

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ МОДЕЛЬНЫМИ ФРОНТОВЫМИ УСТРОЙСТВАМИ КАМЕР СГОРАНИЯ

©2011 А. Ю. Васильев, А. А. Свириденков, В. В. Третьяков

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований характеристик топливовоздушных аэрозолей, генерируемых различными модельными фронтными устройствами камер сгорания перспективных схем. Выявлено влияние подачи воздуха в центральный канал форсунки на конфигурацию зоны обратных токов и характеристики факела распыла. Выполнено сравнительное исследование факелов распыла за фронтными устройствами различных типов. Получены данные по распылу жидких пленок с поверхностей пластин и распределениям в потоке пульсаций концентраций.

Камера сгорания, форсунка, факел распыливания, визуализация.

Постановка задачи

В данной работе экспериментальное исследование распыливания жидкости будет проведено применительно к фронтным устройствам камер сгорания перспективных схем, а именно к камерам сгорания с многоярусными завихрителями. Схемы рассматриваемых фронтных устройств

представлены на рис. 1, а, б. Поскольку использование многоярусных завихрителей является некоторой альтернативой по отношению к традиционным, то в работе рассматривается также распыл топлива обычными двухъярусными завихрителями (рис.1, в).

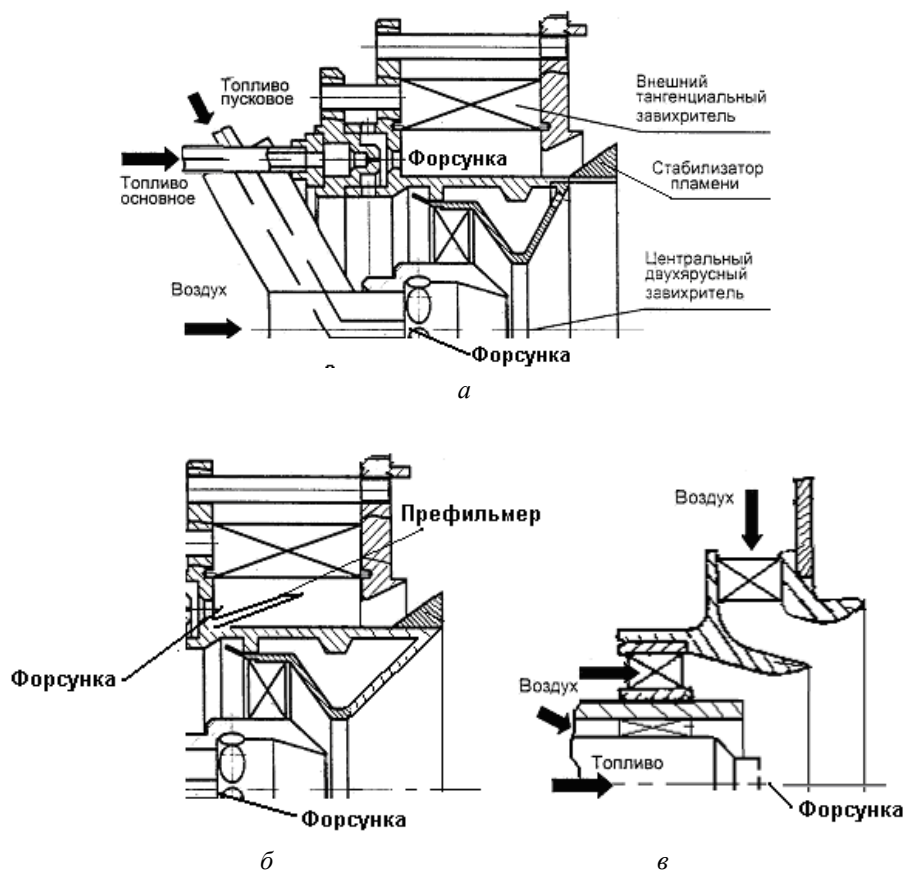


Рис. 1. Схемы фронтных завихрительных устройств:
а - трехъярусный модуль МОГОС;

