

Экспериментальное исследование импульсных струй авиационного керосина, формируемых системой пневматического впрыска двигателя внутреннего сгорания

М.Д. ГАРИПОВ,
д-р техн. наук,
Р.Ф. ЗИННАТУЛЛИН,
А.А. МЕЛКОВ,
аспирант,
Э.М. ХАЛИЛОВ,
аспирант,
В.А. ШАЯХМЕТОВ
(УУНУТ, Уфа)
emil.halilov.93@mail.ru

Исследуются характеристики распыливания импульсных струй авиационного керосина, формируемых системой пневматического впрыска высокого давления. Рассматривается конфигурация с удлиненным до 500 мм каналом высокого давления, что обусловлено требованиями компоновки. Проанализировано влияние удлиненно-го канала на дисперсный состав и межцикловую воспроизводимость характеристик импульсных струй. Показано, что данная система пневматического впрыска обеспечивает высокое качество распыливания с приемлемой межцикловой воспроизводимостью.

Воспламенение, детонация, керосин, распыливание, струя, искра

Перевод авиационных поршневых двигателей на использование тяжелых видов топлива (авиационный керосин, дизельное топливо) представляет собой актуальную, но до настоящего времени не полностью решенную задачу [1–7]. Хотя использование дизелей в этих целях считается одним из наиболее простых подходов, оно сопряжено с существенным недостатком, обусловленным высоким соотношением массы двигателя к его мощности [7–9]. С учетом данного соотношения более предпочтительное решение – перевод на тяжелые топлива двигателей с искровым зажиганием. Однако решить данный вопрос с помощью традиционных для бензиновых двигателей процессов смесеобразования и сгорания не удалось. Это объясняется, во-первых, худшей испаряемостью тяжелых топлив, что затрудняет образование воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка; во-вторых, меньшим октановым числом тяжелых топлив, что приводит к возникновению детонации [7].

Одним из способов предотвращения детонации является организация сгорания предварительно не перемешанных или частично перемешанных топливовоздушных смесей, для чего организуется впрыск топлива в камеру сгорания на такте сжатия. Чем ниже октановое число применяемого топлива, тем позже осуществляется впрыск. При использовании тяжелых топлив углы опережения впрыска приближаются к значениям, характерным для дизелей, что обуславливает необходимость размещения форсунки и свечи зажигания на минимально возможном расстоянии друг от друга [7]. При этом в районе искрового разряда топливо должно быть в газовой фазе, а смесь должна находиться в концентрационных пределах воспламенения. Одним из ключевых факторов, обеспечивающих данные условия, является высокое качество распыливания [7, 10]. Высокое качество достигается, например, использованием форсунок с пневматическим распыливанием [11, 12]. Согласно результатам работ [13–15] именно использование пневмораспыливания является эффективным решением для обеспечения формирования воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка при минимальном расстоянии между форсункой и свечой зажигания [13–15]. Значения среднего заутеровского диаметра (D_{32}) у описываемых систем составили 17–20 мкм [14, 15].

Основным недостатком этих подходов является низкое давление впрыска (примерно 0,6 МПа), для чего приходится выбирать ранние углы опережения впрыска. В свою очередь, это требует снижения степени сжатия (приблизительно до семи) во избежание детонации.

В работе [7] проведены исследования и подтверждена возможность искрового воспламенения и бездетонационного сгорания авиационного керосина в двигателе с экспериментальными рабочими процессами и степенью сжатия 13,5. Экспериментальные рабочие процессы включают впрыск топлива под

высоким давлением (11,4 МПа) экспериментальной топливоподающей аппаратурой с пневматическим распыливанием и воспламенение искровым разрядом периферийной части одной из струй. В описываемой топливной аппаратуре смесь воздуха и топлива сжимается в поршневом компрессоре, после чего подается через короткий канал (диаметром 2 мм, длиной около 10 мм) и распылитель непосредственно в камеру сгорания двигателя. Характеристики распыливания данной системы впрыска исследованы в работе [10]. Значения среднего заутеровского диаметра составили 13–18 мкм. Несмотря на то что характеристики распыливания удовлетворяют требованию формирования воспламеняемой смеси в районе искрового разряда при поздних углах опережения впрыска, компоновка такой системы в головке цилиндра затруднена. Перспективным решением указанной проблемы может стать конструкция, предусматривающая размещение в головке цилиндра исключительно форсунки. Однако в этом случае возникает необходимость соединения компрессора и форсунки более длинным каналом высокого давления (в настоящей работе длиной около 500 мм).

