

УДК 66.069.83; 532.574.7; 544.772

**Экспериментальное исследование размеров
и скорости капель, формируемых системой
пневматического впрыска воды
во впускную систему поршневого двигателя
внутреннего сгорания,
с применением оптических методов***

**М.Д. Гарипов¹, А.Г. Хафизов², Р.Ф. Зиннатуллин¹, А.А. Мелков¹,
В.А. Шаяхметов¹, О.А. Гобызов³**

¹*Уфимский университет науки и технологий*

²*Зауральская ТЭЦ, филиал БГК, Сибай*

³*Новосибирский государственный университет*

E-mail: garry76@mail.ru

В представленной работе исследуется качество распыливания воды системой с пневматическим впрыском, предназначенной для подачи воды во впускную систему поршневого двигателя внутреннего сгорания. Система состоит из двухцилиндрового поршневого компрессора, в рабочих полостях которого происходит сжатие несущей фазы водовоздушной смеси. Поршневой компрессор соединен с распылителем через длинные каналы. Определение размеров капель основывалось на автоматической обработке изображений, полученных методом Shadow Photography. Для определения поля скорости использовался метод 2D-PIV. Результаты экспериментов показали, что предложенная система впрыска позволяет получить высокое качество распыливания при соотношении массовых расходов воздуха и воды, составляющем не менее 0,46. Значение среднего заутеровского диаметра при этом составило не более 31,1 мкм.

Ключевые слова: пневматическая система впрыска воды, Shadow Photography, 2D-PIV, дифференциальное и интегральное объемное распределение капель, эквивалентный диаметр капли.

Введение

Применение впрыска воды как средства подавления детонации в поршневых двигателях известно с 30-х годов XX века. Эксперименты с двигателями для боевой и гражданской авиации подтвердили высокий антидетонационный эффект впрыска воды и возможность увеличения мощности двигателя за счет его использования. В настоящее время

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

впрыск воды рассматривается не только как средство увеличения мощности, но и как один из способов снижения эмиссии оксидов азота [1–11]. Наиболее простым и распространенным решением является впрыск воды во впускную систему двигателя. Однако при таком подходе часть капель может попасть в процессе впуска на гильзу цилиндра и смыть масляную пленку. Последствия данного эффекта могут быть снижены, если большинство капель успеет испариться до поступления в рабочую камеру двигателя. Для обеспечения своевременного испарения необходимо, во-первых, чтобы относительная влажность воздуха во впускном коллекторе после испарения всех капель была ниже 100 %. Во-вторых, должно быть высоким качество распыливания.

В системах впрыска воды во впускную систему двигателя используются форсунки с механическим распыливанием [12]. В наиболее совершенных конструкциях 85–98 % капель имеют размер менее 50 мкм [13]. Малые размеры капель в таких форсунках обеспечиваются высоким давлением впрыска (80–130 бар) [12, 13].

Форсунки с пневматическим (или паровым) распыливанием позволяют получить высокое качество распыливания при более низких давлениях впрыска [14–19]. К этой группе относятся в том числе форсунки, описанные в работах [20–22]. В указанных устройствах газовая фаза газожидкостной смеси сжимается в поршневом компрессоре, после чего смесь подается через короткий канал и распылитель непосредственно в камеру сгорания двигателя. Присутствие жидкости в линии высокого давления позволяет реализовать высокие давления впрыска без существенного усложнения конструкции, поскольку дает возможность обойтись без системы охлаждения сжатого воздуха.

В настоящей работе вместо конструкции с коротким каналом, соединяющим компрессор и распылитель, по компоновочным соображениям требовалось использовать каналы длиной несколько метров. При применении таких длинных каналов более значительным должно стать влияние на структуру течения процессов, протекающих непосредственно в канале, таких, например, как взаимодействие пленки с газокapельным потоком и коагуляция капель. Вопрос применения подобной конструкции системы впрыска и исследования ее характеристик распыливания в работах [20–22] не изучался, а в конструкции с коротким каналом исследовалось лишь распыливание бензина. Поэтому цель представленной работы заключалась в исследовании характеристик распыливания предлагаемой системы впрыска воды.