б - трехъярусный модуль с префильмером (МОГОС-П); в - двухъярусный завихритель

Из рис.1 видно, что в двухъярусном завихрителе распыливание топлива производится непосредственно форсункой, установленной на оси фронтального устройства, в то время как в обоих вариантах модуля МОГОС (МОдуль с ГОмогенизацией горючей Смеси) происходит многостадийный распыл топлива: часть топлива, распыленного форсунками, попадает на стенки завихрительного устройства или префильмер, образует на них жидкие плёнки и впоследствии распыливается с острых кромок. Таким образом, исследование процесса распыливания топлива данными фронтальными устройствами можно разбить на решение следующих задач: 1) распыливание топлива форсунками, 2) формирование и распыл жидких плёнок с острых кромок пластин, 3) исследование взаимодействия факелов распыла за фронтальными устройствами. В данной работе это исследование состоит в определении геометрических характеристик факелов распыла, дисперсного состава образующегося аэрозоля и нахождения распределения концентраций капельно-жидкого топлива в рабочем объёме. Поскольку проведение экспериментов во внутренних областях камеры сгорания является чрезвычайно сложной технической задачей, то данное исследование будет проведено в основном для капельно-воздушных потоков, распространяющихся в затопленном пространстве.

Методика проведения опытов

В экспериментах по исследованию характеристик распыла топлива использовалась разработанная в ЦИАМ установка, оснащённая лазерными средствами диагностики топливных факелов [1]. В опытах определялись мелкость распыливания капель и их распределение в измерительном объёме, а также расходы воздуха и топлива через завихрители и форсунку исследуемого модуля. Оптическая часть установки состояла из гелий-неонового лазера, системы линз, коллиматоров и приёмника излучения рассеянного света. Установка оснащена измерителями расходов жидкого топлива и воздуха, а также датчиками давления. От-

носительная погрешность измерений расходов топлива и воздуха, а также давления не превышала 1%.

Оптический метод измерения среднезаутеровского диаметра капель и их концентрации в факеле распыла состоит в сравнительном измерении интенсивности рассеянного света, проходящего через щели различной конфигурации: плоскую I_1 и секторную I_2 . В этом методе (малоугловой метод) размер капель D_{32} измеряется вдоль луча с использованием соотношения: $D_{32} = 3 \cdot I \cdot g \cdot f / 16 \cdot d \cdot (I_1 / I_2)$. После определения D_{32} , при известной длине луча L , по ослаблению падающего света I_0 определяется концентрация частиц в объёме C_v (величина C_v безразмерна и пропорциональна относительному объёму капель в воздухе). Точность измерения величины D_{32} в диапазоне $5 < D_{32} < 100$ мкм составляет 5%.

Кроме малоуглового метода (ММ) в работе использован более точный и информативный метод флуоресцентно-поляризационного отношения (ФПО), который позволяет определять как средние, так и пульсационные значения концентраций топлива в факеле. Метод ФПО основан на измерении интенсивностей флуоресценции I_F и поляризованной компоненты рассеянного на каплях света I_S . Для возбуждения флуоресцентного излучения в исследуемую жидкость добавляется краситель и производится облучение её световым потоком от лазера. Лазерный луч, пройдя через факел распыленного топлива, подкрашенного флуоресцирующей присадкой оксихинолина, рассеивается на каплях и возбуждает флуоресценцию. Цветное изображение сечения топливного факела лазерной плоскостью регистрируется цифровой фото- или видеокамерой, оптическая ось которой направлена под углом к лазерной плоскости. Таким образом, в каждой точке изображения сечения факела лазерной плоскостью регистрируются интенсивности флуоресценции I_F и вертикально поляризованная компонента Ми-рассеянного на каплях света I_S . Информация с видеокамеры подаётся на ЭВМ, где она обрабатывается и производятся расчёты среднезаутеровского диаметра D_{32} капель и их

объёмной концентрации C_V : $D_{32} \sim I_F / I_S$, а $C_V \sim I_F$.

В качестве тестовых проведены измерения размеров и концентрации капель в факеле эталонной пневматической форсунки обоими методами. Полученные распределения удовлетворительно согласуются между собой.

Для определения пульсаций концентрации использовалась многократная съёмка факела распыла и проводилась специальная обработка полученных изображений на ЭВМ. Для получения геометрических характеристик факелов, а также визуального наблюдения за процессом распада жидких плёнок применялась фотосъёмка.

