

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРСУНКИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ДОЖДЯ ПРИ СЕРТИФИКАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Гурьянов А.И.* , Калинина К.Л.**

*Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева,
РГАТУ, ул. Пушкина, 53, Рыбинск, Ярославская обл., 152934, Россия*

**e-mail: marialex2004@mail.ru*

***e-mail: cris.kalinina2012@yandex.ru*

Разработан метод крупнодисперсного распада струй жидкости для имитации условий попадания атмосферного дождя в авиационный газотурбинный двигатель (ГТД). На его основе выбран оптимальный способ решения задачи получения капель, имеющих диаметр в диапазоне от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ м со средним медианным значением $2,66 \cdot 10^{-3}$ м (в соответствии с требованиями авиационных правил). Расчетные исследования позволили разработать конструкцию форсунки и выбрать оптимальные режимы ее работы. Экспериментальные исследования характеристик двухфазного потока подтвердили возможность имитации параметров дождя и условий его попадания в двигатель для наиболее важных режимов работы ГТД.

Ключевые слова: обратная задача, медианный диаметр, спектр капель, двухфазный поток.

Сертификационные агентства: Российский авиационный регистр Межгосударственного авиационного комитета (АР МАК), Европейское агентство по безопасности полетов (European Aviation Safety Agency — EASA) и Федеральное управление гражданской авиации США (Federal Aviation Administration — FAA) — предъявляют высокие требования к летательным аппаратам гражданской авиации и газотурбинным двигателям для обеспечения надежности их работы [1, 2].

Сложность сертификации двигателей и расхождение требований международных агентств — одна из проблем, лимитирующих эксплуатацию авиаци-

онных двигателей российского производства на территории других стран.

В 2003 году российские Нормы летной годности дополнены в соответствии с зарубежными стандартами по сертификационным испытаниям авиационных двигателей и реализованы в АП-33 [1, 7]. В них ужесточены требования к проведению испытаний на попадание дождя в проточную часть ГТД, касающиеся имитации спектра распределения по размерам и значению среднего медианного диаметра капель. Это требует модернизации материальной базы и опытных стендов для проведения сертификационных испытаний серийных двигателей.

Ключевая проблема состоит в отсутствии отработанных конструкций форсунок для имитации атмосферного дождя с учетом мелкости и дисперсности капельного потока. Множество известных в литературе исследований процесса распыла и реализующих его конструкций форсунок [4–6, 16], применяемых в технических устройствах, формируют условия многократного дробления струй жидкости на полидисперсные факелы распыла. При этом ключевым параметром является достижение определённой мелкости капель в спектре. Обеспечение условий сертификации, напротив, предполагает решение задачи о формировании макрокапельного потока со значением медианного диаметра 2,66 мм, что предполагает исключение вторичного дробления и поиск оптимального соотношения между процессами распада струй жидкой фазы и её коагуляции. Проблему усугубляет то, что практически отсутствуют инженерные методы расчета форсуночных устройств, позволяющие по заданным характеристикам мелкости распыла и форме спектра распределения капель по размерам спрофилировать геометрические параметры форсунки. Для решения проблемы выполнен комплекс экспериментальных исследований распада струй жидкости на капельный поток, имитирующий атмосферный дождь, проработана конструкция форсунки, определены ее основные параметры и режимы работы, предложены и обоснованы условия имитации применительно к основным режимам работы авиационного двигателя.

Формирование спектра капель в заданном интервале диаметров с фиксированным средним медианным значением является сложной, трудновыполнимой задачей, поскольку не только зависит от

большого числа факторов, но и относится к классу «обратных» задач. Наряду с влиянием таких гидродинамических параметров, как число Вебера и перепад давления, существенное влияние на формируемый спектр оказывает геометрия центрального сопла и поперечной канавки, а также множество других факторов, обусловленных динамическим взаимодействием капель с воздушным потоком [10, 11, 15]. Поиск условий формирования капельного потока, имитирующего атмосферный дождь, в силу своей сложности не поддается адекватной аналитической и численной оценке и требует проведения экспериментальных исследований [8, 14].

Характеристики капельного потока, создаваемого форсункой, должны отвечать следующим требованиям: мелкость распыла, равномерность распределения капель по сечению двухфазного потока, минимум энергетических и гидравлических потерь по трактам форсунок. Задача оптимизации рабочего процесса таких распыливающих устройств, а также проектирования систем имитации дождя и методик их расчета является актуальной и требует тщательного исследования [9, 20].

Это определяет необходимость разработки конструкции форсунки и методик оценки их совершенства на основе эмпирических данных с использованием современных экспериментальных установок.

Реализуемые на практике способы формирования капельных потоков жидкости основаны на использовании различных способов подвода энергии, классификация которых [12, 14] представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация способов распыления жидкостей

Задачу формирования капельного потока для имитации дождя можно решить с использованием струйных генераторов. Они представляют собой насадку с цилиндрическим или какой-либо другой формы отверстием (соплом) (рис. 2) [11, 13, 17]. Вытекающая из него под действием перепада давления струя распадается на капли, образуя грубый полидисперсный факел с малым корневым углом. Таким образом струйные генераторы обеспечивают максимальный размер капель при приемлемом уровне затрат энергии [18, 19].

