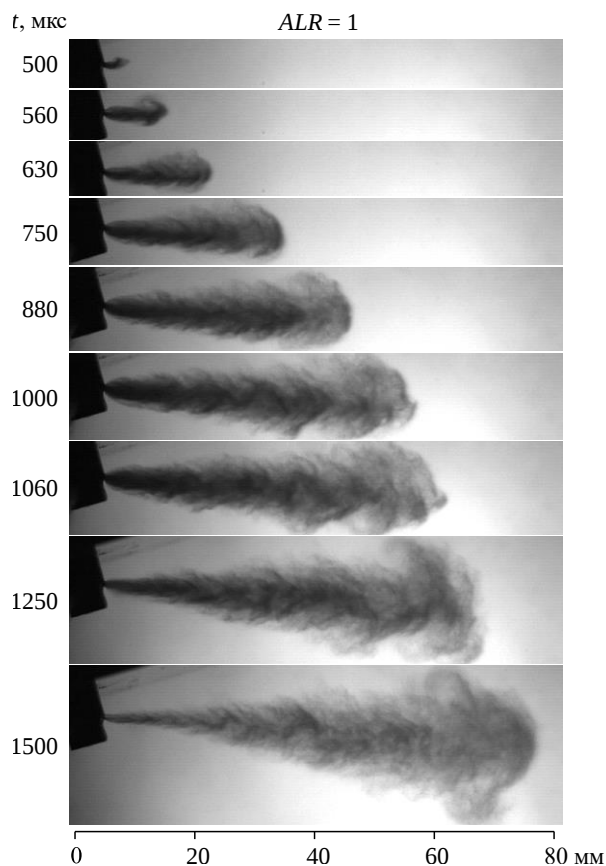


Рис. 6. Эволюция струи авиационного керосина при $ALR = 1$.

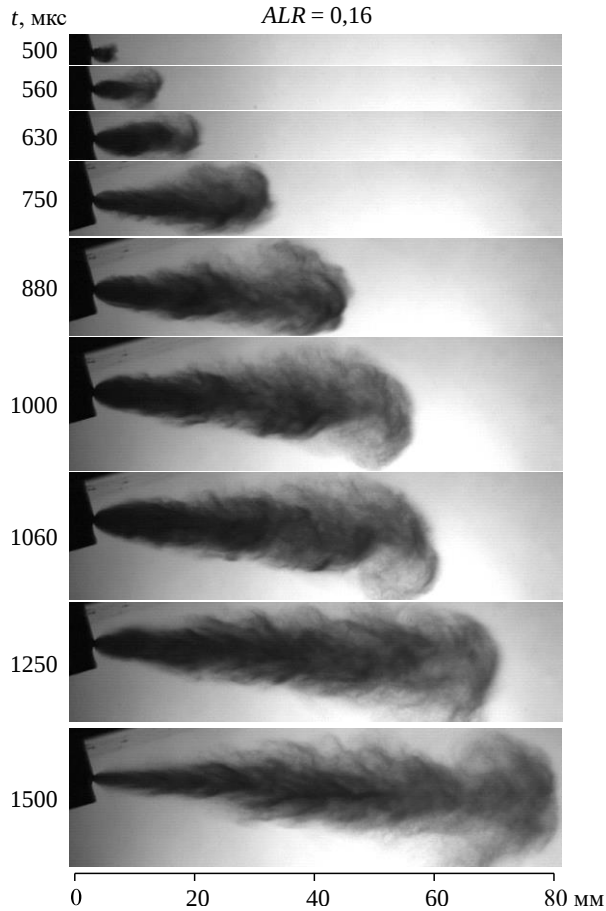


Рис. 7. Эволюция струи авиационного керосина при $ALR = 0,16$.

начинает формироваться приблизительно через 500 мкс после подачи управляющего сигнала на форсунку. На рис. 8 отдельно представлены кадры струи в момент завершения впрыска. Видно, что при $ALR = 1$ впрыск завершается без явного образования крупных капель. При $ALR = 0,16$ к концу впрыска отчетливо видно образование крупных капель, происходящее во время закрытия иглы.

На рис. 9 показано изменение глубины проникновения струи в зависимости от времени по пяти впрыскам, где для каждого из ALR дополнительно представлены кривые, аппроксимированные полиномом второго порядка. Там же приведены значения среднеквадратического отклонения (СКО). Видно, что в течение приблизительно первой трети впрыска распространение переднего фронта струи не зависит от ALR . На рис. 10 представлены графики скорости распространения переднего фронта струй, полученные по аппроксимационным кривым глубины проникновения (рис. 9).