Использование длинного канала обуславливает возрастание влияния на структуру течения процессов, протекающих непосредственно в канале, в частности, взаимодействия пленки с газокпельным потоком и коагуляции капель. Эти процессы могут повлиять как на качество распыливания, так и на межцикловую воспроизводимость характеристик струй, что может негативно влиять на формирование воспламеняемой смеси в районе искрового разряда. В связи с этим целью настоящей работы является определение возможности формирования воспламеняемой смеси в районе искрового разряда при поздних углах опережения впрыска исследованием дисперсного состава и межцикловой воспроизводимости характеристик импульсных струй авиационного керосина, формируемых системой пневматического впрыска с длинным каналом высокого давления.

На рис. 1 представлена принципиальная схема системы впрыска с пневматическим распыливанием, которая в основном совпадает со схемой, описанной в работе [10]. Отличительной чертой представленной конструкции является наличие между нагнетательным клапаном и форсункой канала высокого давления длиной 500 мм.

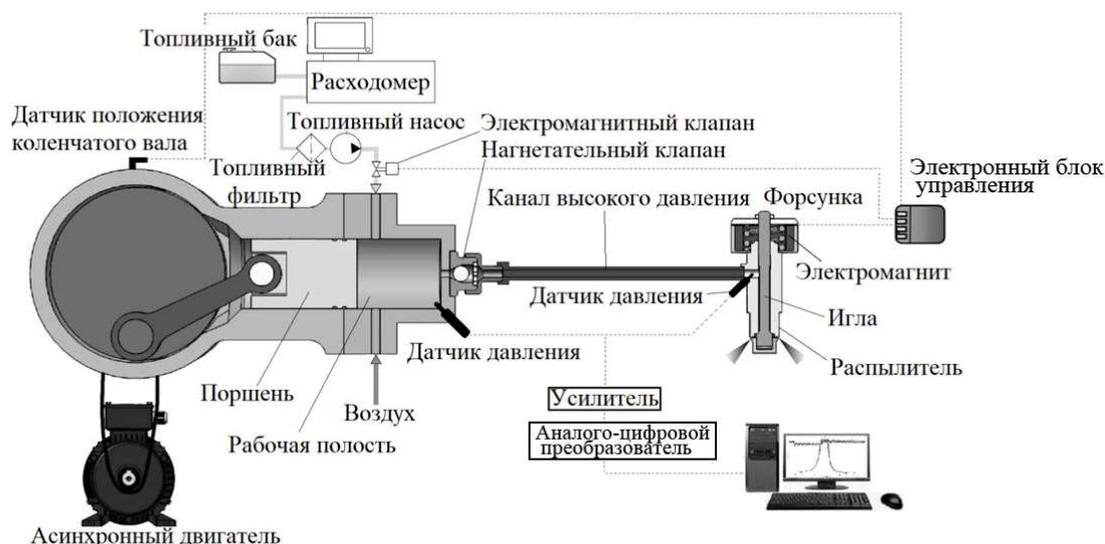


Рис. 1

В качестве топлива использовался авиационный керосин марки ТС-1. Эксперименты проводились без регулирования расхода воздуха. Массовый расход топлива подбирался в соответствии с режимами работы экспериментального двигателя [7]: для холостого хода – 0,17 кг/ч, для полной нагрузки – 1,0 кг/ч. Этим значениям соответствовали массовые расходные соотношения воздуха к топливу (Air to Liquid Ratio (ALR)), равные 1 и 0,16. Давление впрыска менялось самопроизвольно в зависимости от расхода топлива, составляя в среднем 8 МПа при ALR = 1 и 20 МПа при ALR = 0,16.

Измерение массового расхода топлива, а также давления в системе впрыска проводили с помощью оборудования фирмы AVL List GmbH (Австрия). Описание оборудования представлено в работе [7]. Датчики давления были установлены в канале высокого давления и рабочей полости компрессора (см. рис. 1). Межцикловую воспроизводимость оценивали по таким характеристикам струй, как глубина проникновения и ширина, а также по кривым давления в системе впрыска.

В работе использовались две оптические методики исследования струи, предполагающие проведение экспериментов в условиях окружающей среды [10]. В первом случае для определения межцикловой воспроизводимости проводилась высокоскоростная визуализация распространения струи методом Shadow Photography. Регистрация ее изображений (теней) осуществлялась на ярком фоне с использованием высокоскоростной видеокамеры. Для фоновой подсветки струи применялся импульсный диодный осветитель. В процессе обработки изображений измерялись глубина проникновения и ширина струи.

