

УДК 621.452.3

Торба Ю. И.

начальник отдела ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

Павленко Д. В.

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии авиационных двигателей Национального университета «Запорожская политехника», ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВА РАСПЫЛА ПУСКОВОЙ ФОРСУНКИ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ ГТД ОТ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА

Цель работы. Установить зависимость среднего диаметра капель топлива в факеле распыла пусковой форсунки воспламенителя ГТД от перепада давления топлива.

Методы исследования. Экспериментальные методы, методы математической статистики.

Полученные результаты. Рассмотрены вопросы влияния перепада давления топлива на пусковой форсунке воспламенителя ГТД на средний диаметр капель в факеле распыла. Для оценки среднего значения диаметра капли жидкости реализована серия экспериментов по фиксации капель жидкости на специальной пластине при распыле воды пусковой форсункой центробежного типа с различным избыточным давлением, на основании которых получены изображения капель жидкости. Выполнена статистическая обработка результатов измерения диаметра капель жидкости. Установлено, что их диаметр подчиняется логнормальному закону распределения для всех исследованных давлений жидкости перед форсункой. Установлены основные закономерности распыла жидкости в зависимости от давления. Показано, что при давлении жидкости менее 0,2 МПа поток жидкости из форсунки представляет собой массив из отдельных крупных капель. Увеличение избыточного давления жидкости перед форсункой приводит к увеличению числа капель при резком уменьшении их размеров. При давлении перед форсункой более 0,2 МПа происходит эффективный распад струи жидкости на капли. Установлено, что среднеарифметическое и медианное значение диаметра капель жидкости в факеле сопла пусковой форсунки уменьшается по мере увеличения давления жидкости перед форсункой по степенной зависимости асимптотически приближаясь к постоянной величине. Обосновано, что увеличение давления жидкости перед форсункой более 0,25 МПа является нерациональным. Определены среднеарифметические и медианные значения диаметра капель жидкости при работе пусковой форсунки ГТД при избыточном давлении топлива, соответствующего эксплуатационному.

Научная новизна. Установлен закон распределения размера капель и зависимость среднего размера капель в факеле распыла топлива форсунки пускового устройства ГТД от перепада давления топлива.

Практическая ценность. Установленная зависимость среднего размера капель в факеле распыла топлива форсунки пускового устройства ГТД от перепада давления топлива используются при моделировании процесса горения в пусковом устройстве и оптимизации его конструкции численными методами.

Ключевые слова: пусковая форсунка; распыл; давление; топливо; размер капель; закон распределения.

1 ВВЕДЕНИЕ

Проектирование элементов системы топливной аппаратуры современных ГТД является одним из важных направлений повышения их надёжности и привлекательности на мировом рынке. Обеспечение устойчивой работы камеры сгорания на всех режимах работы ГТД и условиях эксплуатации летательного аппарата, а также его надежного перезапуска в полете, является одним из факторов повышения безопасности полетов.

Несмотря на то, что в настоящее время накоплен большой опыт по проектированию пусковых устройств камер сгорания и топливных форсунок, исследования в области разработки обо-

щенных рекомендаций по выбору их оптимальных параметров в зависимости от требуемых геометрических параметров и режимов работы, весьма ограничены. Большой вклад в развитие теории проектирования камер сгорания внес Кравченко И. Ф. с соавторами [1–3]. Результаты этих и ряда других исследований позволили надежно прогностировать параметры камер сгорания на этапе проектирования ГТД. Однако, работы, посвященные исследованию процессов, протекающих в пусковых устройствах и разработке рекомендаций по их проектированию, в настоящее время весьма ограничены.

Практика показала, что применяемый на сегодняшний день подход к проектированию пусковых устройств, основанный на изготовлении большого количества прототипов и их последующее испытание на натуральных стендах в широких диапазонах условий эксплуатации, является весьма затратным и не отвечает требованиям сегодняшнего дня. Очевидно, что наиболее рациональным путем проектирования является моделирование и испытание натурального образца с целью подтверждения заложенных характеристик.