На рис. 11 и 12 можно видеть ширину струй в момент приближения переднего фронта к концу области измерения (1375 мкс после подачи управляющего сигнала на форсунку), где точками обозначены экспериментальные данные, полученные из пяти различных впрысков. Сплошные линии соответствуют среднеарифметическим значениям этих данных, а штриховые — среднеквадратическому отклонению. Резкое расширение струи возле сопла объясняется формированием сверхзвуковой «бочки» (отчетливо

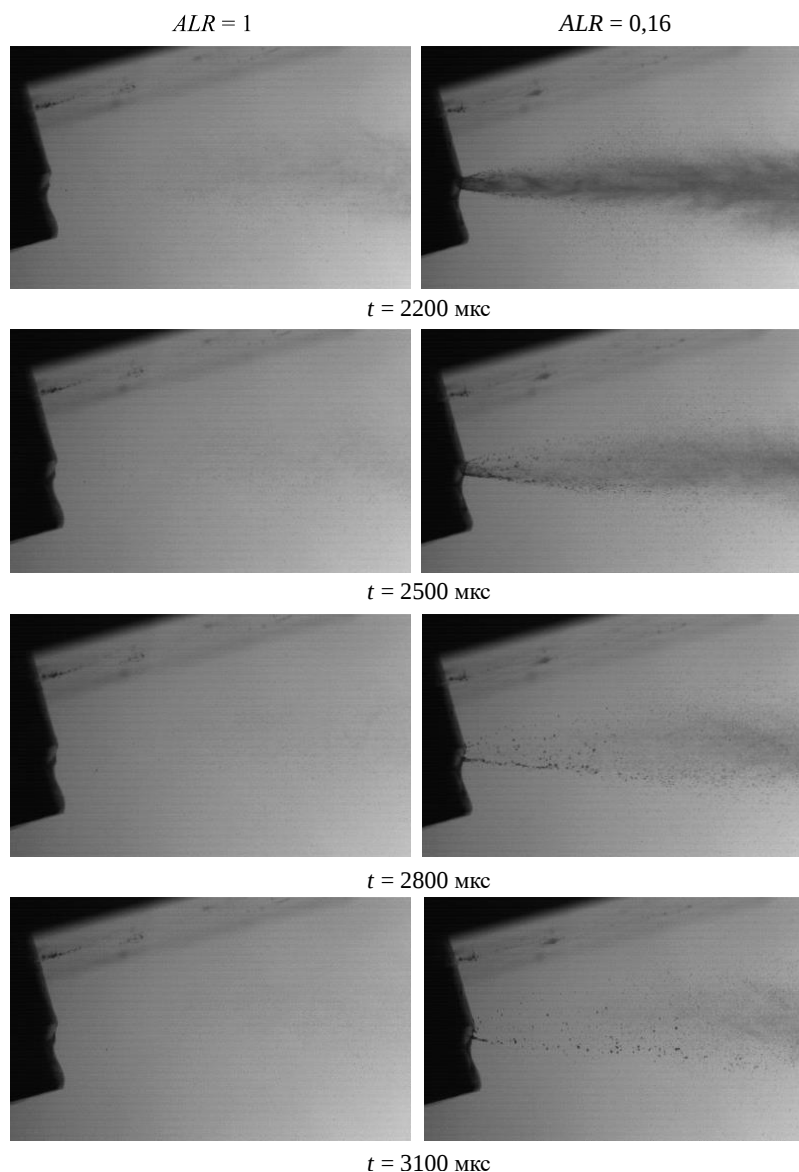


Рис. 8. Сравнение струй в конце впрыска при различных ALR .

видно также на рис. 6 и 7), геометрия которой зависит от ALR и перепадов давления между выходным сечением сопла и окружающей средой.

3.2. Исследование распределения капель по размеру

Динамику изменения дисперсного состава в процессе впрыска можно видеть на рис. 13, где представлены фрагменты обработанных теневых изображений. Также на рис. 14 представлены графики изменения D_{32} в течение впрыска. При $ALR = 1$ средний заутеровский диаметр в процессе впрыска меняется относительно слабо: от 10 мкм в начале впрыска до 16 мкм в конце. При $ALR = 0,16$ в течение приблизительно первых двух третей времени впрыска средний заутеровский диаметр меняется от 12 до 19 мкм. В последней трети времени впрыска при $ALR = 0,16$ наблюдается появление относительно

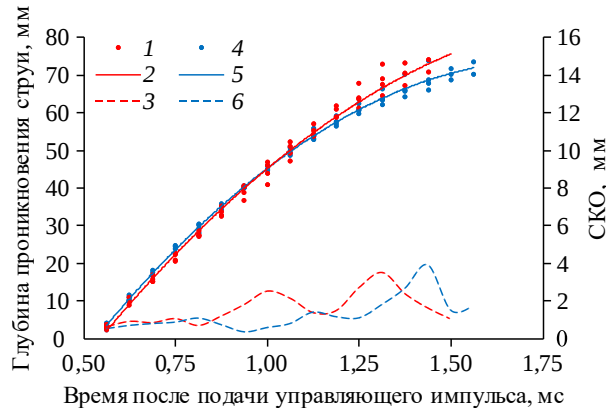


Рис. 9. Глубина проникновения струй.