Вторая методика предназначалась для определения дисперсного состава струи методом Shadow Photography. В качестве источника света применялся люминесцентный фоновый экран, освещаемый расфокусированным лучом импульсного лазера. Возможности определения дисперсного состава оптическими методами вблизи сопла ограничены высокой концентрацией жидкой фазы и незавершенностью процесса диспергирования. По предварительным результатам анализа было выявлено, что на расстоянии приблизительно 23 мм от сопла при $ALR = 1$ удается «просветить» струю по всей ширине на всем протяжении процесса впрыска. При $ALR = 0,16$ на этом расстоянии не удастся «просветить» струю в начальных стадиях впрыска, так как из-за высокой концентрации капель происходит рассеивание лазерного пучка и изображения становятся затемненными [10]. В связи с этим в экспериментах с $ALR = 0,16$ для включения в анализ начальных стадий впрыска была добавлена еще одна область измерения на оси струи, находящаяся на расстоянии 100 мм от сопла. На таком расстоянии струя становится менее оптически плотной.

Расположение областей измерения для определения дисперсного состава, а также геометрические характеристики струи (S – глубина проникновения струи; w – ширина струи) представлены на рис. 2. Оценку межцикловой воспроизводимости осуществляли для кривых давления в системе впрыска, для ширины и глубины проникновения струй.

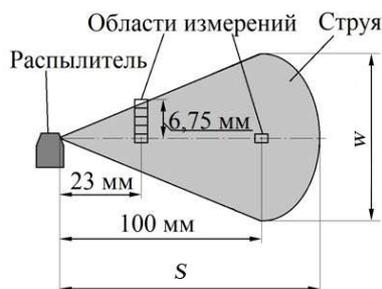


Рис. 2

Динамику развития струи с течением времени при различных ALR иллюстрирует рис. 3: a – $ALR = 1$, $t = 500$ мкс; b – $ALR = 0,16$, $t = 500$ мкс; c – $ALR = 1$, $t = 1060$ мкс; d – $ALR = 0,16$, $t = 1060$ мкс; e – $ALR = 0,16$, $t = 2190$ мкс. Как видим (см. рис. 3), при $ALR = 0,16$ в конечной фазе впрыска наблюдается формирование относительно крупных капель, что практически незаметно при $ALR = 1$.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные изменения глубины проникновения струй (точки), среднеквадратического отклонения (СКО) (кривая 3) и коэффициента вариации CV (кривая 2) по пяти циклам впрыска на каждом временном интервале при $ALR = 1$ (рис. 4, a) и $ALR = 0,16$ (рис. 4, b). Кривая глубины проникновения l построена по среднеарифметическим значениям, вычисленным по экспериментальным данным на каждом временном интервале. Время t отчитывалось от момента подачи сигнала на электромагнит форсунки.