Моделирование процессов течения газа и горения в настоящее время успешно реализуется методом конечных элементов [4, 5]. Однако, залогом получения достоверных результатов является использование надежных исходных данных. С точки зрения моделирования процесса горения в пусковых устройствах камеры сгорания ГТД одним из них являются параметры жидкого топлива, распыляемого топливной форсункой. Так как распыление топлива пусковой форсункой выполняется не в камеру сгорания, а в корпус пускового устройства, имеющего относительно небольшой внутренний объем, одним из основных параметров качества распыла является средний диаметр частиц топлива. Экспериментальные исследования форсунок различных конструкций показывают, что средний размер частиц топлива может находиться в диапазоне 13...40 мкм в зависимости от давления подачи топлива и перепадах воздуха [6]. В работе [7] показано, что размер частиц существенно зависит от давления и температуры топлива, особенностей движения воздушных потоков и ряда других факторов.

Таким образом, учитывая роль размера частиц топлива в организации устойчивого и эффективного горения и розжига топливной смеси в пусковом устройстве, а также тот факт, что размер частиц топлива является важным исходным параметром для моделирования процесса смесеобразования и горения методом конечных элементов и многообразии факторов, оказывающих на него влияние, экспериментальные исследования влияния режимов работы на размер частиц топлива для форсунки исследуемой конструкции является весьма актуальными.

Целью настоящего исследования являлось установление закономерностей изменения размеров частиц топлива, распыляемого пусковой топливной форсункой воспламенителя в зависимости от режимных параметров. Для ее достижения были решены задачи, связанные с проведением натурального эксперимента по распылу жидкости пусковой форсункой ГТД при различном давлении, исследованию размеров частиц жидкости, а также их статистической обработке.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили для пусковой форсунки центробежного типа, предназначенной для подачи распыленного топлива в пусковое устройство камеры сгорания ГТД (рис. 1а). Ее работа сопровождается распылением топлива и создания облака из топливной пыли при избыточном давлении перед соплом форсунки (рис. 1б).

Изучение качества распыла жидкости выполняли в диапазоне избыточных давлений 0,05...0,45 МПа. Дискретность изменения давления составляла 0,05 МПа.

Для определения диаметра капель в факеле распыла пусковую форсунку фиксировали на штативе перед каплеотборной системой на расстоянии 300 мм (рис. 1б). Каплеотборник позволял каплям потока оседать на поверхность спец. пластины (фторопласт). Время захвата распыла составляло порядка $3 \cdot 10^{-2}$ с, что обеспечивалось совпадением окна цилиндра, вращающегося перед форсункой (рис. 1в). Цилиндр приводился в движение системой, состоящей из блока, груза и спускового механизма. Система питания испытываемой пусковой форсунки показана на рис. 2.

В качестве жидкости использовали дистиллированную воду при комнатной температуре. Распределение капель жидкости на специальной пластине фиксировали при помощи микроскопа МБС-9 и камеры высокого разрешения. Расчет размера капель выполняли при помощи программы Image Pro Plus по трем изображениям для каждого режима работы форсунки. Статистическую обработку результатов измерения выполняли в программе STATISTICA.

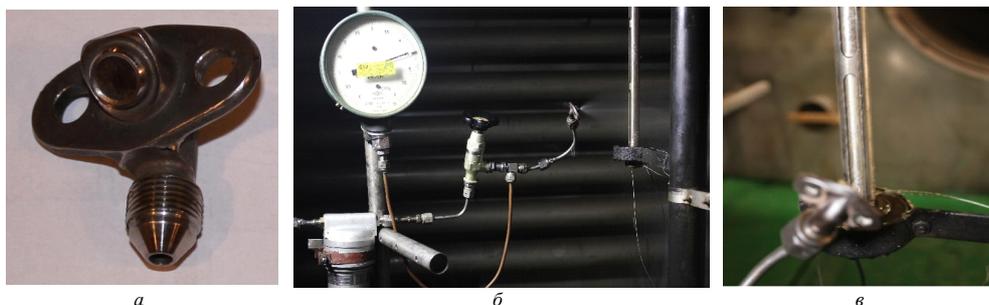


Рисунок 1. Общий вид пусковой топливной форсунки (а), создаваемого ей факела распыла жидкости (б) и устройства для фиксации попадания капель на спец. пластину (в)

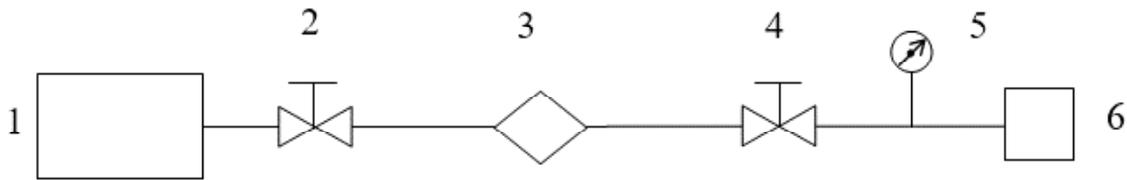


Рисунок 2. Схема системы питания форсунки: 1 – бак, источник воды под давлением; 2 – кран грубой регулировки; 3 – фильтр; 4 – кран тонкой регулировки; 5 – манометр, регистрирующий давление перед форсункой; 6 – форсунка пусковая

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Качество распыла жидкости исследовали для 7-ми режимов соответствующим различным давлением и расходам (табл. 1).