1 — экспериментальные данные ($ALR = 0,16$), 2 — экспериментальные данные ($ALR = 1$),
 3 — аппроксимационная кривая ($ALR = 0,16$), 4 — аппроксимационная кривая ($ALR = 1$),
 5 — среднеквадратическое отклонение ($ALR = 0,16$), 6 — среднеквадратическое отклонение ($ALR = 1$).

редких крупных капель, которые были зарегистрированы и при высокоскоростной съемке (рис. 8). Как уже отмечалось, образование крупных капель в конце впрыска происходит во время закрытия иглы.

На рис. 15 представлена гистограмма количественного распределения капель по размеру за все время впрыска, построенная в результате совокупного анализа всех полученных кадров (в сумме 5500 кадров на каждый режим работы). Там же приведена кумулятивная функция распределения капель, из которой видно, что 90 % капель имеют диаметр менее 15 мкм при $ALR = 1$ и менее 16 мкм — при $ALR = 0,16$. Максимальный диаметр капель ($D_{\max}$) составил 47 мкм при $ALR = 1$ и 182 мкм — при $ALR = 0,16$. Средний заутеровский диаметр составил 13 и 18 мкм соответственно. Всего было обработано 220221 капля при $ALR = 1$ и 457218 — при $ALR = 0,16$.

На рис. 16 представлено дифференциальное и интегральное объемное распределение капель по размеру. Их значения приведены в табл. 4, где Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} — эквивалентный диаметр капли, меньше которого находится 10, 50 и 90 % капель по объему соответственно. Из рис. 15, 16 видно, что при $ALR = 0,16$ мелкие капли присутствуют в большом количестве, в то время как крупные капли, хоть и немногочисленны, все же составляют значительную часть капель по объему.

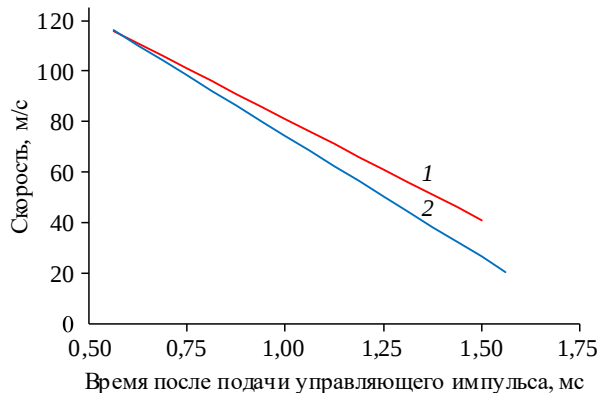


Рис. 10. Скорость переднего фронта струй.

1 — $ALR = 0,16$, 2 — $ALR = 1$.

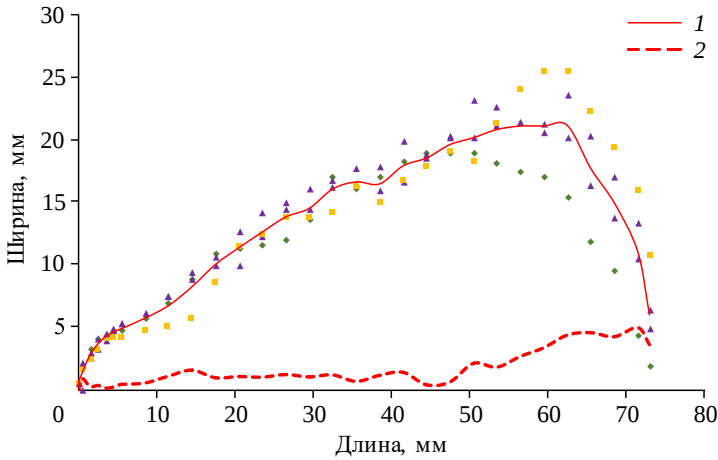


Рис. 11. Ширина струи при $ALR = 1$.

1 — среднеарифметическое отклонение,
2 — среднеквадратическое отклонение.

Как уже отмечалось выше, ранее авторами были исследованы характеристики двигателя с описываемой системой впрыска [33–35]. В этих работах была экспериментально подтверждена возможность образования воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка за счет использования рассматриваемой системы впрыска в комбинации с подачей струи (или струй) непосредственно в камеру сгорания. Неизвестными оставались характеристики распыливания, которые определены в настоящей работе. Следует отметить, что полученные значения D_{32} близки к значениям, формируемым системой с пневматическим распыливанием фирмы Orbital, у которой в сходных условиях окружающей среды значение D_{32} составляет от 17 до 20 мкм [25, 26]. Однако в отличие от системы Orbital, в предлагаемом подходе реализованы высокие давления впрыска, что позволяет задействовать поздние углы опережения впрыска для обеспечения бездетонационного сгорания авиационного керосина в условиях четырехтактного двигателя [35]. Однако отметим, что при $ALR = 0,16$ в конце впрыска образуются крупные капли, что