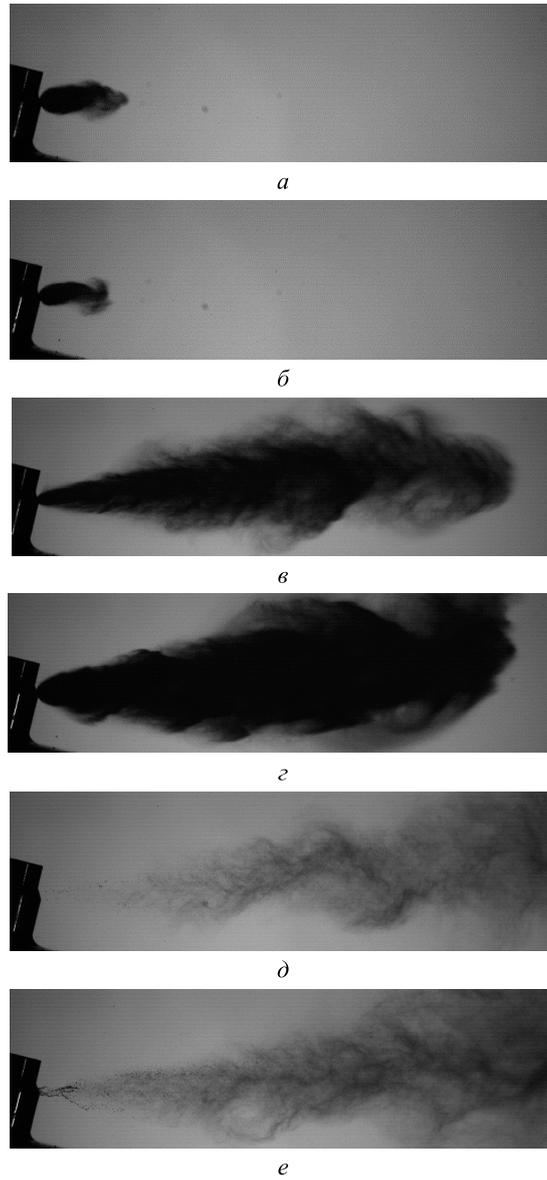


Рис. 3

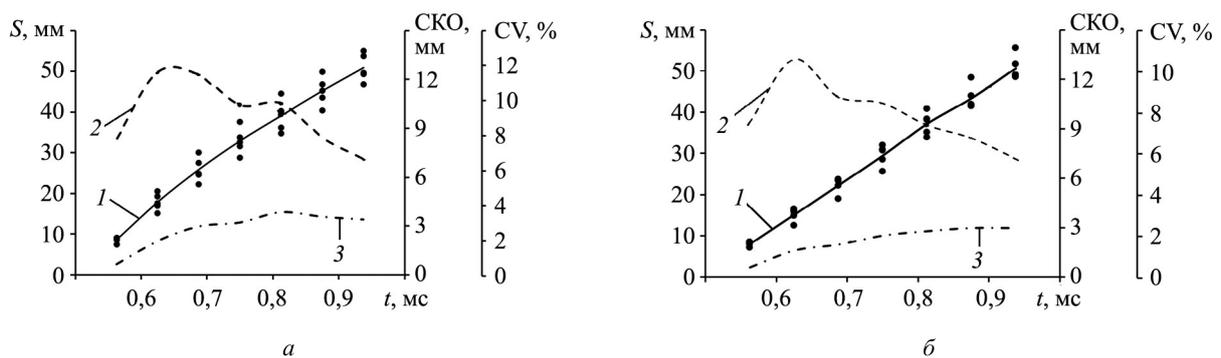


Рис. 4

Продemonстрируем ширину струй w при $ALR = 1$ (рис. 5, *a*) и $ALR = 0,16$ (рис. 5, *б*) в момент приближения переднего фронта к концу области измерения, где точками обозначены экспериментальные данные, полученные в результате пяти циклов впрыска. Кривая 1 построена по среднеарифметическим значениям, вычисленным по экспериментальным данным. На рис. 5 также приведены SKO (кривая 3) и коэффициент вариации CV (кривая 2).

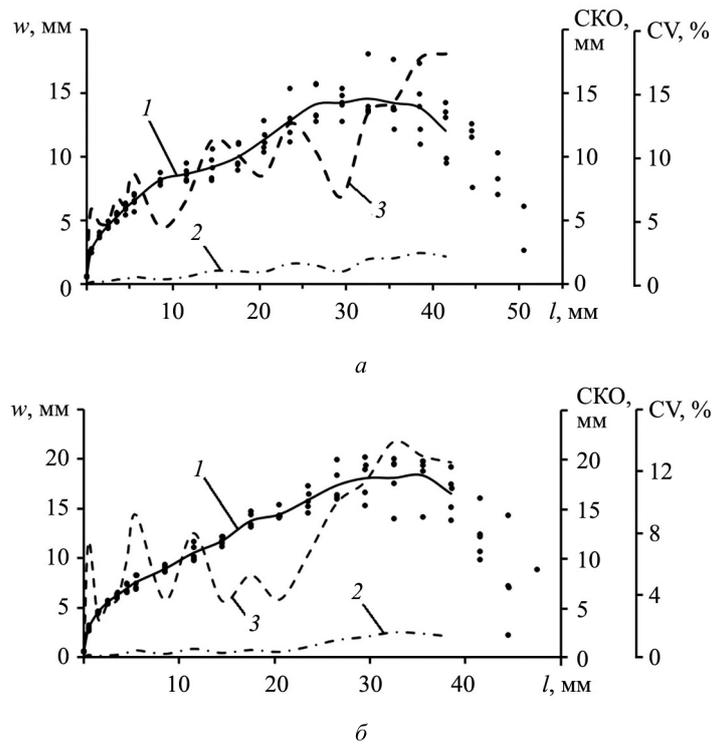


Рис. 5

В табл. 1 представлено сопоставление максимальных значений среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации, рассчитанных для глубины проникновения и ширины струй, с аналогичными значениями, полученными в работе [10] (с системой впрыска с коротким каналом высокого давления). Заметим, что если максимальные значения отклонений глубины проникновения струи больше в конструкции с длинным каналом высокого давления, то максимальные значения отклонений ширины струи больше в конструкции с коротким каналом высокого давления.