Объект исследования и методика проведения эксперимента

Конструкция системы впрыска

На рис. 1 представлена схема исследуемой системы впрыска воды. Она состоит из двухцилиндровой поршневой машины с приводом от асинхронного электродвигателя. Частота вращения вала электродвигателя составляет 930 мин^{-1} . За счет возвратно-поступательного движения поршня воздух с водой попадают в полость поршневой машины, где происходит их совместное сжатие. Поршень приводится в движение от коленчатого вала. Расход воздуха не регулируется. Регулируется только расход воды. Полость сжатия связана с рукавом высокого давления (РВД) через нагнетательный клапан. При повышении давления в полости сжатия выше значения в РВД открывается нагнетательный клапан и сжатая водовоздушная смесь поступает в распылитель. Распылитель представляет собой трубку с четырьмя соплами диаметром 0,7 мм. Конструкция распылителя определялась из условий размещения на двигателе и равномерного распределения капель по объему впускной системы. К концам распылителя было подключено

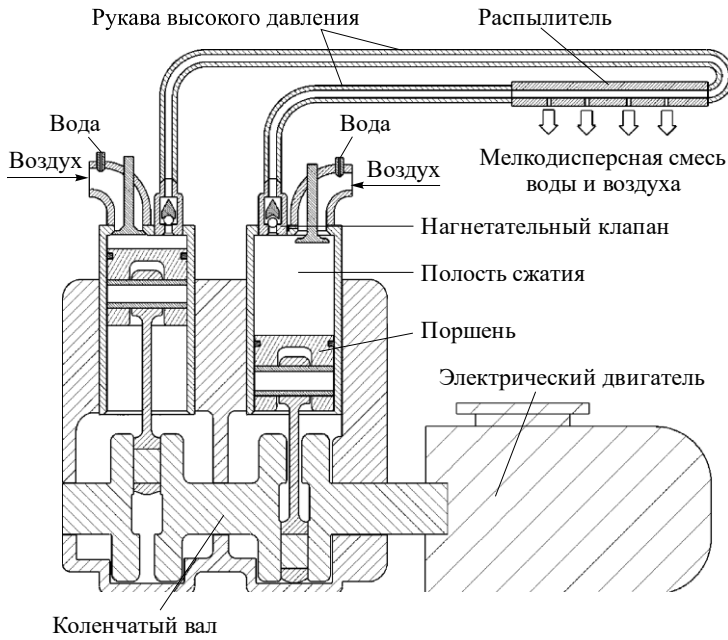


Рис. 1. Схема системы впрыска воды.

по одному РВД от каждого цилиндра. Длина каждого РВД составляет 4 м. Так как кривошипы коленчатого вала смещены на 180° относительно друг друга, нагнетание водовоздушной смеси в общий для двух цилиндров распылитель происходило через 180° угла поворота коленчатого вала (УПКВ).

Методы измерений

Ключевая роль в исследовании характеристик распыливания воды принадлежит оптическим методам Particle Image Velocimetry (PIV) и Shadow Photography (SP). В эксперименте использовалась система диагностики водовоздушных потоков «ПОЛИС» компании ООО «Сигма-Про», характеристики которой представлены в табл. 1. Метод SP применялся для определения дисперсного состава продуктов распыливания. Для его реализации использовалась схема с люминесцентным фоновым экраном, расположенным за объектом исследований, и с регистрацией теневых картин на цифровую камеру, снабженную макрообъективом. Аналогичная схема была описана в работе [23]. Особенность схемы (рис. 2) заключается в том, что люминесценция фоновых экрана, представляющего собой тонкую кювету, заполненную раствором люминофора родамин 6Ж в этиловом спирте, возбуждается пятном лазерного излучения, а камерой регистрируются теневые образы капель на фоне люминесценции. Это позволяет обеспечить беспыльный равномерный фон теневой картины и короткую, менее 50 нс, экспозицию кадра, что дает возможность регистрировать «вмороженные» образы капель даже при высокой скорости их движения и большом оптическом увеличении. Коэффициент оптического увеличения на уровне 2,15 (разрешение 3,45 мкм/пикс) достигался путем наращивания заднего рабочего расстояния объектива за счет меха — проставки между камерой и объективом. Для обработки полученных теневых изображений использовался алгоритм, реализованный в программе ActualFlow [24]. Он включает в себя этап пороговой бинаризации с превращением изображения в двухцветную черно-белую маску (где белые пиксели — это капли, а черные — фон). Порог бинаризации был единым для каждого режима исследования.

Таблица 1

Характеристики системы диагностики водовоздушных потоков «ПОЛИС»

Наименование параметра	Значение
Диапазон определения размеров капель, мкм	от 10 до 300
Диапазон определения скорости, м/с	от 0 до 1000
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
Частота съемки, кадр/сек	4
Область измерения, мм	8,32×6,25
Размер кадра, пикс	2352×1768 (4MP)
Пространственное разрешение, мкм/пикс	3,54
Время экспозиции, мкс.	1000
Задержка между кадрами для 2D-PIV, мкс	0,5
Число кадров для каждого режима исследования, шт.	1000
Объектив	Tokina Macro 100 F2.8 D AT-X PRO

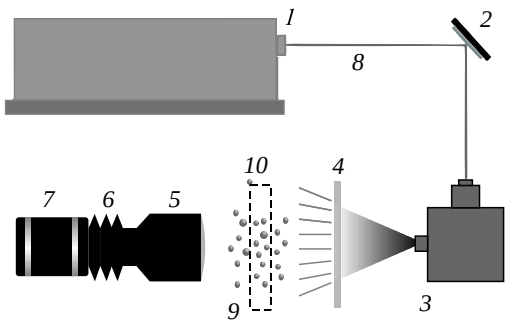


Рис. 2. Схема SP-метода.