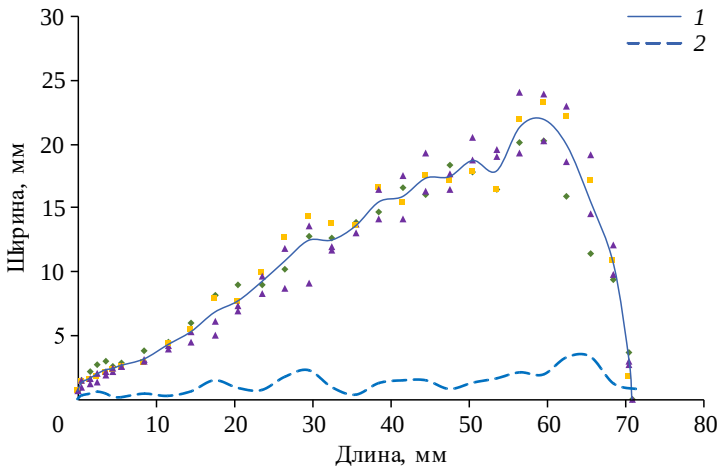


Рис. 12. Ширина струи при $ALR = 0,16$.

Обозначения см. на рис. 11.

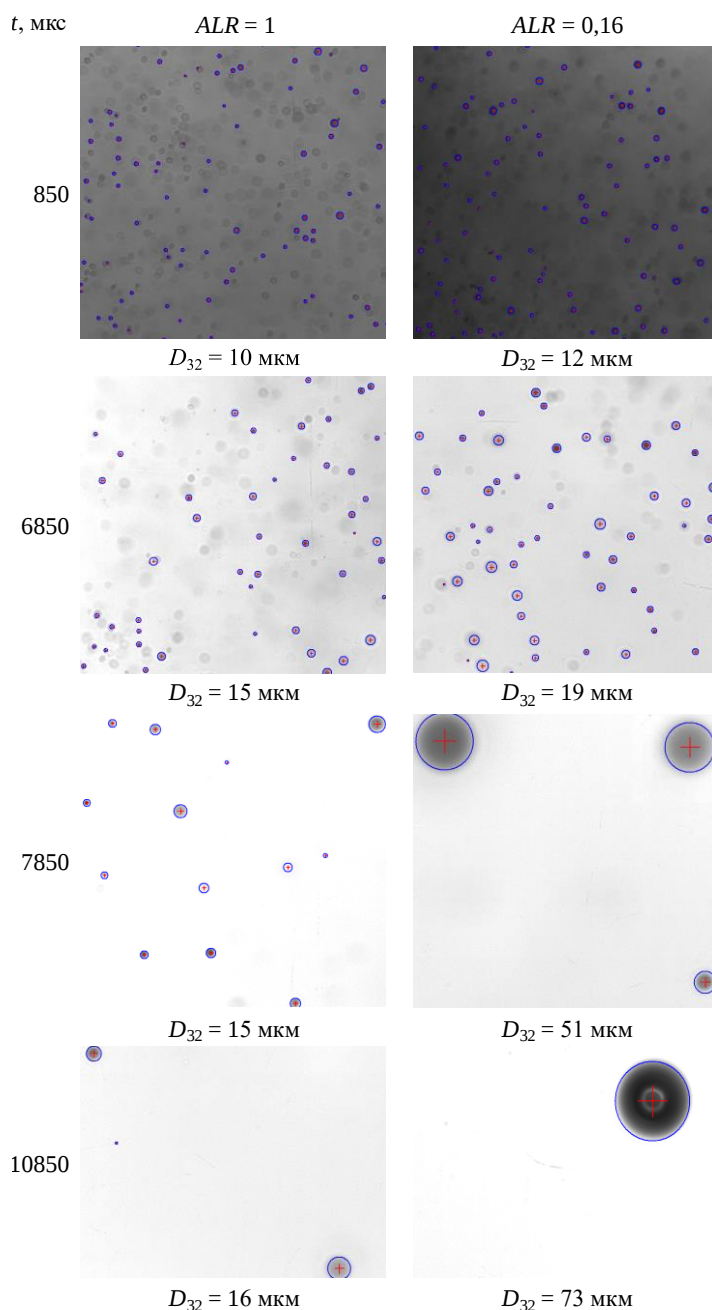


Рис. 13. Фрагменты теневой съемки струи.

может быть причиной затягивания сгорания и ухудшения топливной экономичности [35]. Решение вопроса устранения образования крупных капель в конце впрыска является резервом для улучшения топливной экономичности двигателя и предметом дальнейших исследований.