Таблица 1

Максимальные значения	ALR = 1		ALR = 0,16	
	Канал высокого давления			
	10 мм	500 мм	10 мм	500 мм
Среднеквадратическое отклонение глубины проникновения струй, мм	3,3	3,8	3,5	3
Среднеквадратическое отклонение ширины струй, мм	2,3	2,5	4,6	2,5
Коэффициент вариации глубины проникновения струй, %	4,8	11,6	5,7	10,6
Коэффициент вариации ширины струй, %	21,8	18	21	13,9

Приведем зависимости давления в рабочей полости компрессора и канале высокого давления от угла поворота коленчатого вала (φ), полученные на основе анализа 130 последовательных циклов при ALR = 1 (рис. 6, а) и ALR = 0,16 (рис. 6, б). С использованием этих экспериментальных данных построены соответствующие среднеарифметические кривые давления. Так, кривая 1 соответствует усредненному значению в канале высокого давления, кривая 2 – усредненному значению в рабочей полости. На рис. 6 также представлена кривая 3 коэффициента вариации, построенная для давления в канале высокого давления. Его максимальное значение для ALR = 1 составляет 2,5 %, для ALR = 0,16 – 3,2 %.

Степень влияния межциклового воспроизводимости геометрии струи и давления в топливной аппаратуре на межцикловую стабильность показателей двигателя может быть установлена на основании данных моторных экспериментов.

На рис. 7 приведены фрагменты теневой съемки струи: а – ALR = 1, $t = 700$ мкс, $D_{32} = 7$ мкм; б – ALR = 0,16, $t = 700$ мкс, $D_{32} = 9$ мкм; в – ALR = 1, $t = 1700$ мкс, $D_{32} = 9$ мкм; г – ALR = 0,16, $t = 1700$ мкс, $D_{32} = 12$ мкм.