лялись по результатам фотосъемки. Для этого форсунка устанавливалась в блок крепления 10 (рис. 3) и выполнялась серия фотоснимков с последующей обработкой на персональном компьютере и использованием графических редакторов.

Для оценки гидравлических и энергетических характеристик форсунки измерялись давление и расход жидкости на входе и выходе из форсунки.

Для определения радиальной и окружной неравномерности распределения жидкости применялись измерительные участки, в виде группы стеклянных

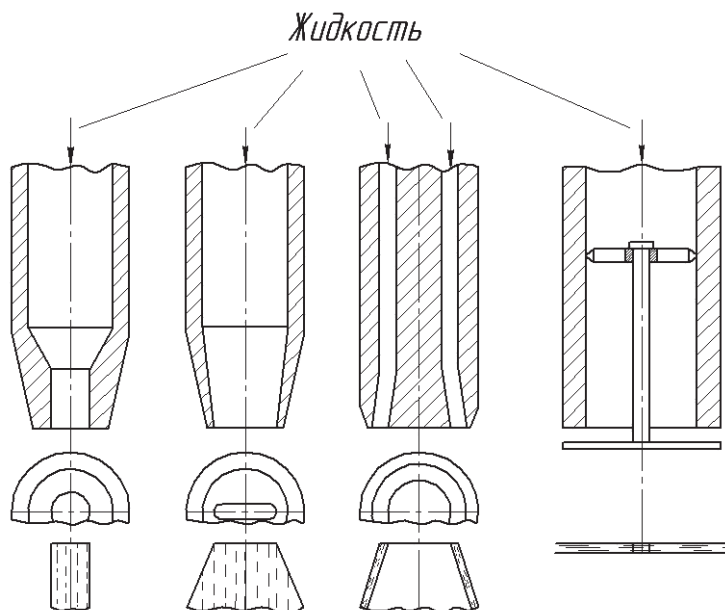


Рис. 2. Формы сопловых каналов и образующихся факелов в струйных генераторах

Удачный выбор конструкции генератора, формирующего макродисперсный капельный поток, является сложной технической задачей. Использование аналитических зависимостей на основе интегральных балансовых соотношений массы и энергии не позволяет расчетным путем определить многие из интересующих исследователя характеристик.

Методика опытных исследований и экспериментальная установка

Определение характеристик капельного потока требует комплексного исследования с определением таких параметров, как коэффициент расхода, коэффициент неравномерности распределения воды, корневой угол капельного потока и распределение капель по диаметрам с вычислением значения среднего медианного диаметра. Для экспериментального исследования характеристик форсунки разработан комплексный стенд (рис. 3).

Геометрические характеристики потока, основной из которых является корневой угол γ , опреде-

пробоотборников, расположенных по концентрическим окружностям и секторам относительно оси факела. Расход жидкости через пробоотборники определялся объемным методом.

Фактические размеры капель определялись с использованием цифровых методов обработки изображений. Техническим средством системы получения и обработки информации служил высокоскоростной видеокомплекс, основными элементами которого являются персональный компьютер и высокоскоростная видеокамера Видео-спринт. После конвертации видеофрагмента и выделения дискретного кадра проводились морфологическое раскрытие фона изображения, контрастно-ограниченная адаптивная эквализация гистограммы и увеличение контраста изображения растяжением значений интенсивностей динамического диапазона. Для сегментации объектов изображения (капель) использовались бинарная градиентная маска и оператор Собеля, с дальнейшей морфологической операцией расширения последовательных вертикальных и горизонтальных структурных элементов.