1 — лазер, 2 — дихроичное зеркало,
3 — формирующая оптика,
4 — люминесцентный экран, 5 — объектив,
6 — регулируемая проставка-мех, 7 — камера,
8 — пучок лазерного излучения, 9 — спрей,
10 — область резко изображаемого
пространства объектива.

После бинаризации применялся алгоритм определения местоположения и диаметра сферических капель. Также проводилась фильтрация капель по минимальному размеру и схожести с круглой формой (изопериметрическому коэффициенту). Фрагмент обработанной теневой фотографии с отмеченными каплями представлен на рис. 3. Часть капель, видимых на изображении, из-за глубины резкости объектива не попадает в область четко изображаемого пространства и не распознается алгоритмом обработки.

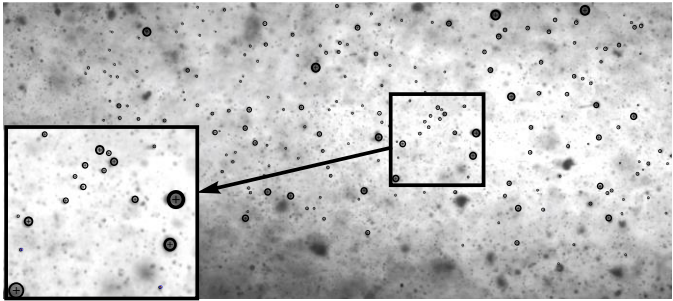


Рис. 3. Фрагмент теневой фотографии.

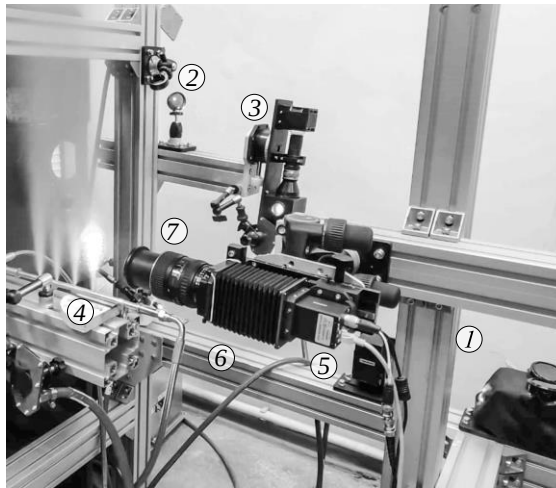


Рис. 4. Установка для исследования характеристик распыла.

1 — лазер, 2 — дихроичное зеркало,
3 — формирующая оптика, 4 — спрей, 5 — объектив,
6 — регулируемая проставка-мех, 7 — камера.

Измерения распределений скорости водовоздушного потока выполнялись методом 2D-PIV [25, 26]. На рис. 4 представлен вид установки для исследования характеристик распыла с элементами системы измерения в PIV-конфигурации. В данной конфигурации доставка лазерного пучка в формирующую оптику осуществляется при помощи системы дихроичных зеркал, а сама формирующая оптика представляет собой устройство, обеспечивающее преобразование пучка лазерного излучения в тонкий “лазерный нож” (либо, при расфокусировке, в широкий расходящийся пучок, который применялся для подсветки в методе SP), наклон плоскости лазерного ножа и ее разворот вокруг оси симметрии. Камера с объективом, так же как и при использовании SP, соединялись через регулируемый мех. Оптическая ось объектива располагалась перпендикулярно плоскости лазерного ножа. В ходе измерений капли в измерительной плоскости потока дважды освещались импульсным лазером с задержкой между вспышками 0,5 мкс. Положения капель в момент последовательных вспышек регистрировались цифровой камерой.

При дальнейшей обработке изображений в программе ActualFlow определялась скорость перемещения капель потока за время между вспышками лазера и строилось двухкомпонентное поле скорости.

Режимные параметры и порядок проведения эксперимента

Анализ характеристик распыливания проводился для расходов воды 10, 30, 60 л/ч. Массовое расходное соотношение воздух/вода (air liquid ratio), которое соответствовало данным расходам, принимало значения 1,23, 0,46 и 0,23. Расход воды измерялся при помощи ротаметра. Основные технические характеристики ротаметра представлены в табл. 2.