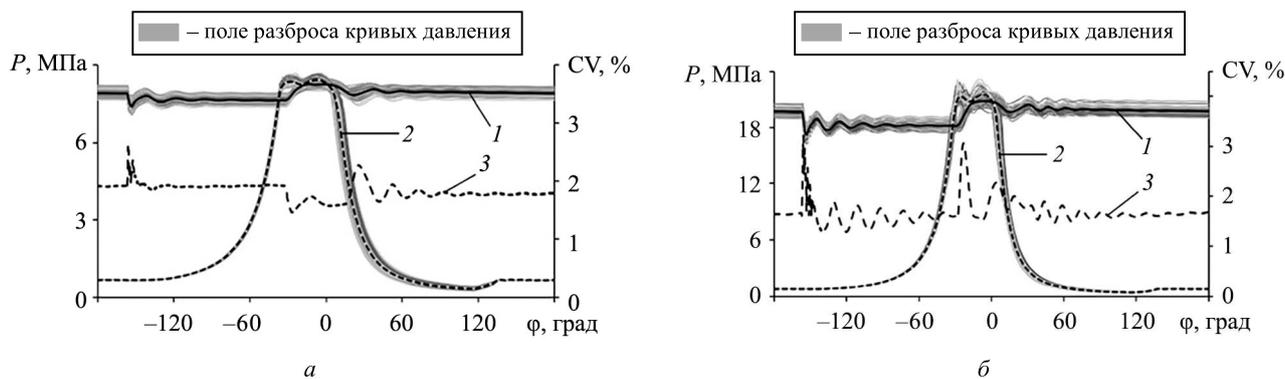


Рис. 6

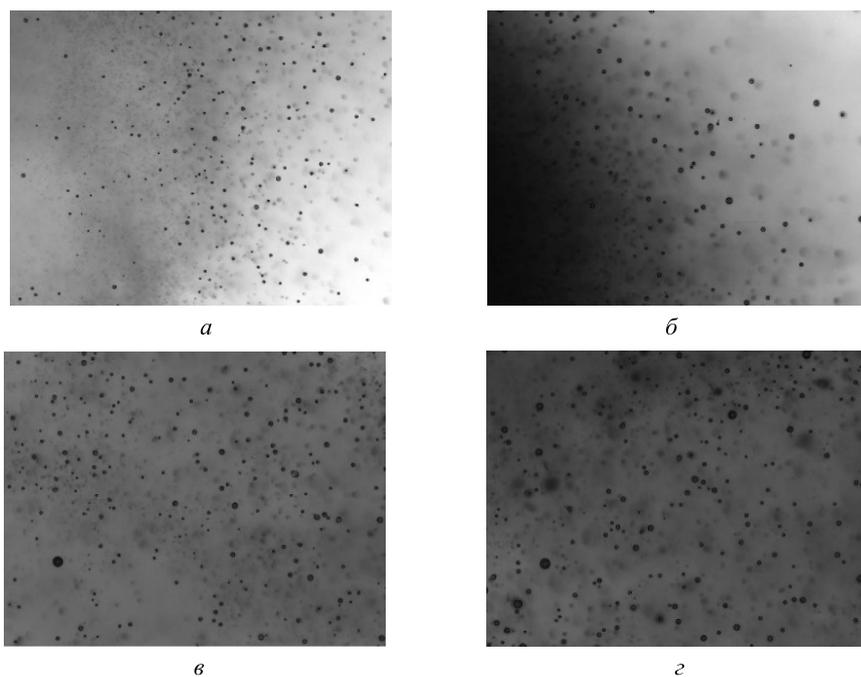


Рис. 7

Вне зависимости от величины ALR съемка на расстоянии 23 мм от сопла начиналась через 700 мкс после начала подачи сигнала на электромагнит форсунки и совпадала с появлением струи с $ALR = 0,16$ в данной области измерений. При этом в случае с $ALR = 0,16$ был возможен анализ только передней границы струи, остальную часть струи «просветить» не удалось, так как из-за высокой концентрации капель происходит рассеивание лазерного пучка и изображения становятся затемненными, что иллюстрирует рис. 7, б, где левая нижняя часть кадра при $t = 700$ мкс – сплошная темная область. Затемненность изображений струи при $ALR = 0,16$ наблюдалось вплоть до отсечки времени 1300 мкс. Таким образом, при $ALR = 0,16$ и расположении области измерения на расстоянии 23 мм от сопла не подвергнутой анализу оказалась приблизительно первая четверть впрыска. В то же время такое расположение области измерения позволило гарантировать включение в анализ наиболее крупных капель, формируемых на последних стадиях впрыска. При $ALR = 1$ удалось «просветить» струю по всей ширине на всем протяжении процесса впрыска. На расстоянии 100 мм от сопла при $ALR = 0,16$ также удалось «просветить» струю на всем протяжении процесса впрыска.

Приведем зависимость среднего заутеровского диаметра от времени, зарегистрированную на расстоянии 23 мм (рис. 8, а) и 100 мм (рис. 8, б) от сопла. Как видим (см. рис. 8), при $ALR = 1$ величина D_{32} в процессе впрыска меняется относительно слабо, в начальной фазе впрыска принимает значение 7 мкм, в конечной фазе – 11 мкм. При $ALR = 0,16$ значение D_{32} изменяется в процессе впрыска более значительно:

от 9 мкм в начальной фазе до 21 мкм в конечной фазе. При этом указанный диапазон наблюдается как при измерениях на расстоянии 23 мм, так и на расстоянии 100 мм от сопла.