Анализ вида факела распыла для различных режимов работы пусковой форсунки показывает, что для режимов 1–3 поток жидкости из форсунки представлял собой массив из отдельных крупных капель (рис. 3а–в). Увеличение избыточного давления жидкости перед форсункой приводило к увеличению числа капель при уменьшении их размера. Для режимов 4–7 наблюдался эффективный распад струи жидкости на капли и образование облака различной интенсивности (рис. 3г–ж).

Для определения размеров капель, при помощи каплеотборника были взяты пробы из потока.

Общий вид поля капель жидкости на предметном стекле для каждого из исследованных режимов показан на рис. 4.

Анализ законов распределения размеров капель в зависимости от режима испытания показывает, что для всех режимов наблюдается логнормальное распределение измеряемой величины. Известно, что такой тип распределения имеет место, когда на описываемый объект воздействует множество случайных и независимых факторов. При этом логнормальное распределение указывает на то, что воздействия каждого из факторов не складываются, а перемножаются, т.е. имеется мультипликативный характер взаимодействия. Факторы также независимы, как и в случае нормального распределения, но эффект от их воздействия накапливается в объекте в зависимости от предыдущего их количества (рис. 5).

Таблица 1. Режимные параметры испытаний пусковой форсунки

№ п/п	Давление жидкости, МПа	Расход жидкости, г/с	Расход жидкости, г/мин
1	0,05	0,8	48
2	0,1	1,1	66
3	0,15	1,3	78
4	0,2	1,4	84
5	0,25	1,6	96
6	0,3	1,7	102
7	0,35	1,8	108

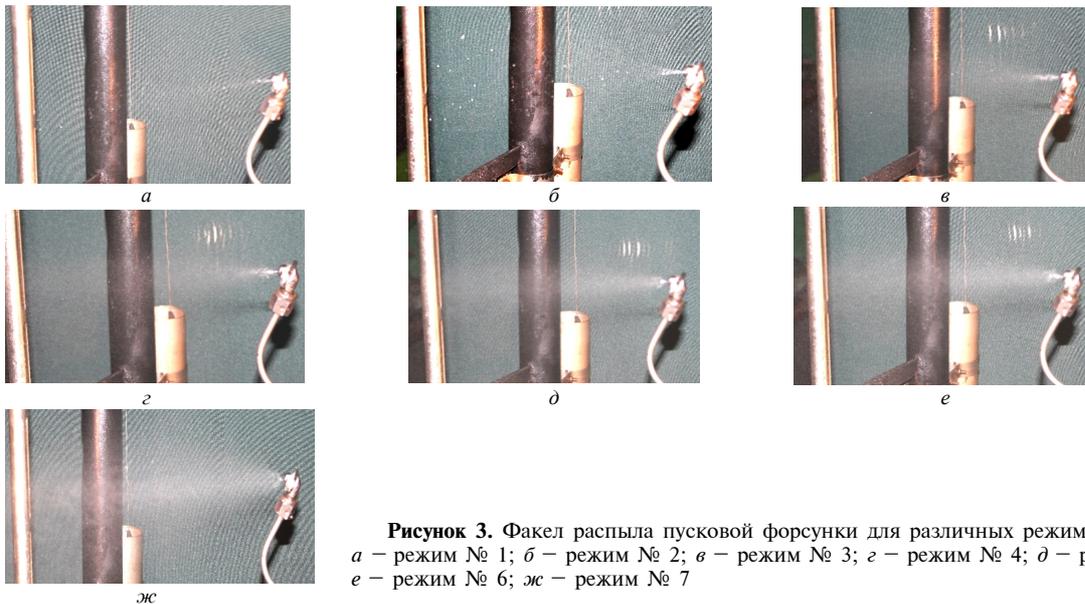


Рисунок 3. Факел распыла пусковой форсунки для различных режимов работы: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3; г – режим № 4; д – режим № 5; е – режим № 6; ж – режим № 7