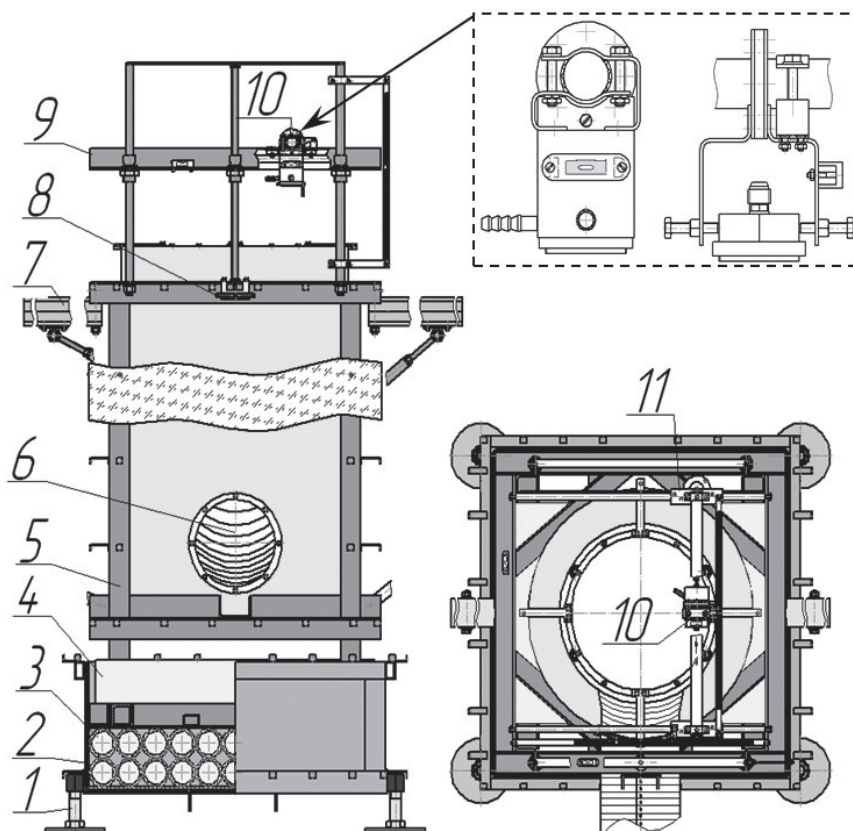


Рис. 3. Установка для комплексного исследования характеристик капельного потока воды: 1 — стойки демпфера; 2 — демпфирующие элементы; 3 — демпферная коробка; 4 — противовес; 5 — каркас установки; 6 — отводящая труба; 7 — оптическая скамья; 8 — координатное устройство вертикального перемещения; 9 — прямоугольная рамка; 10 — блок крепления форсунки капельного потока с координатным устройством горизонтального и углового перемещения; 11 — каретка

Такая последовательная бинаризация изображения позволяет сформировать матрицу меток объектов (капель) на основе анализа значений пикселей отдельных областей изображения. Для каждого объекта изображения формировалась матрица значений его экстремальных координат. Диаметр отдельной капли определялся как разность наибольшего и наименьшего значений ординат экстремальных координат соответствующего этой капле сегментированного объекта изображения.

Результаты экспериментального исследования образцов форсунки и их анализ

Для исследования характеристик потока разработаны и изготовлены пять опытных форсунок, имеющих ряд конструктивных особенностей (см. таблицу и рис. 4). Основные различия заключаются в диаметре центрального отверстия и размерах поперечной канавки.

На рис. 5—8 приведены примеры осредненных распределений массовой доли капель по диаметрам

Геометрические характеристики опытных форсунок

Номер опытной форсунки	Диаметр центрального сопла d_c , 10^{-3} м	Ширина поперечной канавки b , 10^{-3} м	Глубина поперечной канавки h , 10^{-3} м	Форма поперечной канавки
1	4	2,5	2,5	Цилиндрическая
2	3	3	3	Прямоугольная щель
3	3	2	2	Цилиндрическая
4	2,5	1,5	5	Прямоугольная щель
5	2,5	1,5	2,5	Прямоугольная щель

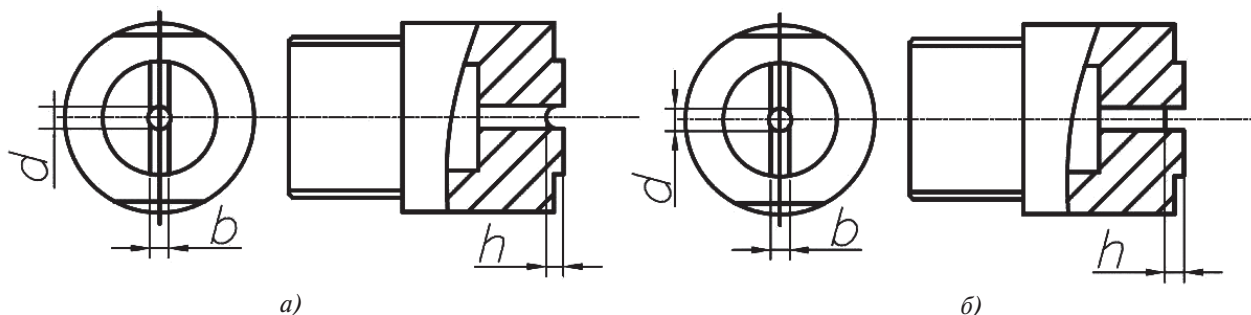


Рис. 4. Схема опытных форсунок: а — с цилиндрической поперечной канавкой; б — с прямоугольной поперечной щелью

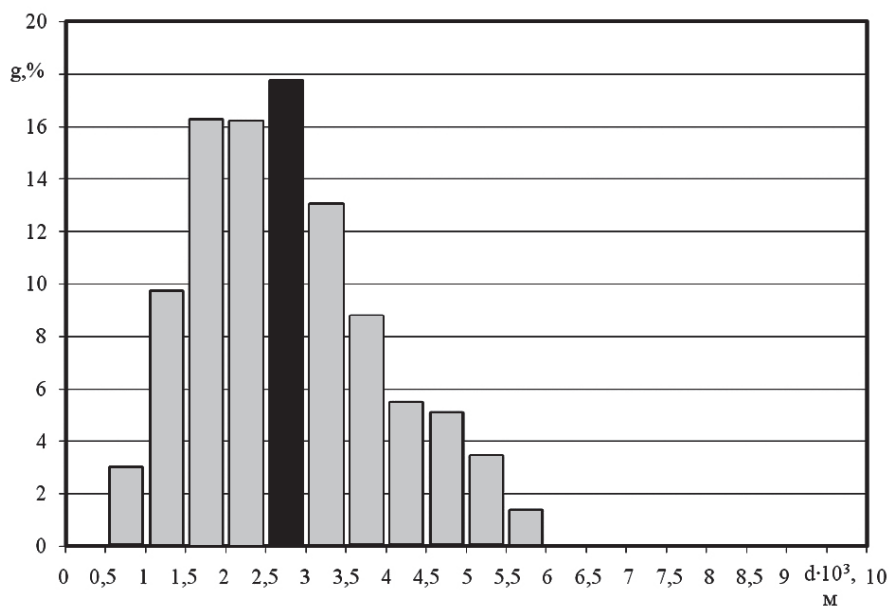


Рис. 5. Распределение капель по диаметрам (опытная форсунка №2)