Одним из способов устранения образования крупных капель в конце впрыска является использование больших значений ALR . Он представляет собой наиболее простое решение вопроса, но приводит к увеличению расхода воздуха и соответственно —

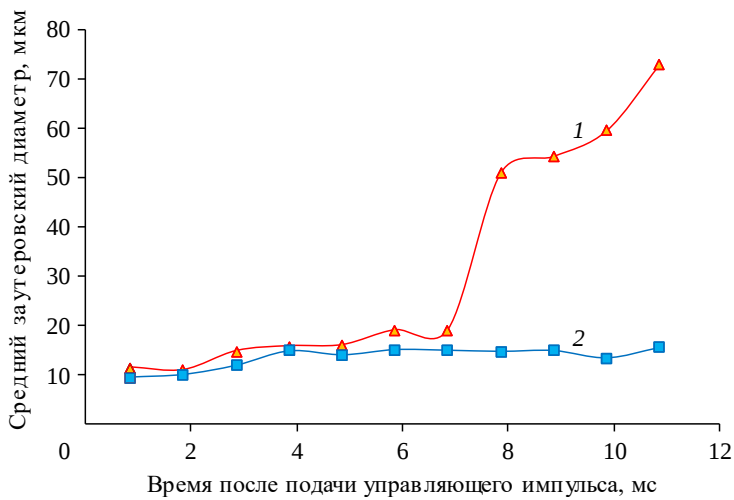


Рис. 14. Изменения среднего заутеровского диаметра от времени.
1 — ALR = 0,16, 2 — ALR = 1.

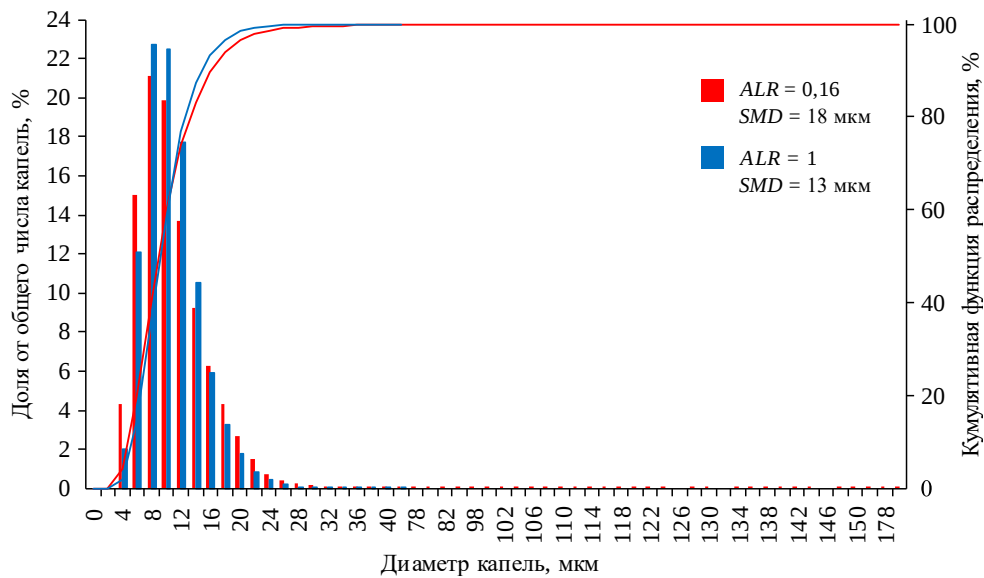


Рис. 15. Гистограмма распределения капель по размеру.

к увеличению мощности, затрачиваемой на функционирование системы впрыска. Нахождение компромиссного между обозначенными факторами решения также может являться направлением будущих работ.

Таблица 4
Результаты анализа распределения капель, мкм

ALR	D_{32}	$D_{\max}$	$Dv10$	$Dv50$	$Dv90$
1	13	47	9	14	21
0,16	18	182	10	19	86

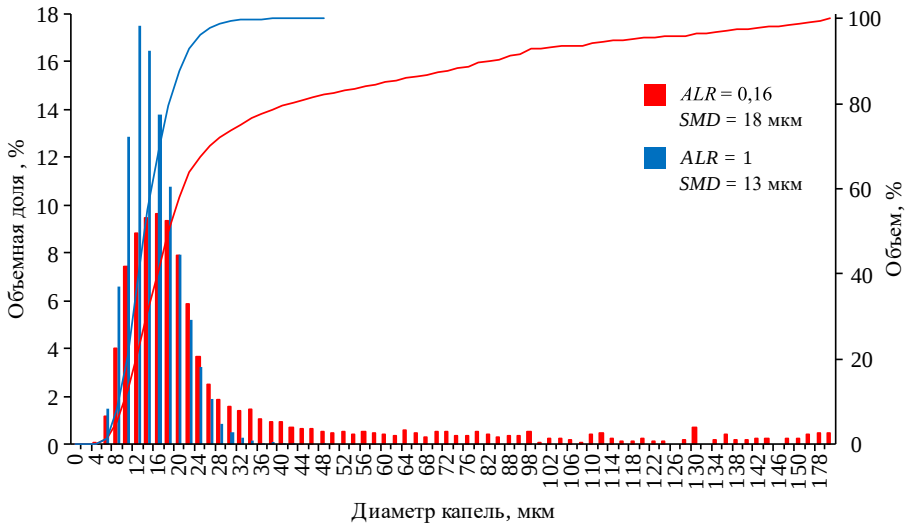


Рис. 16. Дифференциальное (левая ось) и интегральное (правая ось) объемное распределение капель по размеру.