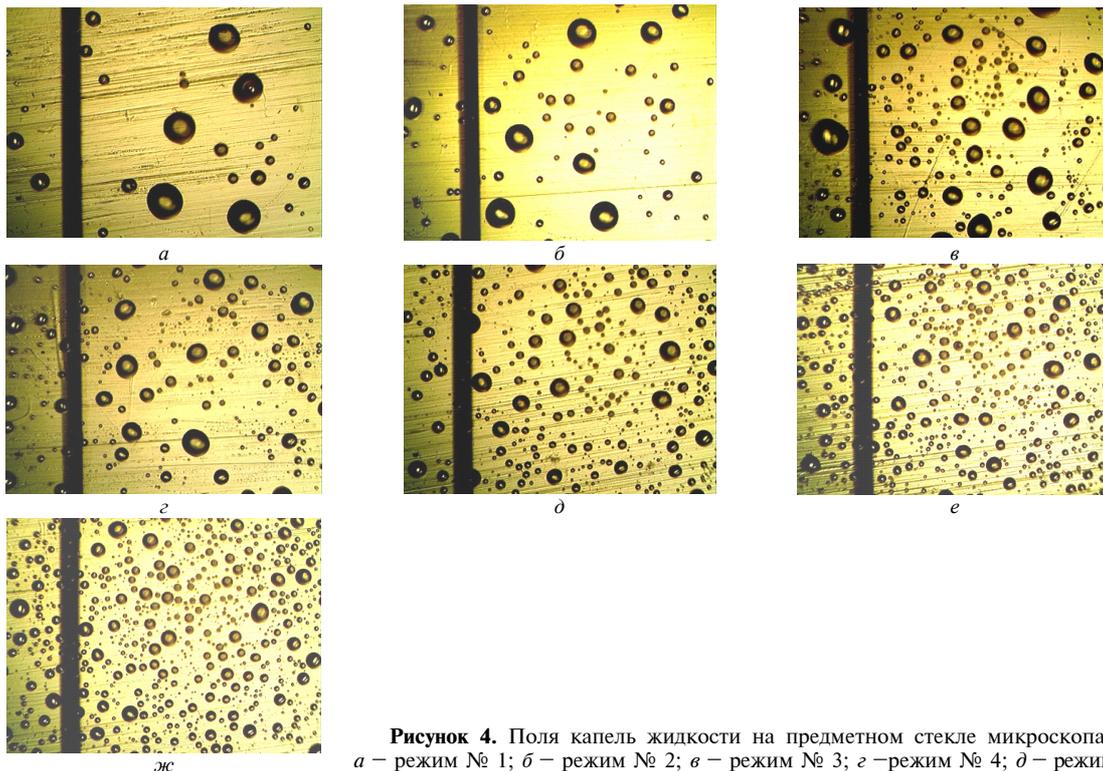
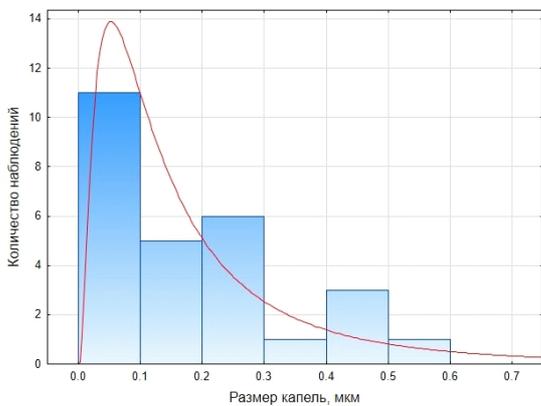
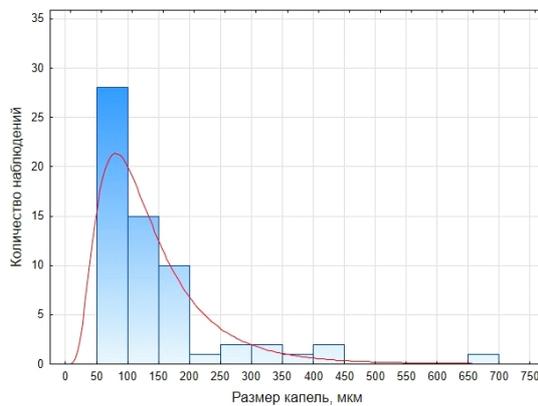