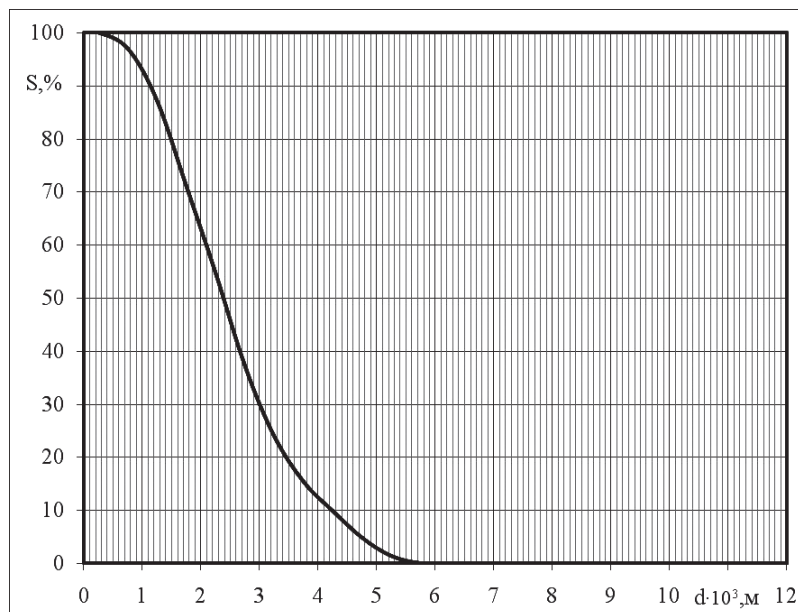


Рис. 6. Распределение относительной массы капель с диаметром больше заданного (опытная форсунка №2)

и соответствующих им кривых относительной массы капель с диаметром больше заданного для двух опытных форсунок, работающих при разных значениях перепада давления. На графиках, отобража-

ющих спектр распределения капель по диаметрам, черным цветом выделен интервал, соответствующий среднедиагностическому диаметру капель атмосферного дождя. Серым цветом обозначены столбцы,

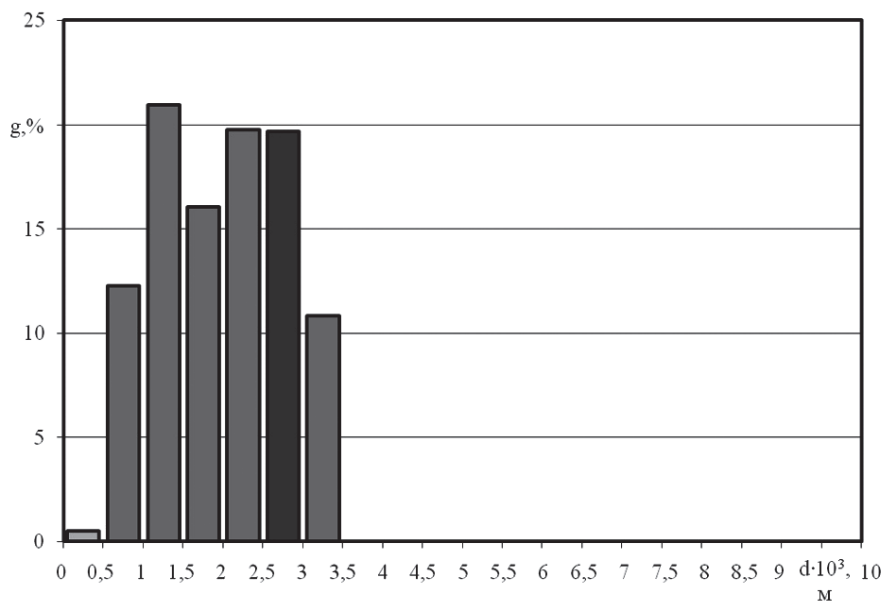


Рис. 7. Распределение капель по диаметрам (опытная форсунка №4)

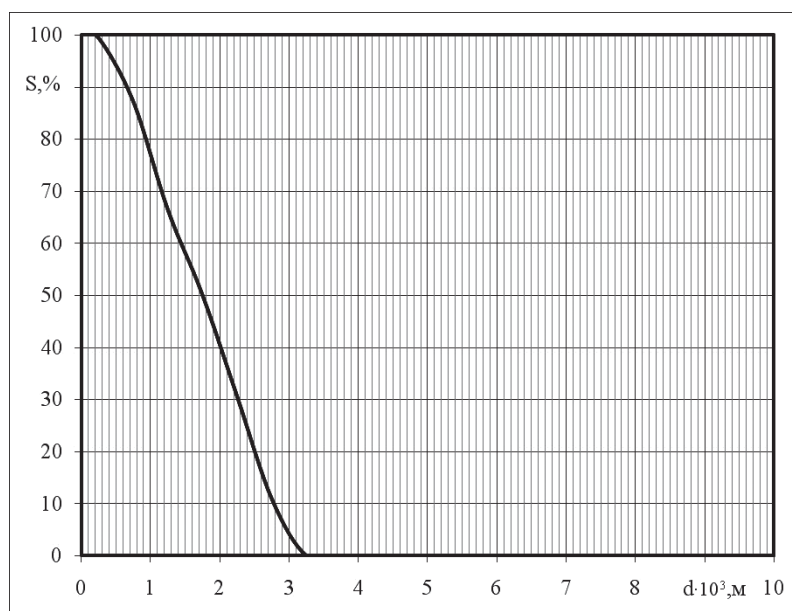


Рис. 8. Распределение относительной массы капель с диаметром больше заданного (опытная форсунка №4)

соответствующие интервалам диаметров, выходящим за границы сертификационного спектра. В качестве абсциссы на графиках принимался среднемедианный диаметр капель.