Исследование факелов распыла форсунок

Целью первого этапа этой работы была отработка схемы топливоподачи для формирования желательных характеристик топливного аэрозоля. Получено, что при выборе надлежащих геометрических параметров форсунки, формы, взаимного расположения и размеров сопла, шнека и топливных наконечников можно существенно повлиять на характеристики топливного факела [2]. На рис.2 в качестве примера приведены фотографии топливного факела, создаваемого обычной пневматической форсункой (рис.2, а) и форсункой со специальным наконечником (рис.2, б).

В первом случае угол раскрытия факела составляет 60° , во втором – 80° . При этом концентрация топлива оставалась максимальной на оси потока, т.е. взаимодействие струй с активной частью потока воздуха не было достаточно сильным и не приводило к существенному увеличению радиальной скорости капель топлива.

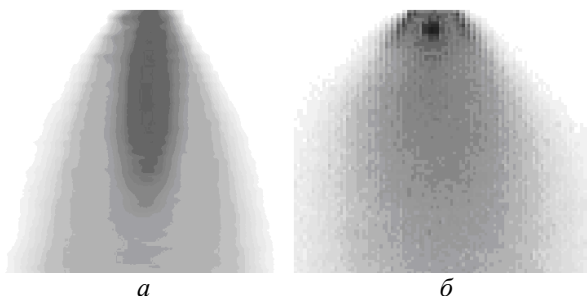


Рис. 2. Визуализация топливовоздушного факела

При использовании распылителей с наклонными струями топлива, пересекающими поток воздуха внутри форсунки, концентрация капель в факеле распыла становится более равномерной (рис.3).



Рис. 3. Визуализация топливовоздушного факела с наклонной подачей струй

Оценки показывают, что в рабочем, для форсунок, диапазоне числа Вебера составляют величины порядка 2–4, что значительно меньше критического значения ($We_{кр}=10,6$). По этой причине образующиеся в факеле распыла топлива капли в дальнейшем не дробятся воздушным потоком, а хорошее распыливание может быть достигнуто за счёт формирования в потоке топливных плёнок, образующихся при слиянии дискретных струй или капель. При этом для достижения приемлемой мелкости распыливания топливная плёнка должна иметь одинаковую толщину и достаточную протяжённость для попадания её нераспавшейся части в воздушный поток. В этом случае изменение диаметра плёнки от выхода до начала распада приводит к значительному уменьшению её толщины и, как следствие, к улучшению мелкости распыливания (рис.4, а). В противном случае в факеле распыла наблюдаются системы дискретных струй и большое количество крупных капель (рис.4, б).

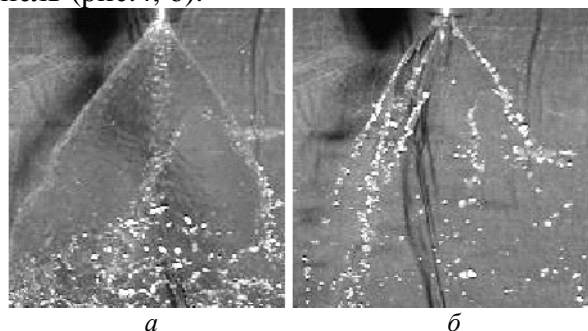


Рис. 4. Зависимость формы истечения топлива из сопла форсунки от заглубления b_0 шнека: а - заглубление $+0,3$ мм; б - заглубление $-0,5$ мм

Одним из новых и малоисследованных видов форсунок является пневматическая форсунка с центральным протоком воздуха. На рис.5 приведён фотоснимок топливовоздушного факела за такой форсункой и зависимость среднезауэтеровского диаметра каплей SMD от разности давлений воздуха в центральном канале и завихрителе форсунки.

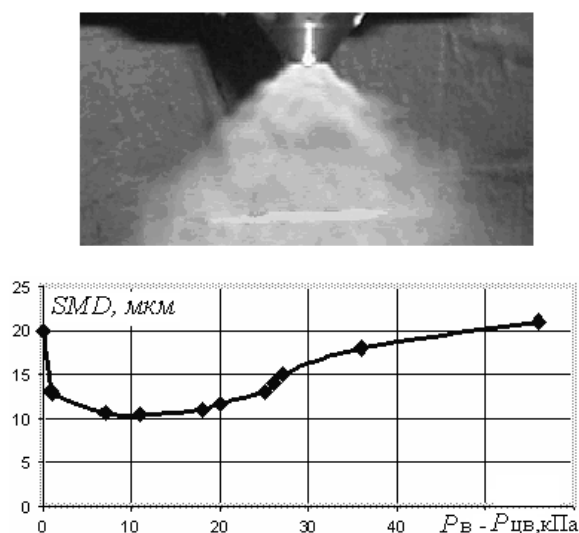


Рис. 5. Фотоснимок формы факела распыливания и зависимость среднезауэтеровского диаметра каплей SMD от разности давлений на входе воздуха в центральный канал и завихритель форсунки