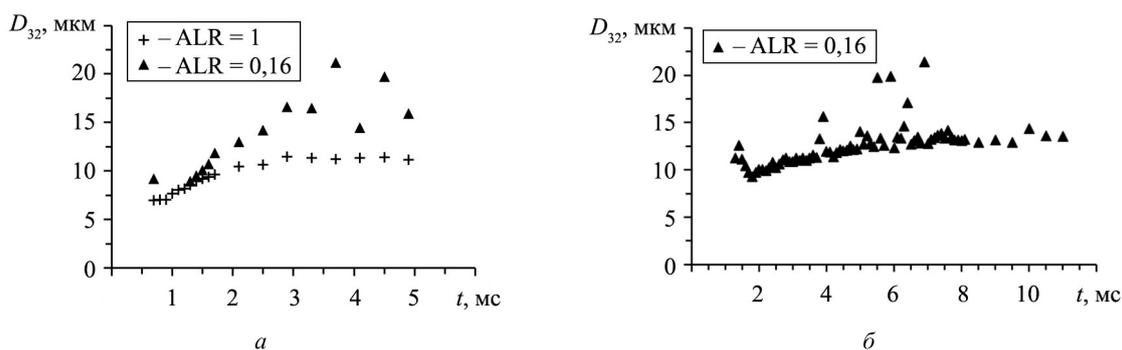


Рис. 8

Приведем дифференциальное (Q) и интегральное (V) объемное распределение капель по размеру при измерении на расстоянии 23 мм (рис. 9, а) и 100 мм (рис. 9, б) от сопла за период всего впрыска.

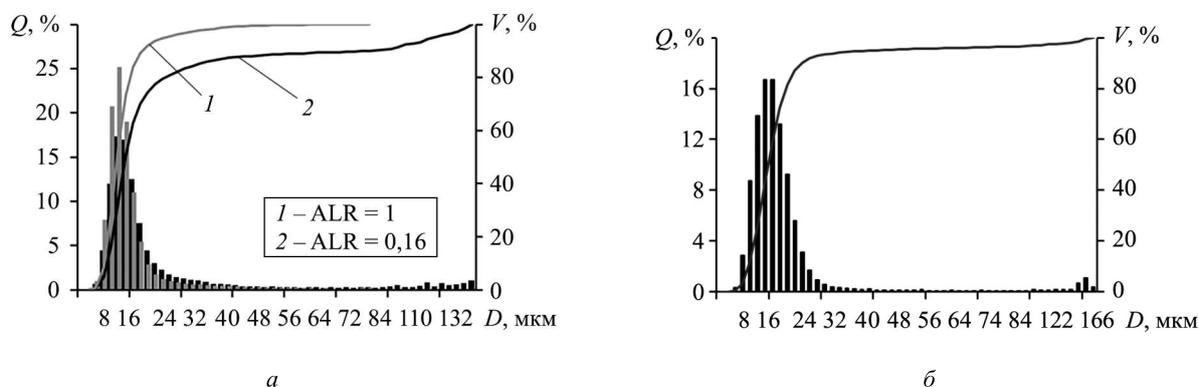


Рис. 9

В табл. 2 представлены значения характерных диаметров капель, соответствующих 10, 50 и 90-му процентилем их объемного распределения.

Таблица 2

Расстояние области измерения от сопла, мм	ALR	D_{32}	D_{v10}	D_{v50}	D_{v90}
23	1	9,5	6	10	17
23	0,16	12,8	7	12	80
100	0,16	12,5	8	13	21

Средний заутеровский диаметр за период всего впрыска при $ALR = 1$ составил $D_{32} = 9,5$ мкм. Средний заутеровский диаметр за период всего впрыска при $ALR = 0,16$ составил $D_{32} = 12,8$ мкм на расстоянии 23 мм и $D_{32} = 12,5$ мкм на расстоянии 100 мм от сопла. Большие значения D_{v90} , полученные на расстоянии 23 мм при $ALR = 0,16$, объясняются тем, что, как уже упоминалось, не анализировались кадры первой четверти впрыска, характеризующиеся наибольшей концентрацией капель. Полученные значения D_{32} ниже значений, полученных на той же системе впрыска, но с коротким каналом высокого давления (13–18 мкм), и ниже значений, формируемых системами впрыска существующих двигателей с искровым зажиганием, работающих на тяжелых топливах (17–20 мкм) [14, 15].

Таким образом, в работе представлены результаты экспериментального исследования дисперсного состава и межциклового воспроизводимости характеристик импульсных струй авиационного керосина, формируемых разработанной системой пневматического впрыска с удлиненным с 10 до 500 мм каналом высокого давления.

Результаты исследований при различных массовых расходных соотношениях воздуха к топливу показали следующее.

Значения среднего заутеровского диаметра составили $D_{32} = 9,5$ мкм при $ALR = 1$ и $D_{32} = 12,8$ мкм при $ALR = 0,16$. Полученные значения диаметров ниже, чем значения, формируемые той же системой впрыска, но с коротким каналом высокого давления ($D_{32} = 13$ мкм при $ALR = 1$, $D_{32} = 18$ мкм при $ALR = 0,16$), и ниже, чем значения, формируемые системами впрыска существующих двигателей с искровым зажиганием, работающих на тяжелых топливах ($D_{32} = 17 \div 20$ мкм).