Заключение

Представлены результаты экспериментального исследования дисперсного состава, глубины проникновения и ширины струи авиационного керосина, формируемой разработанной системой пневматического впрыска. В работе применялись две оптические методики исследования струи, основанные на обработке изображений, полученных методом Shadow Photography.

Исследование эволюции струи проводилось с помощью высокоскоростной видеокамеры с частотой съемки 16 кГц, для фоновой подсветки которой использовался импульсный диодный осветитель.

При определении дисперсного состава струи регистрация теневых картин выполнялась с помощью цифровой камеры с дальнедействующим микроскопом, обеспечивающим оптическое увеличение 6,9:1. В качестве источника света использовался люминесцентный фоновый экран, освещаемый расфокусированным лучом импульсного лазера.

Комбинация двух оптических методик позволила детально исследовать дисперсный состав и геометрические параметры струи. Наличие в исследуемой системе пневматического впрыска более низкой концентрации жидкой фазы в струе, по сравнению с традиционными топливными системами, позволило провести оптическую диагностику методом SP с определением границ образов капель на оси потока. Результаты исследований при массовом расходном соотношении воздуха к топливу (ALR) 1 и 0,16 показали следующее.

1. Средний заутеровский диаметр составил 13 мкм при $ALR = 1$ и 18 мкм — при $ALR = 0,16$. Полученные значения близки к значениям, формируемым системой с пневматическим распыливанием авиационного керосина фирмы Orbital. Однако исследуемая система за счет реализации высоких давлений впрыска позволяет задействовать поздние углы опережения впрыска для обеспечения бездетонационного сгорания авиационного керосина в условиях четырехтактного двигателя [35].

2. Большее значение среднего заутеровского диаметра на режиме $ALR = 0,16$ в основном является следствием наличия крупных капель, формируемых в конце впрыска

(при закрытии иглы форсунки). В течение времени первой половины впрыска значение среднего заутеровского диаметра при $ALR = 0,16$ не превышает 16 мкм.

3. Развитие струи в радиальном направлении сходно для двух режимов ALR . Максимальная ширина струи для режима $ALR = 0,16$ составила 25,4 мм, а для режима $ALR = 1$ — 24 мм.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение качества распыливания за счет устранения образования крупных капель в конце впрыска, что является резервом для улучшения топливной экономичности двигателя.

Приложение А

Выбранные массовые расходы топлива соответствуют режимам работы экспериментального двигателя, согласно работе [35]. В этой работе было проведено исследование рабочего процесса четырехтактного атмосферного двигателя YANMAR L-100N с рассматриваемой системой пневматического впрыска авиационного керосина. Основные технические данные двигателя приведены в табл. 5. Схема реализации рабочего процесса на четырехтактном двигателе с пневматической системой впрыска представлена на рис. 17.

Массовый расход воздуха, создаваемый системой пневматического впрыска, во многом определяется объемом рабочей полости. Чем больше объем, тем выше ALR и, следо-

Таблица 5
Основные технические данные двигателя

Количество цилиндров, шт.	1
Диаметр цилиндра, мм	86
Ход поршня, мм	75
Степень сжатия	13,5
Рабочий объем, см ³	435