Таблица 2
Основные технические характеристики ротаметра

Наименование	Значение
Основная приведенная погрешность	$\pm 4 \%$
Повторяемость	$\pm 0,25 \%$
Динамический диапазон	до 10:1
Номинальное давление среды	до 1 МПа

Таблица 3
Основные технические характеристики преобразователя давления

Наименование	Значение
Верхний предел измерений	4 МПа
Основная приведенная погрешность	0,5 % ВПИ
Время установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемого параметра, составляющем 100 % от диапазона измерений преобразователя	Не более 0,1 секунды

Давление впрыска не регулировалось. Его значение менялось самопроизвольно в зависимости от расхода воды и составляло 1.3, 1.7, 2.0 МПа соответственно. Измерение давления проводится при помощи тензорезистивного преобразователя давления, его основные характеристики представлены в табл. 3.

В связи с тем, что вблизи сопла концентрация жидкой фазы велика, а процесс диспергирования незавершен, возможности оптической диагностики на этом участке ограничены, поэтому регистрация потока для измерения размеров капель выполнялась на расстоянии 50 мм от сопла (см. рис. 5). Вблизи сопла фоторегистрация водовоздушного потока проводилась для получения качественной картины распыла.

Используемая в работе поршневая машина не обеспечивает равномерный расход и давление впрыска в течение одного оборота коленчатого вала. Поэтому условия протекания таких процессов, как, например, движение пленки, взаимодействие пленки с газокапельным потоком, коагуляция капель, будут различными в течение одного оборота коленчатого вала компрессора. Соответственно, должны быть различны и параметры двухфазного потока (в том числе мгновенное соотношение расходов фаз и их относительные скорости) на входе в сопла распылителя, а, следовательно, условия и качество распыливания. Для выявления указанного факта в каждом из режимов исследования была выполнена регистрация не менее тысячи кадров. Из-за невысокой частоты получения полей данных (один кадр снимается приблизительно за четыре оборота коленчатого вала) результаты исследования представляют собой случайную последовательность кадров из различных рабочих циклов поршневой машины. Итоговое распределение капель по размеру, а также средний заутеровский диаметр (D_{32}) вычислялись в результате совокупного анализа всех кадров, относящихся к одному режиму. Дополнительно проводился анализ D_{32} каждого кадра.

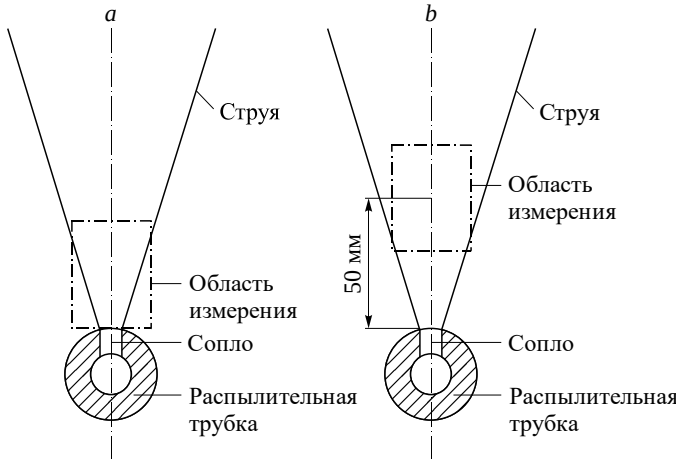


Рис. 5. Схема расположения области измерения относительно сопла.

a — область измерения возле сопла, *b* — область измерения на расстоянии 50 мм от сопла.

Результаты и обсуждение

Исследование распределения капель воды по размеру

На рис. 6 представлена гистограмма количественного распределения капель по размерам, полученная в результате совокупного анализа 1000 кадров в каждом режиме исследования. Максимальный диаметр капель составил 118, 153 и 263 мкм при расходе воды 10, 30 и 60 л/ч соответственно. Средний зауэтеровский диаметр (D_{32}) составил 29,1, 31,1 и 50,3 мкм соответственно.

На рис. 7 представлена гистограмма количественного распределения капель по размеру, а числовые характеристики приведены в табл. 4, где Dv_{10} , Dv_{50} , Dv_{90} — эквивалентный диаметр капли, меньше которого находится 10, 50 и 90 % капель по объему.