Опытная форсунка №1 позволяет сформировать капельный поток с максимальным содержанием крупных капель и диапазоном среднемедианных диаметров от $2,72 \cdot 10^{-3}$ м до $4,38 \cdot 10^{-3}$ м. Повышение перепада давления на форсунке более $5,4 \cdot 10^5$ Па позволяет обеспечить требуемый среднемедианный диаметр, однако при этом сформированный спектр капель не отвечает сертификационным значениям в диапазоне размеров более $5 \cdot 10^{-3}$ м.

Опытная форсунка №2 формирует макрокапельный поток с диапазоном значений среднемедианного диаметра от $1,99 \cdot 10^{-3}$ м до $3,07 \cdot 10^{-3}$ м.

Спектр капель форсунки №2 характеризуется отсутствием мелких капель с диаметром менее $0,5 \cdot 10^{-3}$ м и невысоким содержанием крупных капель.

Диапазон значений среднемедианного диаметра капель, формируемых форсункой №3, составляет от $1,9 \cdot 10^{-3}$ до $2,68 \cdot 10^{-3}$ м. Несмотря на то что требуемый среднемедианный диаметр находится вблизи верхней границы полученного диапазона, эта точка соответствует достаточно низкому перепаду давления, что ограничивает возможности последующей адаптации форсунки к условиям заброса воды в двигатель.

Опытные форсунки №4 и №5 формируют похожие спектры распределения. Более глубокая по-

перечная канавка форсунки №4 способствует дроблению капель, и в спектре появляются капли диаметром менее $0,5 \cdot 10^{-3}$ м даже при невысоких значениях перепада давления. Основная масса капель в спектре форсунки №5 лежит в диапазоне диаметров от $1,5 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ м. Наиболее соответствующей требованиям авиационных правил является форсунка №2.

С целью определения функциональной зависимости среднего медианного диаметра от перепада давления опытной форсунки №2 исследован дополнительный четвертый режим работы форсунки, позволивший аппроксимировать ее в виде полинома второй степени с точностью аппроксимации 0,998.

Полученная функциональная зависимость позволила определить значение перепада давления ($2,35 \cdot 10^5$ Па), обеспечивающее значение среднего медианного диаметра $d_{\text{мед}} = 2,644 \cdot 10^{-3}$ м, при этом следует отметить отсутствие в полученном спектре капель с диаметром более $6 \cdot 10^{-3}$ м, что обуславливает некоторое различие полученного спектра и сертификационного. В связи с этим выполнена доработка конструкции опытной форсунки №2 (рис. 9).

Результаты исследований (рис. 10 и 11) показали, что доработка конструкции позволила получить геометрию форсунки с диаметром центрального сопла $3 \cdot 10^{-3}$ м и глубиной поперечной канавки $2 \cdot 10^{-3}$ м. Она позволяет сформировать капельный поток, соответствующий сертификационному спектру (от $0,5 \cdot 10^{-3}$ м до $7 \cdot 10^{-3}$ м). Средний медианный диаметр составил $2,656 \cdot 10^{-3}$ м.

Выводы

Для базовых режимов работы авиационного двигателя («малый газ», «взлет», переходный режим) проведены расчетные и экспериментальные исследования параметров рабочего процесса форсунки. Результаты выполненных работ подтверждают возможность имитации атмосферного дождя в лабораторных условиях. Полученные характеристики по мелкости и дисперсности капель, а также их концентрация в потоке воздуха на входе в воздухозаборник двигателя соответствуют [7].

Создана конструкция форсунки, обладающей следующими характеристиками: рабочие границы по давлению воды на входе в форсунку составляют от 0,1 до 1,8 МПа; требуемое значение медианного диаметра капель обеспечивается при перепа-