Видно, что в результате подавления воздухом центрального канала форсунки зоны обратных токов на оси факела концентрация каплей становится достаточно равномерной. При этом имеет место стабилизация обоих потоков: и жидкости, и газа. Кроме того, при подаче воздуха вдоль оси наблюдается локальное уменьшение SMD (при $\Delta P_B - \Delta P_{ЦВ} = 10$ кПа для керосина в 30 мм от форсунки - до 10 мкм). Физически градиент давления поперёк плёнки стремится отклонить её в этом направлении. При недостаточном вдуве происходит схлопывание плёнки в струю, сопровождающееся её дроблением на крупные капли, а при чрезмерно высоких скоростях вдува, когда существенны эффекты нестационарности и дестабилизации течения, происходит преждевременное дробление толстой плёнки.

Анализ результатов опытов показал также, что в данном случае существенны процессы коагуляции каплей. На рис.6 приведены результаты испытаний пневматиче-

ской форсунки при наличии и отсутствии обдувающего воздуха. Видно, что процесс коагуляции каплей керосина наиболее интенсивно протекает на расстояниях 10–20 мм от сопла, где наблюдается наибольшая плотность топливного аэрозоля. На больших расстояниях происходит увеличение площади поперечного сечения топливовоздушного факела, расстояние между соседними каплями увеличивается, а их взаимодействие уменьшается.

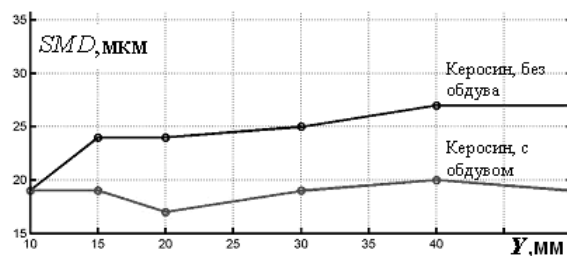


Рис. 6. Распределения размеров в зависимости от расстояния Y до сопла форсунки при наличии и отсутствии обдувающего воздуха

Отметим, что начальные точки кривых, соответствующих аэрации факела и отсутствию аэрации, совпадают. Это означает, что для керосина на 10 мм от среза форсунки дробление каплей полностью закончено. В дальнейшем дисперсность аэрозоля в обоих случаях слабо меняется с расстоянием. При этом средний размер каплей при их «естественной» коагуляции составляет 24–27 мкм, а при наличии аэрации, снижающей эффект коагуляции, - 17–20 мкм.

Исследования зависимости форм топливных факелов от режимов течения были проведены также для двухканальной центробежной форсунки [3]. При этом основное внимание уделялось образованию, устойчивости и распаду кольцевых жидких плёнок.

На рис.7 приведены примеры образования и разрушения топливных плёнок при различных расходах топлива (керосина) через форсунку. Топливная плёнка вблизи сопла форсунки имеет форму пузыря, размеры которого растут с увеличением расхода топлива и при некотором расходе образуется второй пузырь. Течение плёнки первого пузыря устойчивое, а на плёнке второго пузыря появляются возмущения, приводящие к отрыву каплей от его по-

верхности и образованию топливного факела.



а



б

Рис.7. Фотографии жидкой пленки за центробежной форсункой:
а - $G_F=1,86$ г/с; б - $G_F=3,32$ г/с

Вторичный распыл топлива с острых кромок распыливающих устройств

Пневматическое распыливание топлива с предварительным образованием пленки является уникальным средством получения хороших характеристик топливных аэрозолей при малых перепадах давления. В данной работе для исследования распыливания жидкости в канале с плоской

пластины-префильмера применена флуоресцентная визуализация капель. Топливная пленка на пластине формировалась круглой струей топлива, окруженной кольцевой струей воздуха и находящейся в сносимом воздушном потоке. На рис.8 приведены фотографии струи топлива, натекающего на пластину, помещенную в плоский канал, в потоке воздуха.