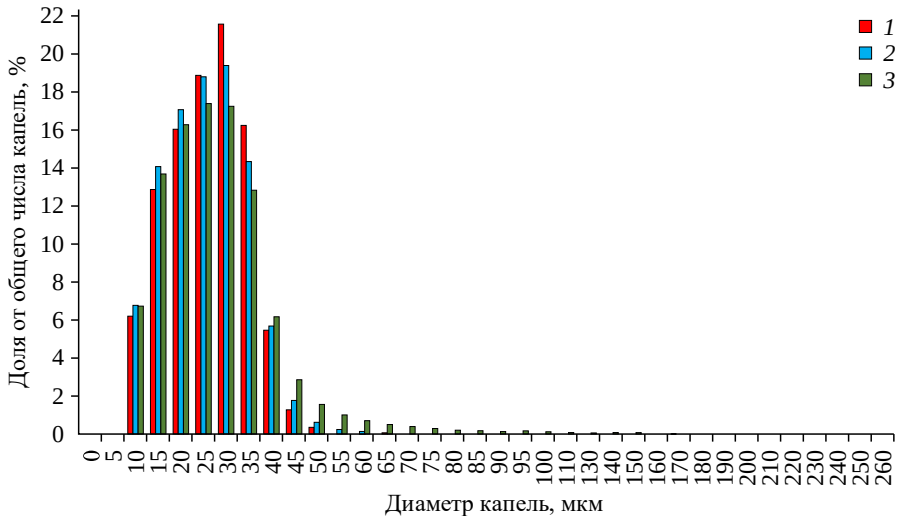


Рис. 6. Гистограмма распределения капель по размеру.
Расход воды 10 (1), 30 (2), 60 (3).

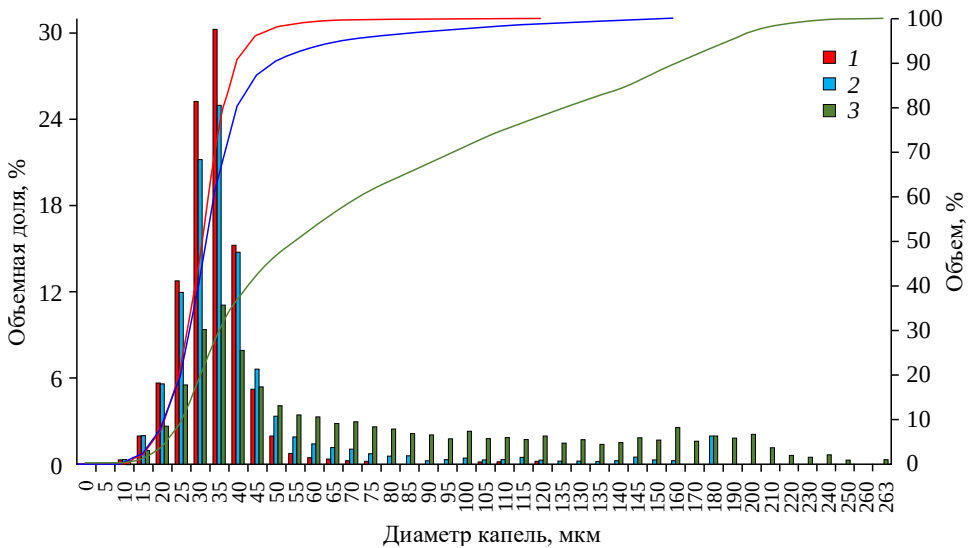


Рис. 7. Дифференциальное и интегральное объемное распределение капель по размеру.
Расход воды 10 (1), 30 (2), 60 (3).

Таблица 4
Результаты анализа объемного распределения, мкм

Расход воды, л/ч	$Dv10$	$Dv50$	$Dv90$
10	20	31	40
30	21	32	50
60	25	55	160

Анализ отдельных кадров впрыска водовоздушной струи

Как уже описывалось выше, ввиду неравномерности подачи водовоздушной смеси поршневой машиной, геометрия струи и ее дисперсность должны быть нестационарными. Это хорошо прослеживается на рис. 8–10, где на соседствующих кадрах представлены внешние виды водовоздушных струй в разные моменты времени, снятые в одном режиме работы установки.

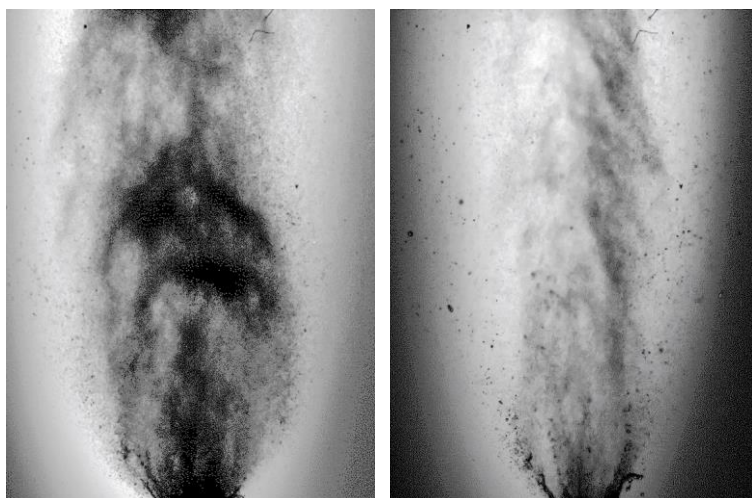


Рис. 8. Картина впрыска воды при расходе жидкости 10 л/ч.