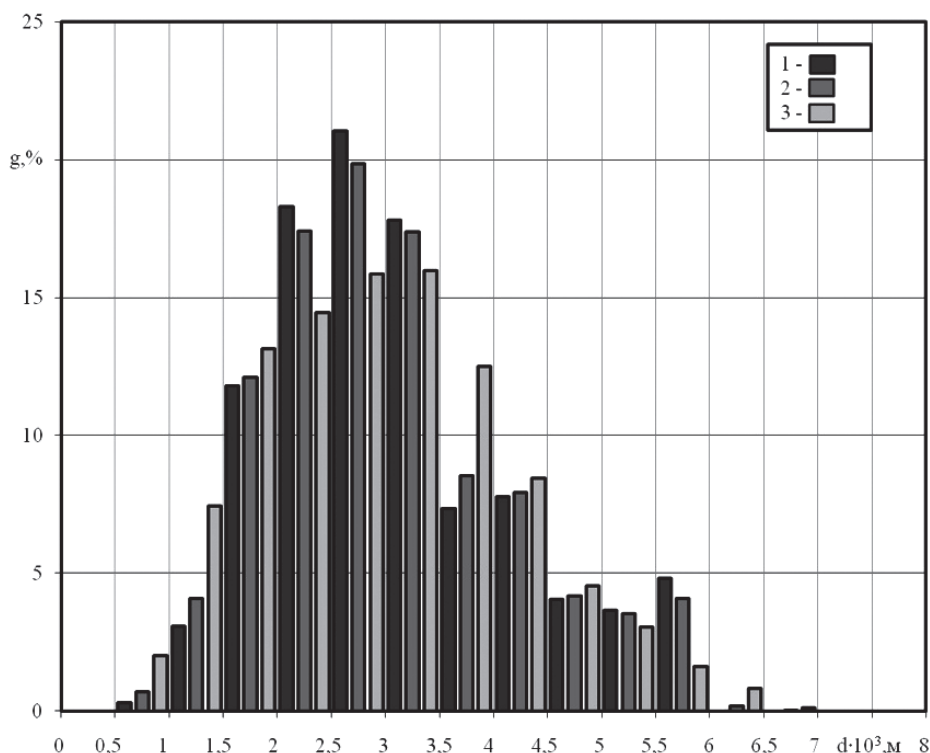


Рис. 9. Влияние глубины поперечной канавки на распределение относительной массы капель с диаметром больше заданного (опытный генератор №2, $\Delta p = 2,35 \cdot 10^5$ Па): 1 — форсунка №2 (диаметр центрального сопла $3 \cdot 10^{-3}$ м, глубина поперечной канавки $3 \cdot 10^{-3}$ м); 2 — форсунка №2А (диаметр центрального сопла $3 \cdot 10^{-3}$ м, глубина поперечной канавки $2,5 \cdot 10^{-3}$ м); 3 — форсунка №2Б (диаметр центрального сопла $3 \cdot 10^{-3}$ м, глубина поперечной канавки $2 \cdot 10^{-3}$ м)

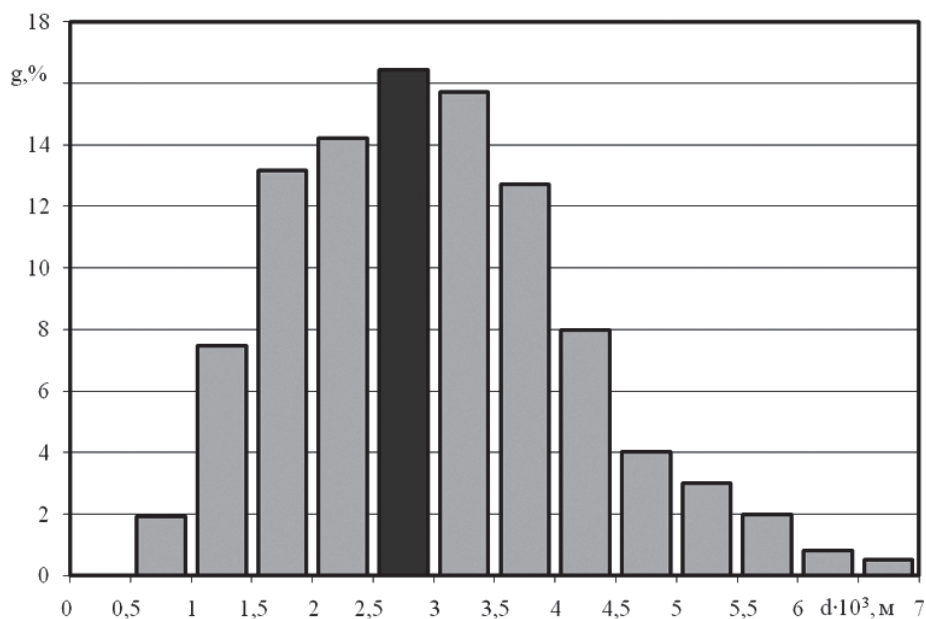


Рис. 10. Распределение капель по диаметрам (демонстрационный образец генератора, перепад давления $\Delta p = 2,35 \cdot 10^5$ Па)