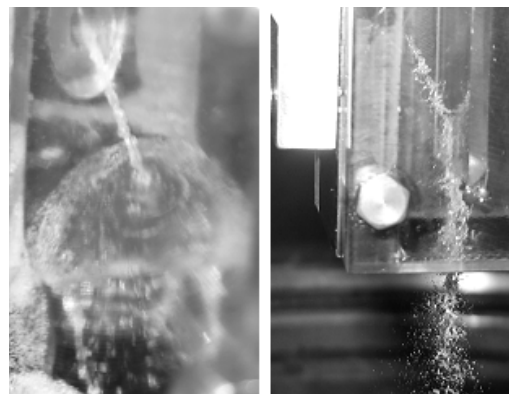


Рис.8. Фотография струи топлива, натекающего на пластину

Из рис.8 видно, как с кромки этой пластины стекает топливная пленка, образующаяся при соударении струи топлива с пластиной. Разрушение пленки наблюдалось и фотографировалось в следе за пластиной и на выходе из канала. Основное внимание в данной работе уделено распределениям и пульсациям концентрации капель за пластиной по пространству и времени.

В качестве распыливающего устройства использовалась форсунка типа Нукиямы-Танасавы, наклоненная под углом 35° к продольной оси канала. Топливо при перепаде давления на форсунке $DP_{\phi}=340$ кПа подавалось со скоростью 18 м/с в сносимый поток воздуха, имеющий скорость 53 м/с.

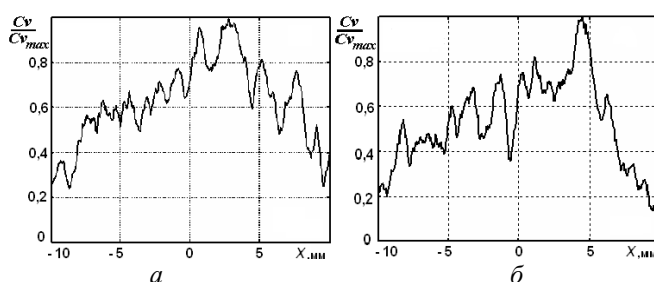


Рис.9. Распределение осредненной концентрации вдоль оси x

На рис.9 показаны распределения средних относительных значений концентрации вдоль кромки пластины (ось x) на расстоянии $y_0=22$ мм от края пластины. Точка ($x=0, z=0$) соответствует координате центра струи в месте её соприкосновения с пластиной. Рис.9, *а* соответствует распыливанию струи топлива, выходящего из сопла без спутного потока воздуха, рис.9, *б* – при наличии спутного потока.

Из приведённых на рис.9 распределений видно, что при взаимодействии жидкости с поверхностью пластины вследствие неустойчивости течения вдоль неё образуется квазипериодическая структура концентрации капель. Аналогичная структура наблюдается и в распределениях пульсаций концентрации. При подаче соосного топлива воздухом со скоростью 74 м/с (7% от расхода топлива) характеристики факела распыла за пластинкой изменяются. Спутный воздух разрушает периодическую структуру концентрации топлива вдоль пластины и в распределениях концентрации вблизи точки удара струи о пластину появляется ярко выраженный минимум (40% от максимального значения концентрации). Это можно объяснить следующим образом. Распыливающий воздух, соосный со струёй топлива, взаимодействует со стенкой, вблизи которой образуется застойная зона. При этом струя отклоняется от её первоначального направления и растекается в радиальных направлениях вдоль поверхности стенки. Одновременно происходит уменьшение пульсаций концентрации приблизительно на 15%. Наличие спутного потока воздуха приводит к сужению топливного факела в поперечном направлении (z) и увеличению скорости движения плёнки вдоль пластины. Последнее приводит к её утончению, что, в свою очередь, вызывает уменьшение размеров капель за пластинкой, в данном случае приблизительно на 30%. Это подтверждается и рис.10, где представлено распределение размеров капель в поперечном направлении при подаче спутного потока воздуха.

Из рисунка видно, что наиболее крупные капли наблюдаются в центральной области следа за распыливающей пластинкой. Отметим, что максимальное значение кон-

центрации C_v в экспериментах составляло $C_{v\max}=5.1 \times 10^{-4}$, а максимальное значение пульсаций концентрации не превышало 14%, что меньше, чем в факеле центробежной форсунки.