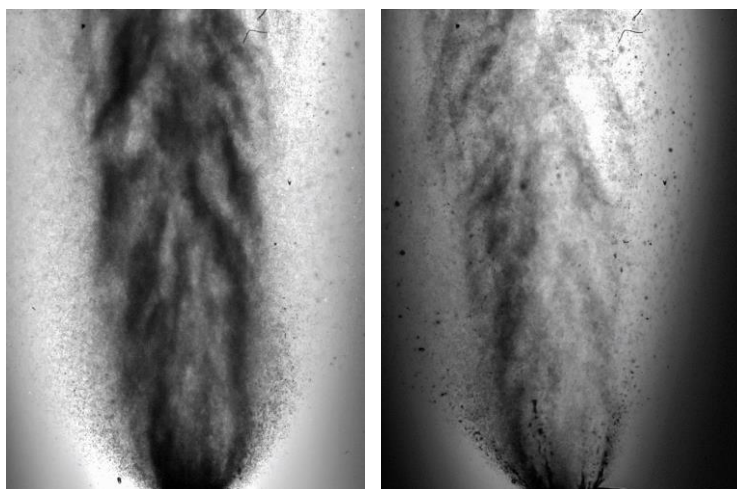


Рис. 9. Картина впрыска воды при расходе жидкости 30 л/ч.

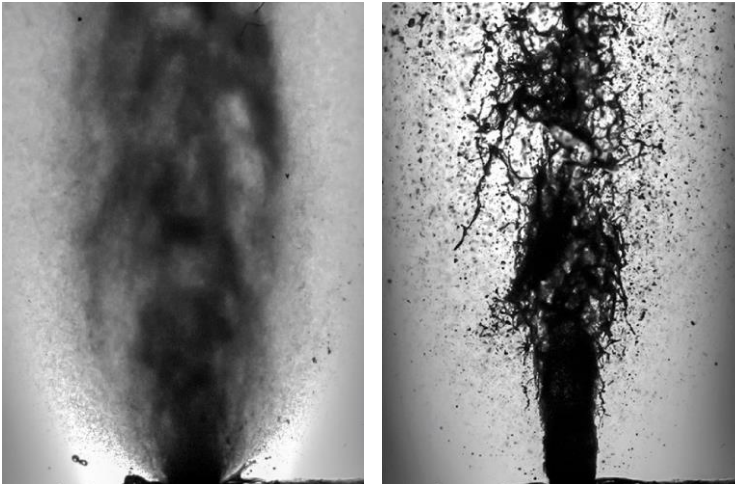


Рис. 10. Картина впрыска воды при расходе жидкости 60 л/ч.

На рис. 11 представлена дифференциальная и интегральная характеристики распределения среднего заутеровского диаметра (D_{32}) по кадрам, снятым на расстоянии 50 мм от сопла. Примечательно, что для всех исследованных расходов воды наиболее часто повторяющиеся кадры имеют приблизительно одинаковые значения D_{32} , составляющие 28–29 мкм. Для расходов воды 10 и 30 л/ч 90 % кадров имеют D_{32} не более 33 мкм. Максимальные значения D_{32} составляют 49 и 71,5 мкм соответственно. При расходе воды 60 л/ч диаметры D_{32} величиной не более 33 мкм имеют около 65 % кадров. Максимальное значение D_{32} при этом расходе составило 134 мкм.

Как уже отмечалось, одной из причин подобного разброса значений D_{32} является то, что используемая поршневая машина не создает постоянного давления впрыска в течение одного оборота коленчатого вала — давление колебалось в диапазоне от 16 до 24 бар. Изменение давления, а соответственно, и скорости, вызывает (согласно соображениям, приведенным выше) изменение газосодержания и, следовательно, качества распыла.

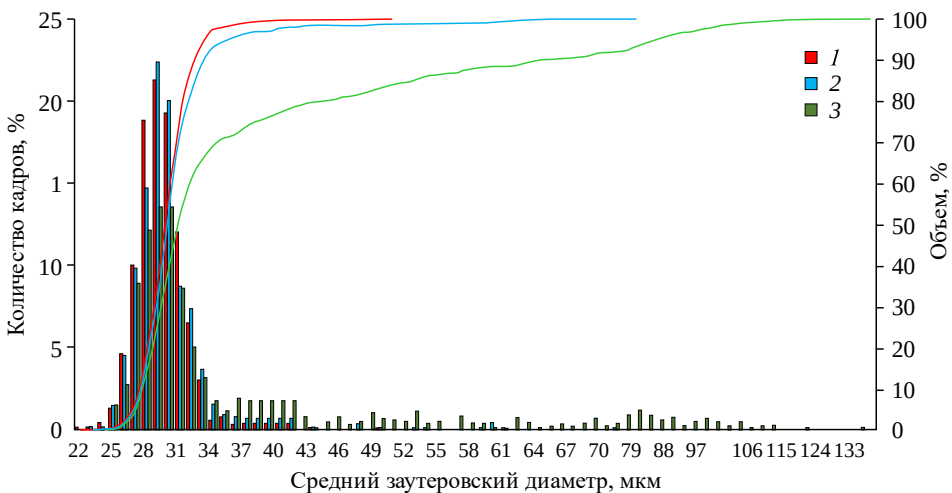


Рис. 11. Дифференциальная (левая ось) и интегральная (правая ось) характеристики распределения среднего заутеровского диаметра по кадрам. Расход воды 20 (1), 30 (2), 60 (3) л/ч.