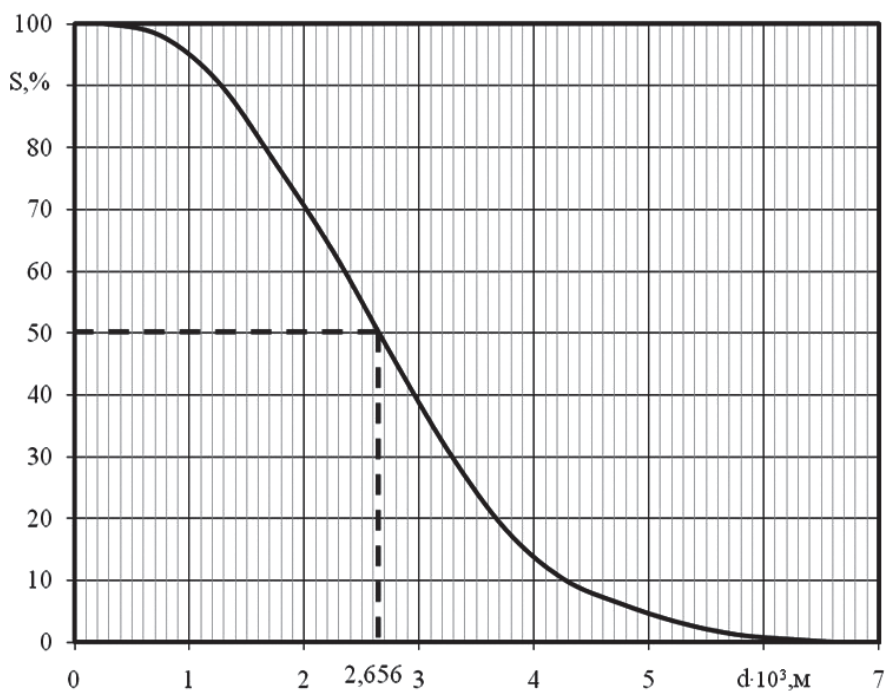


Рис. 11. Распределение относительной массы капель с диаметром больше заданного (демонстрационный образец генератора, перепад давления $\Delta p = 2,35 \cdot 10^5$ Па)

де давления на форсунке $\Delta p = 2,35 \cdot 10^5$ Па. Форсунка дает возможность сформировать сертификационный диапазон диаметров капельного потока в пределах $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-3}$ м, а также обеспечить значение среднего медианного диаметра $2,656 \cdot 10^{-3}$ м.

Библиографический список

1. Дос 10047. Руководство по организации контроля за обеспечением авиационной безопасности. Создание государственной системы контроля за обеспечением авиационной безопасности и управление этой системой. — Монреаль, Канада: Международная организация гражданской авиации (ИКАО), 2015. — 72 с.

2. Airworthiness Directive No. 2017-0144. ATA 30 — Ice and Rain Protection — Horizontal Stabilizer De-Icing Boots — Inspection / Replacement. Aircraft Flight Manual — Amendment. — European Aviation Safety Agency (EASA), 09 August 2017. — 4 с.
3. *Клинский Б.М., Кудрявцев А.В.* Обоснование требований по величине весовой концентрации и дисперсности капель воды при проектировании стендовой установки для имитации попадания дождя // Двигатель. 2012. № 3(81). С. 10-12.
4. *Пергулев Л.П., Тронов В.П.* Дробление капель в трубопроводе // Инженерно-физический журнал. 1998. Т. 71. №3. С. 468-472.
5. *Пажи Д.Г., Прахов А.В., Равикович Б.Б.* Форсунки в химической промышленности. — М.: Химия, 1971. — 224 с.
6. *Rayleigh L.* On the Instability of jets // Proceedings of the London Mathematical Society. 1879. Vol.10, pp. 4-10.
7. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. — М.: Межгосударственный авиационный комитет, АВИАИЗДАТ, 2012. — 78 с.
8. *Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Абере Гобезе, Добренко А.А.* Исследование характеристик пневматической форсунки // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 12. С. 38-45.
9. *Калинина К.Л., Гурьянов А.И.* Разработка и исследование устройства для имитации атмосферного дождя при проведении сертификационных испытаний авиационных двигателей // Тезисы 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика — 2016». М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 276-278.
10. *Гурьянов А.И., Добренко А.А., Абере Гобезе.* Экспериментальное исследование характеристик распыла вихревых пневматических форсунок // Материалы Третьей международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках». М.: Изд. дом МЭИ, 2008. С. 1-15.
11. *Жданов В.И.* Кавитационные колебания в двухступенчатых форсунках // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т.14. №3. С. 59-63.
12. *Пажи Д.Г., Галустов В.С.* Основы техники распыливания жидкостей. — М.: Химия, 1984. — 256 с.
13. *Пажи Д.Г., Галустов В.С.* Распылители жидкостей. — М.: Химия, 1979. — 216 с.
14. *Лепешинский И.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А., Зуев Ю.В.* Влияние граничных условий системы «сопло-струя» на распространение двухфазных газочапельных струй // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 75-84.
15. *Абере Г.Г., Гурьянов А.И.* Экспериментальное исследование характеристик распыла вихревых пневматических форсунок // Третья международная конференция «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 21-23 октября 2008, Москва. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. С. 177-178.
16. *Мингазов Б.Г., Мухаметгалиев Т.Х.* Исследование эмиссии токсичных веществ при впрыске воды в камеру сгорания // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. № 5(29). С. 203-207.
17. *Вачагин К.Д., Николаев В.С.* Движение потоков вязкой жидкости по поверхности быстровращающегося плоского диска // Химия и химические технологии. 1960. Т. 3. № 6. С. 71-76.
18. *Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Ягодкин В.И.* Распыливание жидкостей. — М.: Машиностроение, 1967. — 260 с.
19. *Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И.* Распыливание жидкостей форсунками. — М.: Госэнергоиздат, 1962. — 265 с.
20. *Васильев А.Ю.* Сравнение характеристик различных типов форсунок, работающих с использованием воздушного потока // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2007. № 2(13). С. 54-61.