При применении удлиненного канала (500 мм) высокого давления не произошло однозначного роста значений межциклового воспроизводимости геометрии импульсной струи: значения коэффициентов вариации глубины проникновения увеличились (с 4,8 до 11,6 % при $ALR = 1$, с 5,7 до 10,6 % при $ALR = 0,16$), значения коэффициентов вариации ширины струй снизились (с 21,8 до 18 % при $ALR = 1$, с 21 до 13,9 % при $ALR = 0,16$). Влияние межциклового воспроизводимости на межцикловую стабильность показателей двигателя является предметом экспериментальной проверки.

С учетом того что качество распыливания стало выше, а значения межциклового воспроизводимости геометрических характеристик струй не возрастают, можно предположить, что условия для формирования воспламеняемой смеси в районе искрового промежутка при поздних углах опережения не уступают условиям, формируемым той же системой, но с коротким каналом высокого давления. Таким образом, полученные результаты, а также результаты работ [7, 10] позволяют сделать вывод о том, что предложенная система впрыска способна создавать условия, обеспечивающие искровое воспламенение и бездетонационное сгорание авиационного керосина в двигателе внутреннего сгорания с повышенной степенью сжатия (13,5 по сравнению 7), превышающей степень сжатия существующих двигателей с искровым зажиганием, работающих на тяжелых топливах. Следующим этапом исследований является проведение экспериментов на двигателе.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ward M.A.V.* Spark-Ignited Diesel Engine. Warren, 1990. 108 p. (Tech. Rep. 13502).
2. *Ning L. et al.* Experimental Investigation on Combustion and Emissions of a Two-Stroke DISI Engine Fueled with Aviation Kerosene at Various Compression Ratios // *Fuel*. 2020. Vol. 259. Article № 116224.
3. *Ning L. et al.* 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 Engineering*. 2019. Vol. 161. Article № 114124.
4. *Hu J. 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 Engineering*. 2016. Vol. 108. P. 414–426.
7. *Гарипов М.Д. и др.* Экспериментальное исследование возможности бездетонационного сгорания авиационного керосина в четырехтактном двигателе с искровым воспламенением // *Двигателестроение*. 2024. № 1 (295). С. 81–91.
8. *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamentals. N.Y: McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p.
9. *Handbook of Diesel Engines* / Eds. K. Mollenhauer, H. Tschöke. Springer, 2010. 636 p.
10. *Гарипов М.Д. и др.* Экспериментальное исследование характеристик распыливания авиационного керосина системой пневматического впрыска высокого давления // *Теплофизика и аэромеханика*. 2024. № 5. С. 885–902.
11. *Сипатов А.М. и др.* Моделирование распада пленки жидкости с использованием адаптивных сеточных моделей // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2016. № 3. С. 80–86.
12. *Сипатов А.М. и др.* Оптимизация конструкции пневматического распыливающего устройства на основе методов трехмерного моделирования // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 2014. № 1. С. 57–62.
13. *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* № 2005-32-0065. 8 p.

14. Du B. et al. Experimental Investigation on the Effects of Fuel–Air Mixture Temperature on the Air-Assisted Kerosene Spray Characteristics // Fuel. 2022. Vol. 324. Pt. A. Article № 124487.
15. Wu H., Zhang F., Zhang Z. Fundamental Spray Characteristics of Air-Assisted Injection System Using Aviation Kerosene // Fuel. 2021. Vol. 286. Pt. 2. Article № 119420.

Поступила в редакцию 16.05.25

После доработки 18.06.25

Принята к публикации 17.08.25

Experimental Study of Pulsed Jets of Aviation Kerosene Formed by the Air-Assisted Injection System of an Internal Combustion Engine

M.D. GARIPOV, R.F. ZINNATULLIN, A.A. MELKOV,
E.M. KHALILOV, AND V.A. SHAYAKHMETOV

UUST, Ufa

The characteristics of aviation kerosene pulsed jets atomization formed by a high-pressure air-assisted injection system are investigated. A configuration with a high-pressure channel elongated to 500 mm is being considered, which is determined by the design requirements. The influence of the elongated channel on the dispersed composition and the cycle-to-cycle variability of the characteristics of pulsed jets is analyzed. It is shown that the air-assisted injection system provides the high-quality spraying with acceptable cycle-to-cycle variability.

Ignition, detonation, kerosene, atomizing, jet, spark.