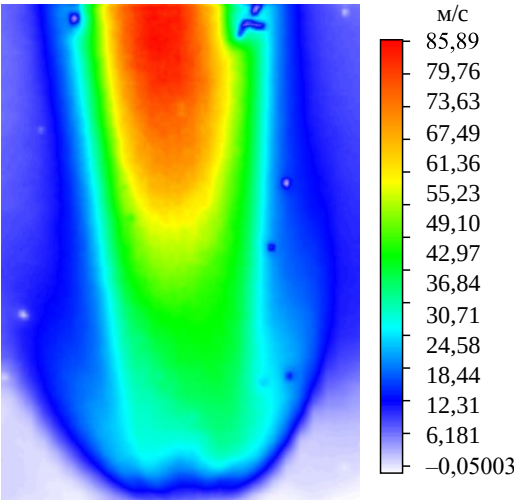


Рис. 12. Осредненное скалярное поле скорости потока при расходе жидкости 10 л/ч.

Снижение колебаний давления позволяет, вероятно, улучшить качество распыла при расходе воды 60 л/ч. Достичь этого можно, например, путем увеличения количества цилиндров.

Исследование поля скорости капель впрыскиваемой воды

На рис. 12–14 изображено осредненное по всем кадрам скалярное поле скорости потока при разных расходах

воды, регистрируемое возле сопла. Из-за высокой концентрации капель непосредственно вблизи сопла поток в этой области был недостаточно прозрачен для лазерного излучения, что приводило к некорректному определению скорости на данном участке методом 2D-PIV. С отдалением от сопла возникает более разряженное течение, позволяющее определять поле скорости.

Полученные результаты измерения размеров и скорости капель использовались в дальнейшем при численном моделировании впрыска воды во впускную систему двигателя.

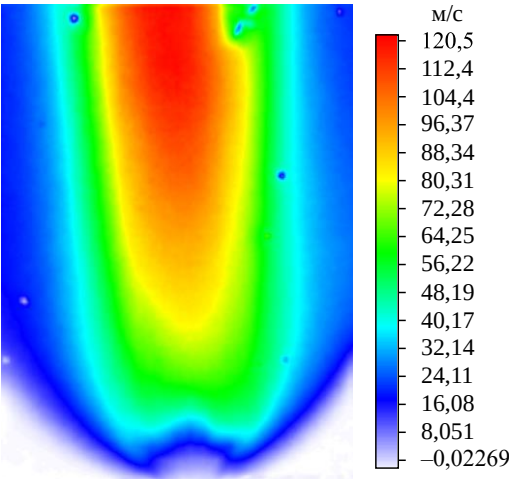


Рис. 13. Осредненное скалярное поле скорости потока при расходе жидкости 30 л/ч.

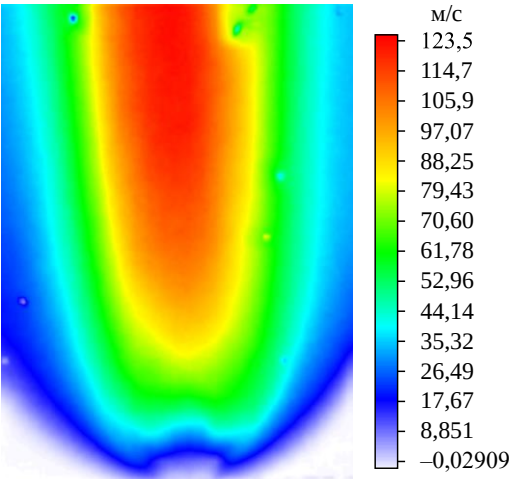


Рис. 14. Осредненное скалярное поле скорости потока при расходе жидкости 60 л/ч.

Закключение

Проведено исследование характеристик распыла пневматической системы впрыска, разработанной для подачи воды во впускную систему поршневого двигателя внутреннего сгорания. Определение размеров капель основывалось на обработке изображений, полученных методом Shadow Photography. Для определения поля скорости использовался метод 2D-PIV.

Результаты экспериментов показали, что предложенная схема впрыска с пневматическим распыливанием позволяет получить высокое качество распыла при соотношении массовых расходов воздуха и воды, составляющем 1,2 и 0,46. Значение среднего заутеровского диаметра при этом составило соответственно 29,1 и 31,1 мкм.