STUDYING AN ATOMIZER FOR RAIN IMITATION WHILE AIRCRAFT ENGINES CERTIFICATION

Gur'yanov A.I. *, Kalinina K.L. **

Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
RGATU, 53, Pushkin str., Rybinsk, Yaroslavl region, 152934, Russia

* e-mail: marialex2004@mail.ru

** e-mail: cris.kalinina2012@yandex.ru

Abstract

The purpose of the study is creating an atomizer for aircraft engines testing while ingress of rain, as well as checking the sample for conformity to the standard requirements for testing facilities adopted for aircraft engines' certification.

The review of fluid spraying problems and methods, which formed the grounds for further selection of the liquid spraying scheme, was performed in this research work. The paper presents the description of the technique for the pursuance of the pilot studies of the atomizer with determination of the parameters such as

flow coefficient; water distribution irregularity ratio; rooted angle of a drip stream and drops distribution over the diameter with computation of the average median diameter. It presents also the scheme of installation for complex study of a water drip stream characteristics. Experimental studies of atomizer prototype models were performed according to the above said technique for the purpose of increase integral parameters of the efficiency, as well as compliance check of range of drops diameters from $0.5 \cdot 10^{-3}$ to $7 \cdot 10^{-3}$ m, and the value of average median diameter of $2.66 \cdot 10^{-3}$.

The tests allowed revealing the relationship between the geometric characteristics of atomizers and drip flows being obtained. Development of the most suitable prototype of atomizer allowed obtain the drops within the certification range with average median diameter of $2,656 \cdot 10^{-3}$ m.

The results of the work are as follows: the problems of rain imitation were analyzed, the technique for the atomizer testing was developed, and the atomizer design was offered and substantiated. Experimental studies of parameters of the above said atomizer were performed design, and its conformity to certification requirements was confirmed.

Keywords: inverse problem, median diameter, droplets spectrum, two-phase flow.

References

1. *Doc 10047. Rukovodstvo po organizatsii kontrolya za obespecheniem aviatsionnoi bezopasnosti. Sozdanie gosudarstvennoi sistemy kontrolya za obespecheniem aviatsionnoi bezopasnosti i upravlenie etoi sistemoi* (Aviation security monitoring manual. Establishing of the State System of Aviation Security controlling, and management of this system). Montreal, Canada, International Civil Aviation Organization (ICAO), 2015, 72 p.
2. *Airworthiness Directive No. 2017-0144. ATA 30 – Ice and Rain Protection – Horizontal Stabilizer De-Icing Boots – Inspection / Replacement. Aircraft Flight Manual – Amendment*. European Aviation Safety Agency (EASA), 09 August 2017, 4 p.
3. Klinskii B.M., Kudryavtsev A.V. *Dvigatel'*, 2012, no. 3(81), pp. 10-12.
4. Pergulev L.P., Tronov V.P. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1998, vol. 71, no. 3, pp. 468–472.
5. Pazhi D.G., Prakhov A.V., Ravikovich B.B. *Forsunki v khimicheskoi promyshlennosti* (Atomizers in the chemical industry), Moscow, Khimiya, 1971, 224 p.
6. Rayleigh L. On the Instability of jets. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1879, vol.10, pp. 4-10.
7. *Aviatsionnye pravila. Chast' 33. Normy letnoi godnosti dvigatelei vozdushnykh sudov* (Aviation rules. Part 33. Airworthiness standards of aircraft engines). Moscow, Mezghosudarstvennyi aviatsionnyi komitet, AVIAIZDAT, 2012, 78 p.
8. Piralishvili Sh.A., Gur'yanov A.I., Abere Gobeze, Dobrenko A.A. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2008, no. 12, pp. 38–45.
9. Kalinina K.L., Gur'yanov A.I. *Materialy XXV Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika – 2016"*, Moscow, MAI, 2016, pp. 276–278.
10. Gur'yanov A.I., Dobrenko A.A., Abere Gobeze. *Materialy III Mezhdunarodnoi konferentsii "Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh"*, Moscow, MEI, 2008, pp. 1–15.
11. Zhdanov V.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2007, vol. 14, no. 3, pp. 59-63.
12. Pazhi D.G., Galustov V.S. *Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkosti* (Fundamentals of liquids atomization engineering), Moscow, Khimiya, 1984, 256 p.
13. Pazhi D.G., Galustov V.S. *Raspyliteli zhidkosti* (Liquids atomisers), Moscow, Khimiya, 1979, 216 p.
14. Lepeshinskii I.A., Antonovskii I.V., Guzenko A.A., Zuev Yu.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 75–84.
15. Abere G.G., Gur'yanov A.I. *Materialy III Mezhdunarodnoi konferentsii "Teplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh"* (21-23 October 2008, Moscow), Moscow, MEI, 2008, pp. 177–178.
16. Mingazov B.G., Mukhametgaliev T.Kh. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2011, no. 5(29), pp. 203-207.
17. Vachagin K.D., Nikolaev V.S. *Khimiya i khimicheskie tekhnologii*, 1960, vol. 3, no. 6, pp. 71-76.
18. Borodin V.A., Dityakin Yu.F., Klyachko L.A., Yagodkin V.I. *Raspylivanie zhidkosti* (Liquids atomization), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 260 p.
19. Vitman L.A., Katsnel'son B.D., Paleev I.I. *Raspylivanie zhidkosti forsunkami* (Liquids atomization by atomizers), Moscow, Gosenergoizdat, 1962, 265 p.
20. Vasil'ev A.Yu. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2007, no. 2(13), pp. 54–61.