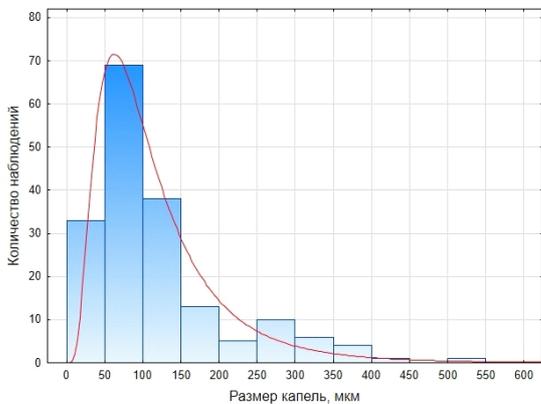
Рисунок 4. Поля капель жидкости на предметном стекле микроскопа (х30): *a* – режим № 1; *б* – режим № 2; *в* – режим № 3; *г* – режим № 4; *д* – режим № 5; *е* – режим № 6; *ж* – режим № 7



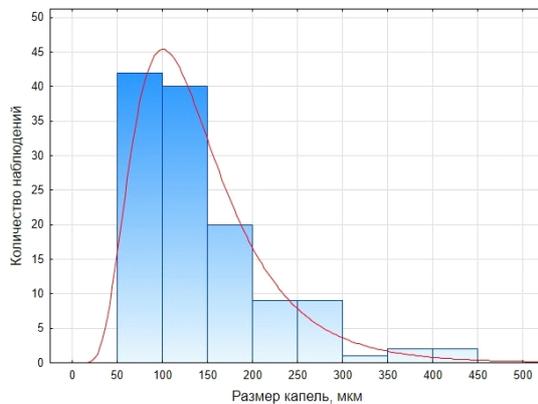
a



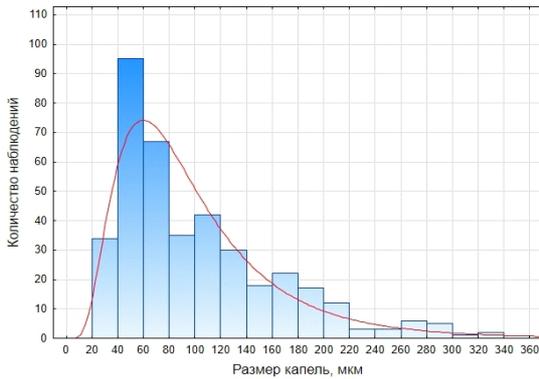
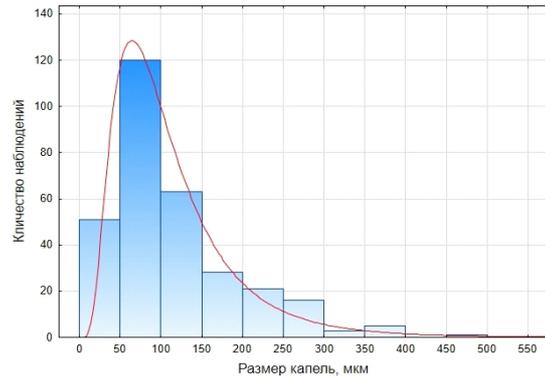
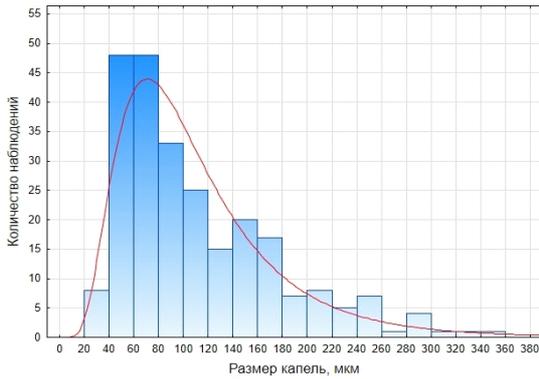
б



в



г



е

Рисунок 5. Гистограммы и кривые логнормального распределения для исследованных режимов работы пусковой форсунки: а – режим №1; б – режим № 2; в – режим №3; г – режим № 4; д – режим № 5; е – режим № 6; ж – режим № 7

Результаты статистической обработки измерений для каждого режима испытаний, с учетом установленного закона распределения исследуемой величины, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты статистической обработки измерений диаметра капель в зависимости от режима работы пусковой форсунки