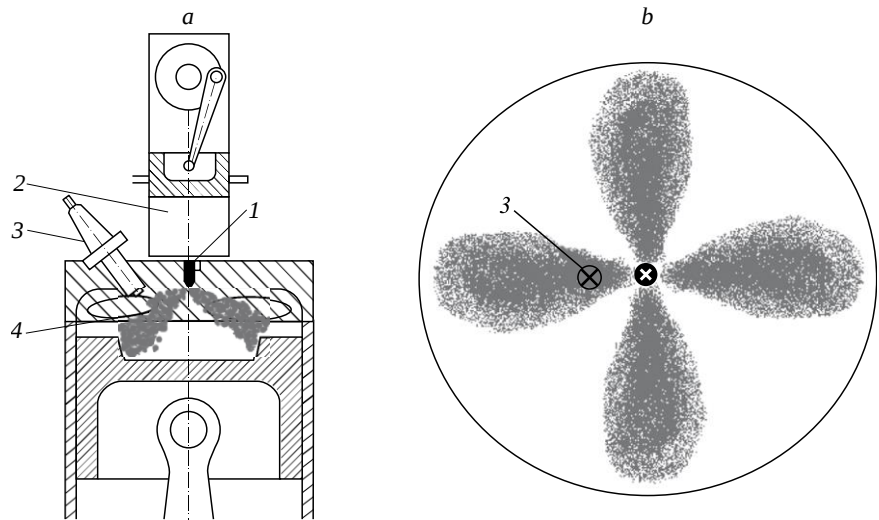


Рис. 17. Схема реализации рабочего процесса на четырехтактном двигателе.
а — общая схема системы пневматического впрыска; б — ориентация топливоздушных струй в камере сгорания (вид сверху); 1 — форсунка, 2 — рабочая полость системы пневматического впрыска, 3 — свеча зажигания, 4 — топливоздушная струя.

вательно, выше качество распыла. Однако размещение системы пневматического впрыска в головке блока цилиндров двигателя ограничивает объем рабочей полости. С учетом вышеизложенного, удалось достичь такого объема рабочей полости, при которой ALR на холостом ходу равно 1, а на полной нагрузке оно равно 0,16.

Подробно с процессами смесеобразования и сгорания, формируемыми рассматриваемой системой пневматического впрыска, можно ознакомиться в работах [33 – 35] и в других работах авторов.

Список литературы

1. Ward M.A. Spark-ignited diesel engine // Defense Technical Information Center, 1990. 108 p.
2. Ning L., Duan Q., Wei Y., Zhang X., Yang B., Zeng K. Experimental investigation on combustion and emissions of a two-stroke DISI engine fueled with aviation kerosene at various compression ratios // Fuel. 2020. Vol. 259. P. 116224-1–116224-10.
3. Ning L., Duan Q., Wei Y., Zhang X., Yu K., Yang B., Zeng K. Effects of injection timing and compression ratio on the combustion performance and emissions of a two-stroke DISI engine fuelled with aviation kerosene // Applied Thermal Eng. 2019. Vol. 161. P. 114124-1–114124-10.
4. Hu J., Liu B., Zhang C. et al. Experimental study on the spray characteristics of an air-assisted fuel injection system using kerosene and gasoline // Fuel. 2019. Vol. 235. P. 782–794.
5. Du B., Zhao Z. Numerical prediction of the spray from an air-assisted fuel injection system via Eulerian–Lagrangian approach // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 6718–6732.
6. Liu R., Wei M., Yang H. Cold start control strategy for a two-stroke spark ignition diesel-fuelled engine with air-assisted direct injection // Applied Thermal Eng. 2016. Vol. 108. P. 414–426.
7. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. 2nd. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p.
8. Mollenhauer K., Tschoeke H. Handbook of Diesel Engines. 2010. 636 p.
9. Chen X., Wang H., Song C., Wang W., Huang J., Liu S., Wei Y. Investigation of the cold-start engine performance at a low temperature for an engine fuelled with alternative fuel // Proc. Inst. Mech. Eng. Part D. 2013. Vol. 228, Iss. 3. P. 310–318.
10. Anand C.T.N., Deshmukh D., Madan M.A., Ravikrishna V.R. Laser-based spatio-temporal characterisation of port fuel injection (PFI) sprays // Intern. J. Spray and Combustion Dynamics. 2010. Vol. 2, No. 2. P. 125–149.
11. Goldsworthy L., Bong C., Brandner P.A. Measurements of diesel spray dynamics and the influence of fuel viscosity using PIV and shadowgraphy // Atomization and Sprays. 2011. Vol. 21, No. 2. P. 167–178.
12. Zhan C., Feng Z., Ma W., Zhang M., Tang C., Huang Z. Experimental investigation on effect of ethanol and di-ethyl ether addition on the spray characteristics of diesel/biodiesel blends under high injection pressure // Fuel. 2018. Vol. 218. P. 1–11.
13. Palani R., Nallusamy N., Pitchandi K. Spray characteristics of diesel and derivatives in direct injection diesel engines with varying injection pressures // J. Mech. Sci. Technol. 2015. Vol. 29, No. 10. P. 4465–4471.
14. Flow and combustion in reciprocating engines // Eds. C. Arcoumanis, T. Kamimoto. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 420 p.
15. Needham J.R. Influence of fuel variables on the operation of automotive open and pre-chamber diesel and spark ignited stratified charge engines: a literature and syncrude study covering petroleum derived fuels. Ricardo Consulting Engineers Ltd., 1980. 286 p.
16. Mitchell E., Cobband J., Frost R. Design and evaluation of a stratified charge multifuel military engine // SAE Technical Paper. No. 1968. P. 118–131.
17. Meurer J., Uraub A. Development and operational results of the MAN FM combustion system // SAE Technical Paper. 1969. No. 690255.
18. Finsterwalder G. A new deutz multifuel system // SAE Technical Paper. 1972. No. 720103.
19. Phatak R.G., Komiyama K. Investigation of a spark-assisted diesel engine // SAE Technical Paper. 1983. No. 830588.
20. Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and sprays. 2nd edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017. 283 p.
21. Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П., Шапыпов О.В., Лещевич В.В. Распыление жидкого топлива высокоскоростной струей водяного пара // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 4. С. 655–658.
22. Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Лещевич В.В., Шимченко С.Ю. Характеристики топливного спрея при распылении паровой струей // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 4. С. 609–616.