При соотношении массовых расходов воздуха и воды, равном 0,23, наблюдается более высокое значение среднего заутеровского диаметра (50,3 мкм). Также имеет место высокий разброс значений D_{32} по кадрам. Одной из причин является то, что используемая поршневая машина не создает постоянного давления впрыска в течение одного оборота коленчатого вала — давление в экспериментах колебалось в диапазоне от 16 до 24 бар. Снижение колебаний давления позволит, вероятно, улучшить качество распыла. Достичь этого можно, например, увеличением количества цилиндров.

В настоящее время представленная в работе система впрыска воды установлена в газопоршневую генераторную установку и отработала более 3000 моточасов.

Список литературы

1. Neubauer M., Kapus P., Fraidl G. Efficiency and emission measures for future high-performance engines // MTZ Worldw. 2019. Vol. 80, No. 7. P. 54–58.
2. Böhm M., Mährle W., Bartelt H.C., Bartelt C. Funktionale Integration einer Wassereinspritzung in den Ottomotor // MTZ Motortech Zeitschrift. 2016. Vol. 77, Iss. 1. P. 8–43.
3. Scharf J., Uhlmann T., Balazs A., Tharmakulasingam R. Gezielte Wirkungsgradoptimierung des Ottomotorkennfelds // MTZ Motortech. Zeitschrift. 2016. Vol. 77, No. 6. P. 36–41.
4. Thewes M., Hoppe F., Baumgarten H., Seibel J. Water injection for gasoline combustion systems // MTZ Worldw. 2015. Vol. 76, No. 2. P. 10–15.
5. Sagar P., Gaurav P., Tushar M. Experimental investigation of diesel engine with water injection system on emission parameters IOSR // J. of Mechanical and Civil Engng. e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X. 2014. Vol. 11. P. 47–51.
6. Sagar P., Gaurav P.R., Tushar M.P. Water injection effects on performance characteristics of a Ci engine // IOSR J. of Mechanical and Civil Engng (IOSR-JMCE). e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X. 2014. Vol. 11, Iss. 3. Ver. II. P. 66–70.
7. Thewes M., Baumgarten H., Scharf J., Birmes G., Balazs A., Lehrheuer B., Hoppe F. Water injection—high power and high efficiency combined // 25th Aachen Colloquium Automobile. 2016. P. 345–380.
8. Ryu K., Oh Y. Effect of water induction on the performance and exhaust emissions in a diesel engine (II) // KSME Intern. J. 2004. Vol. 18. P. 1640–1647.
9. Sun Y., Fischer M., Bradford M., Kotrba A., Randolph E. Water recovery from gasoline engine exhaust for water injection // SAE Technical Paper Series 1. 2018. No. 2018-01-0369. 17 p.
10. Lanzafame R. Water injection effects in a single-cylinder cfr engine // SAE Technical Paper. 1999. No. 1999-01-0568. 12 p.
11. Ma X., Zhang F., Han K., Zhu Z., Liu Y. Effects of intake manifold water injection on combustion and emissions of diesel engine // Energy Procedia. 2014. Vol. 61. P. 777–781.
12. Shah S. Experimental study and thermodynamical analysis of water injection in the intake manifold of an automotive diesel engine, for pollutant emission reduction // Reactive Fluid Environment. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011. 183 p.
13. Danfoss [Электронный ресурс]: Техническая спецификация «Water mist nozzles» / Danfoss A/S. Nordborgvej 81, 6430 Nordborg. 2023. <https://assets.danfoss.com/documents/latest/161752/AI369353157542en-000101.pdf> (дата обращения 14.11.23).
14. Lefebvre A.H., McDonell V.G. Atomization and sprays. 2nd edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017. 283 p.
15. 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.
16. 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.
17. Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Пахомов М.А., Терехов В.И. Исследование структуры полидисперсной изотермической газокapельной струи на начальном участке. Эксперимент и численное моделирование // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 3. С. 309–324.

18. 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.
19. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками / Под ред. С.С. Кутателадзе. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. 264 с.
20. Nuti M., Pardini R., Caponi D. FAST injection system: PIAGGIO solution for ULEV 2T SI engines // SAE Technical Paper No. 970362. 1997. 10 p.
21. 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.
22. Mitanić W. Fundamentals of fuel injection and emission in two-stroke engines. New York: Nova Sci. Publisher, 2018. 357 p.
23. Gobyzov 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.
24. 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.
25. Raffel M., Willert C.E., Scarano F., Kähler C., Wereley S.T., Kompenhans J. Particle image velocimetry: a practical guide. 3rd ed. Springer Int. Publishing, 2018. 669 p.
26. Бильский А.В., Гобызов О.А., Маркович Д.М. История и тенденции развития метода анемометрии по изображениям частиц для аэродинамического эксперимента (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 1. С. 1–24.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2023 г.,
после переработки — 28 июля 2023 г.,
принята к публикации 17 августа 2023 г.*