№ режима	Среднеарифметическое значение диаметра, мкм	Медианное значение диаметра, мкм	Стандартная ошибка, мкм
1	191,2	132,1	3,16
2	144,3	113,5	8,2
3	123,6	100,5	6,74
4	119,5	92,2	6,86
5	111,7	93,4	4,12
6	114,4	88,4	4,44
7	101	79,8	3,18

Как видно из табл. 2 и рис. 6, среднеарифметическое и медианное значение диаметра капли жидкости в факеле сопла пусковой форсунки уменьшается по мере увеличения давления жидкости перед форсункой по степенной зависимости:

$$D_{\text{капли}} = 74,12 \cdot p^{-0,3} \quad (R^2 = 0,96) \quad \text{— для среднеарифметического среднего значения;}$$

$$D_{\text{капли}} = 64,2 \cdot p^{-0,24} \quad (R^2 = 0,96) \quad \text{— для медианного значения,}$$

где $D_{\text{капли}}$ – диаметр капли жидкости, мкм;
 p – давление жидкости перед форсункой, МПа.

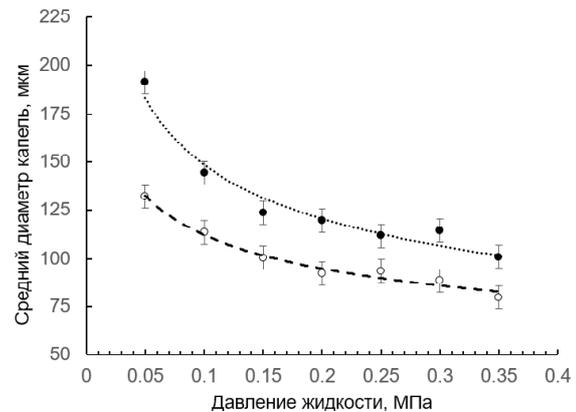


Рисунок 6. Зависимости среднего размера капель от избыточного давления в пусковой форсунке ГТД; ● – среднеарифметическое значение диаметра капель; ○ – медианное значение диаметра капель

Исследования изменения диаметра капель частиц жидкости в факеле распыла пусковой форсунки в зависимости от перепада давления позволили установить, что он уменьшается с увеличением давления, асимптотически приближаясь к постоянной величине. Таким образом, несмотря на то, что увеличение давления жидкости перед форсункой более 0,25 МПа и приводит к некоторому уменьшению среднего диаметра капель, дальнейшее его увеличение является нерациональным с точки зрения усложнения конструкции топливной аппаратуры и нарузок на нее.

4 ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования качества распыла пусковой форсунки воспламенителя ГТД от перепада давления топлива позволили установить, что в рабочем диапазоне давления жидкости перед форсункой, составляющем 0,25 МПа среднее среднеарифметическое значение диаметра капель составляет $117 \pm 4,17$ мкм, а медианное значение составляет $93,4 \pm 4,17$ мкм. Учитывая, что среднеарифметическое значение может быть повышено из-за наличия крупных капель, которые получаются путем слияния более мелких на предметном стекле, для практических расчетов процесса горения в пусковых устройствах камер сгорания ГТД численным методом, с целью оптимизации ее конструкции и обеспечения устойчивости работы, рационально использовать медианное значение.

Учитывая особенности конструкции воспламенителей современных ГТД, одним из требований к которым являются малые габариты, перспективным направлением исследований является проведение установления закономерности распыла топлива на расстоянии соизмеримом с размерами камеры воспламенителя. Также, учитывая разницу в свойствах воды и керосина, целесообразным является исследование распыла керосина, применяемого как топлива для ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко И. Ф. Концепция решения проблемы запуска камеры сгорания при создании и доводке ГТД с низким выбросом вредных веществ / И. Ф. Кравченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 7. – С. 40–51