23. Бойко В.М., Нестеров А.Ю., Поплавский С.В. Диспергирование жидкости в высокоскоростных коаксиальных газовых струях // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 3. С. 417–431.
24. Nuti M., Pardini R., Caponi D. FAST injection system: PIAGGIO solution for ULEV 2T SI engines // SAE Technical Paper. 1997. No. 970362-1–970362-14.
25. Du B., Zhao Z., Yang Z., Wang S. Experimental investigation on the effects of fuel–air mixture temperature on the air-assisted kerosene spray characteristics // Fuel. 2022. Vol. 324. P. 124487-1–124487-14.
26. Wu H., Zhang F., Zhang Z. Fundamental spray characteristics of air-assisted injection system using aviation kerosene // Fuel. 2021. Vol. 286, Pt. 2. P. 119420-1–119420-13.
27. Cathcart G., Zavier C. Fundamental characteristics of an air-assisted direct injection combustion system as applied to 4-stroke automotive gasoline engines // SAE Technical Papers. 2000. No. 2000-01-0256.
28. Cathcart G., Tubb J. Application of air assisted direct fuel injection to pressure charged gasoline engines // SAE Technical Papers. 2002. No. 2002-01-0705.
29. Boretti A.A., Jin S.H., Zakis G., Brear M.J. et al. Experimental and numerical study of an air assisted fuel injector for a DISI engine // SAE Technical Paper. 2007. No. 2007-01-1415.
30. Boretti A., Jin S-H., Brear M. et al. Experimental and numerical study of a spark ignition engine with air-assisted direct injection // Proc. of the Inst. of Mechanical Engineers. Part D. J. Automobile Eng. 2008. P. 1103–1119.
31. Cathcart G., Dickson G., Ahern S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines // SAE Technical Paper. 2005. No. 2005-32-0065.
32. Du B., Zhao Z. Experimental investigation on the effects of injection parameters on the air-assisted diesel spray characteristics // Intern. J. Aerospace Eng. 2022. Vol. 2022. P. 6814732-1–6814732-21.
33. Garipov M.D., Rezvanov D.R., Zinnatullin R.F. Experimental study of spark-ignited two-stroke heavy fuel engine // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Industrial Eng. Springer, Cham, 2019. P. 469–485
34. Garipov M.D., Zinnatullin R.F., Shayakhmetov V.A. The numerical study of compressed-air atomizer for spark-ignited jet fuel engine // Procedia. Engng. 2017. Vol. 206. P. 305–311.
35. Гарипов М.Д., Зиннатуллин Р.Ф., Мелков А.А., Шаяхметов В.А., Халилов Э.М., Сакулин Р.Ю. Экспериментальное исследование возможности бездетонационного сгорания авиационного керосина в четырехтактном двигателе с искровым воспламенением // Двигателестроение. 2024. № 1 (295). С. 81–91.
36. Gobysov O., Ryabov M., Bilsky A. Study of deformation and breakup of submillimeter droplets spray in a supersonic nozzle flow // Applied Sci. 2020. Vol. 10, No. 18. P. 6149-1–6149-16.
37. Гарипов М.Д., Хафизов А.Г., Зиннатуллин Р.Ф., Мелков А.А., Шаяхметов В.А., Гобызов О.А. Экспериментальное исследование размеров и скорости капель, формируемых системой пневматического впрыска воды во впускную систему поршневого двигателя внутреннего сгорания, с применением оптических методов // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 6. С. 1177–1188.
38. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7, вып. 3. С. 79–85.
39. Watanabe H., Okazaki K. Visualization of secondary atomization in emulsified-fuel spray flow by shadow imaging // Proc. of the Combustion Institute. 2013. Vol. 34. P. 1651–1658.
40. Goldsworthy L., Bong C., Brandner P.A. Measurements of diesel spray dynamics and the influence of fuel viscosity using PIV and Shadowgraphy // Atomization and Sprays. 2011. Vol. 21, No. 2. P. 167–178.
41. Gao H., Zhang F., Zhang Z., Wang S., Wu H. Trajectory deviation of target jet of air-assisted spray under different conditions // Fuel. 2019. Vol. 249. P. 252–263.

*Статья поступила в редакцию 8 мая 2024 г.,
после доработки — 29 мая 2024 г.,
принята к публикации 13 июня 2024 г.*