2. Кравченко И. Ф. Расчетная оценка воспламеняемости топливовоздушной смеси в камере сгорания ГТД / И. Ф. Кравченко, В. Е. Костюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10. – С. 100–106.
3. Костюк В. Е. Расчетно-экспериментальное исследование устройства предварительного смешения топливного газа с воздухом для низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ / В. Е. Костюк, И. Ф. Кравченко, В. Н. Гусев, Е. И. Кирилад // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 4. – С. 46–53.
4. Третьяков В. В. Моделирование испарения и смешения топлива с воздухом в камере сгорания / В. В. Третьяков // *Авиационная и ракетно-космическая техника*. – 2011. – № 5 (29). – С. 227–235.
5. Костюк В.Е. Численное моделирование гидравлических характеристик и температурного поля газа камеры сгорания малоразмерного ГТД / В. Е. Костюк, Е.И. Кирилад // *Вісник двигунобудування*. – 2010. – № 2. – С. 124–130.
6. Исследование распыла топлива и смесеобразования в головной части камеры сгорания двигателей типа «НК» / А. Ю. Васильев, А. И. Майорова, А. А. Свириденков и др. // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2002. – №2. – С. 10–14.
7. Rizk N. K. Modeling of Gas Turbine Fuel Nozzle Spray / N. K Rizk, J. S. Chin, M.K. Razdan // *Modeling Journal of Engineering for GasTurbines and Power*, 1997. – Vol. 119(1). – P. 34–44.

Статья поступила в редакцию 22.05.2019

Торба Ю. І. начальник відділу ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

Павленко Д. В. канд. техн. наук, доцент, професор кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», провідний інженер ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЯКОСТІ РОЗПИЛУ ПУСКОВОЇ ФОРСУНКИ ЗАПАЛЬНИКА ГТД ВІД ПЕРЕПАДУ ТИСКУ ПАЛИВА

Мета роботи. Встановити залежність середнього діаметра крапель палива у факелі розпилу пускової форсунки запальника ГТД від перепаду тиску палива.

Методи дослідження. Експериментальні методи, методи математичної статистики.

Отримані результати. Розглянуті питання щодо впливу перепаду тиску палива на пусковій форсунці запальника ГТД на середній діаметр крапель у факелі розпилу. Для оцінки середнього значення діаметра краплі рідини реалізована серія експериментів щодо фіксації крапель рідини на спеціальній пластині при розпилі води пусковою форсункою відцентрового типу з різним надлишковим тиском, на підставі яких отримані зображення крапель рідини. Виконана статистична обробка результатів виміру діаметра крапель рідини. Встановлено, що їх діаметр підкоряється логнормальному закону розподілу

для всіх досліджених тисків рідини перед форсункою. Встановлені основні закономірності розпилу рідини залежно від тиску. Показано, що при тиску рідини менш 0,2 МПа потік рідини з форсунки являє собою масив з окремих великих крапель. Збільшення надлишкового тиску рідини перед форсункою приводить до збільшення числа крапель при різкому зменшенні їх розмірів. При тиску перед форсункою більш 0,2 МПа відбувається ефективний розпад струменя рідини на краплі. Встановлено, що середньоарифметичне та медіанне значення діаметра крапель рідини у факелі сопла пускової форсунки зменшується в міру збільшення тиску рідини перед форсункою відповідно до статичної залежності асимптотично наближаючись до постійної величини. Обґрунтовано, що збільшення тиску рідини перед форсункою більш ніж 0,25 МПа є нераціональним. Визначені середньоарифметичні та медіанні значення діаметра крапель рідини при роботі пускової форсунки ГТД при надлишковому тиску палива, що відповідає експлуатаційному.

Наукова новизна. Встановлено закон розподілу розміру крапель і залежність середнього розміру крапель у факелі розпилу палива форсунки пускового пристрою ГТД від перепаду тиску палива.

Практична цінність. Встановлена залежність середнього розміру крапель у факелі розпилу палива форсунки запальника ГТД від перепаду тиску палива використовуються при моделюванні процесу горіння в пусковому пристрої та оптимізації його конструкції чисельними методами.

Ключові слова: пускова форсунка; розпил; тиск; паливо; розмір крапель; закон розподілу.

Torba Ju. I.

Head of the department, Zaporozhe machine-building design bureau progress state enterprise named after academician A.G. Ivchenko

Pavlenko D. V.

Ph.D, Associate Professor, Professor of the Aircraft Engines Technologies Department of National University «Zaporizka politeknika», Lead Engineer of State enterprise "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@mail.com

THE DEPENDENCE OF QUALITY SPRAY STARTING SPRAYER OF THE GTE IGNITER FROM THE FALL PRESSURE DROP

Purpose. To establish the dependence of the average diameter of the droplets of fuel in the plume of the spray start-up for the GTE igniter from the pressure drop of the fuel.

Methodology. Experimental methods, the methods of mathematical statistics.

Findings. The issues of the influence of the differential pressure of the fuel at the starting nozzle of the GTE igniter on the average diameter of droplets in the spray gun are considered. To estimate the average value of the diameter of a liquid drop, a series of experiments on the fixation of liquid drops on the specific plate when spraying water with a centrifugal type starting nozzle with different overpressure on the basis of which images of liquid droplets were obtained. A statistical processing of the results of measuring the diameter of liquid droplets has been completed. It has been established that their diameter obeys the log-normal distribution law for all investigated fluid pressures in front of the nozzle. Established the basic patterns of sprayed liquid, depending on pressure. It is shown that when the fluid pressure is less than 0.2 MPa, the fluid flow from the nozzle is an array of individual large drops. The increase in excess fluid pressure in front of the nozzle leads to an increase in the number of drops with a sharp decrease in their size. When the pressure in front of the nozzle is more than 0.2 MPa, the jet of liquid is effectively disintegrated into droplets. It is established that the average arithmetic and median value of the diameter of liquid droplets in the nozzle plume of the starting nozzle decreases as the pressure of the liquid in front of the nozzle increases as a power dependence asymptotically approaching a constant value. It has been substantiated that an increase in fluid pressure in front of the nozzle more than 0.25 MPa is non-manual. The arithmetic mean and median values of the diameter of the liquid droplets are determined when the GTE starting nozzle is operating with an excessive pressure of fuel corresponding to the operational one.

Scientific novelty. The law of the droplet size distribution and the dependence of the average droplet size in the fuel spray nozzle of the GTE start-up device on the fuel pressure drop is established.

Practical value. The established dependence of the average size of droplets in the spray nozzle of the GTE start-up device on the fuel pressure drop is used in simulating the combustion process in the starting device and optimizing its design by numerical methods.

Key words. starting injector; spray; pressure; fuel; droplet size; distribution law; law.

REFERENCES

1. Kravchenko I. F. (2005) Kontseptsiya resheniya problemy zapuska kamery sgoraniya pri sozdanii i dovodke GTD s nizkim vybrosom vrednykh veshchestv [The concept of solving the problem of starting the combustion chamber during the creation and fine-tuning of the GTE with low emission of harmful substances]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya - Aerospace Engineering and Technology*, 7, 40–51. (in Russian)
2. Kravchenko I. F., Kostyuk V. E. (2005) Raschetnaya otsenka vosplamenyayemosti toplivovozdushnoy smesi v kamere sgoraniya GTD [Estimated assessment of the flammability of the air-fuel mixture in the combustion chamber of the GTE]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya - Aerospace Engineering and Technology*, 10, 100–106. (in Russian)
3. Kostyuk V. E., Kravchenko I. F., Gusev V. N., Kirilash E. I. (2009) Raschetno-eksperimental'noe issledovanie ustroystva predvaritel'nogo smesheniya toplivnogo gaza s vozdukhom dlya nizkoemissionnykh kamer sgoraniya GTU [Computational and experimental study of the device of preliminary mixing of fuel gas with air for low-emission combustion chambers of GTU]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya - Aerospace Engineering and Technology*, 4, 46–53. (in Russian)
4. Tret'yakov V.V. (2011) Modelirovanie ispareniya i smesheniya topliva s vozdukhom v kamere sgoraniya [Simulation of evaporation and mixing of fuel with air in the combustion chamber] *Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika - Aviation and rocket and space technology*, 5(29), 227–235. (in Russian)
5. Kostyuk V.E., Kirilash E.I. (2010) Chislennoe modelirovanie gidravlicheskiy kharakteristik i temperaturnogo polya gaza kamery sgoraniya malorazmernogo GTD [Numerical modeling of the hydraulic characteristics and temperature field of the gas of the combustion chamber of a small GTE]. *Visnik dvigunobuduvannya – Herald of aeroenginebuilding*, 2, 124–130. (in Russian)
6. Vasilev A. Yu., Mayorova A. I., Sviridenkov A. A., Tret'yakov V. V., Yagodkin V. I. (2002) Issledovanie raspyla topliva i smeseobrazovaniya v golovnoy chasti kamery sgoraniya dvigateley tipa “NK” [Investigation of fuel spray and mixture formation in the head part of the combustion chamber of “NK” type engines] / A. Yu. Vasil'ev // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta - Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2, 10–14. (in Russian)
7. Rizk, N. K., Chin, J. S., Razdan, M. K. (1997) Modeling of Gas Turbine Fuel Nozzle spray. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 119(1), 34–44. (in English)