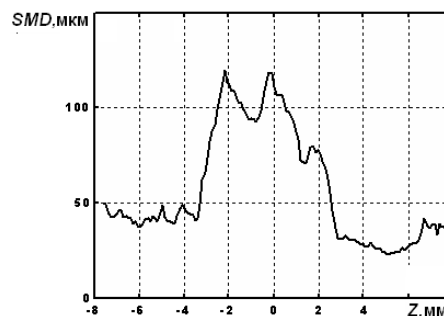


Рис.10. Распределение размеров капель в поперечном направлении

Определение характеристик распыла топливного факела за двухъярусным завихрителем

На рис.11 приведены измеренные распределения концентраций топлива за двухъярусным завихрителем, установленным в открытом пространстве, на различных расстояниях ΔX от места впрыска топлива (фронтальной плиты).

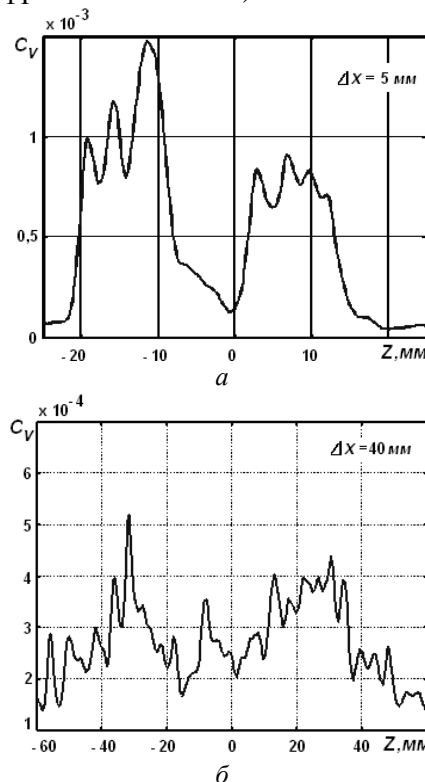


Рис.11. Распределение концентрации топлива по диаметру факела распыливания: $DP_\phi=3,2$ кПа, $G_0=52$ г/с, $G_m=3,2$ г/с

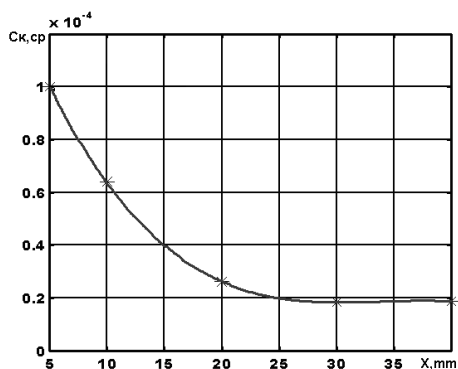


Рис.12. Распределение средней концентрации топлива по длине факела:

$$DP_{\phi}=3,2 \text{ кПа}, G_{\phi}=52 \text{ г/с}, G_m=3,2 \text{ г/с}$$

Изменение средней концентрации топлива по длине факела приведено на рис.12. Как следует из приведённого графика, процесс смешения топлива с воздухом практически заканчивается на расстоянии $\Delta X=25$ мм от места впрыска топлива. При этом неравномерность в распределении концентрации, наблюдаемая на расстоянии 5 мм от форсунки, быстро исчезает в результате интенсивного смешения топлива с воздухом.

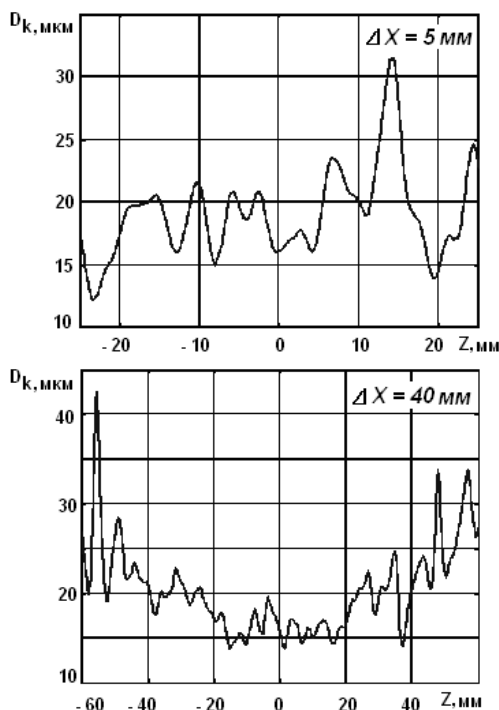


Рис.13. Распределение размеров капель топлива по диаметру факела распыливания:

$$DP_{\phi}=3,2 \text{ кПа}, G_{\phi}=52 \text{ г/с}, G_m=3,2 \text{ г/с}$$

Эксперименты также показали, что средние размеры капель распыленного топлива практически не зависят от расстояния до фронтального устройства (рис. 13), за исключением периферии факела, где наблю-

дается рост размеров капель. По значению перепада на фронтальном устройстве можно оценить скорость движения воздуха за форсункой. В этих оценках значение коэффициента расхода m принималось равным 0,7. Следовательно, $U=\mu[2(p_1-p_2)/\rho]^{1/2}=50,7$ м/с и для капель диаметром 20-30 мкм числа Вебера равны $We=\rho Ud/\sigma=2,5-3,8$. Числа Вебера из этого диапазона соответствуют устойчивым состояниям капель, вследствие чего их дробления набегающим потоком воздуха не происходит.

Из представленных распределений видно, что в начальных сечениях, на расстояниях $X<30$ мм от места распыла безразмерные максимальные значения концентраций последовательно уменьшаются от $c_k=1$ до $c_k=0,2$. Здесь $c_k=C_{k,max}/C_{k,bx}$ – безразмерные значения концентраций.

На этих же расстояниях измеренные среднезауэтеровские диаметры капель в струе оказываются постоянными и составляют приблизительно 20 мкм. В дальнейшем, при $X>30$ мм, концентрации капель остаются практически постоянными, а размеры капель последовательно увеличиваются, особенно в периферийной части струи, где составляют 30–40 мкм.

Распыл топлива за трёхъярусным завихрителем МОГОС

Исследования распыливания и распределения жидкого топлива в закрученном потоке за модулем МОГОС (без префильмера) показали, что при подаче топлива только в центральный канал при перепаде давления воздуха 2,7 кПа за модулем наблюдается равномерное распределение капель топлива в поперечном сечении факела при размерах капель приблизительно 53 мкм. Оказалось, что при этом направления закруток воздушных потоков во внешнем и центральном завихрителях существенно влияют и на размеры капель, и на равномерность их распределения по сечению. Так, при противоположном направлении закруток $D_{32}=73-92$ мкм и $C_v=3,7-6,4$, а при одинаковом - $D_{32}=53-72$ мкм и $C_v=2,7-4,56$. Пример распределения концентраций топлива и размеров капель в факеле распыла при снятом стабилизаторе пламени приведён на рис.14.

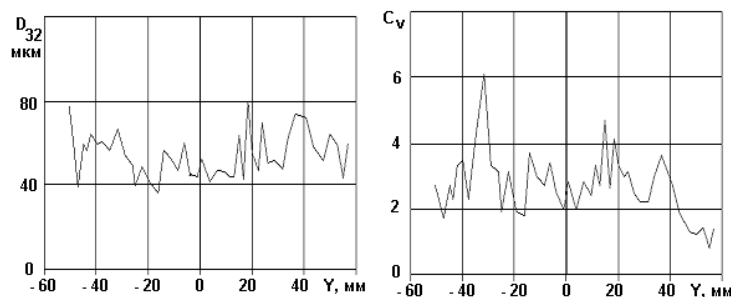


Рис.14. Радиальное распределение размеров капель керосина (D_{32}) и их концентрации (C_v) в топливном факеле за модулем МОГОС

В модуле с кольцевым стабилизатором размер капель оказался на 15-20 мкм меньше по сравнению с модулем без стабилизатора. Например, при работе только центральной форсунки $D_{32}=37-45$ мкм. При расходе топлива 1,8-3,9 г/с значения концентраций капель составили $C_v=2,4-2,6$. В случае совместной работы центральной форсунки и коллектора внешнего завихрителя (12 форсунок) величина медианного размера капель составила $D_{32}=48-62$ мкм при параметре $C_v=3,4-5,8$.

Пневматический распыл в модуле с кольцевым префильмером

Проведённые испытания фронтального устройства с форсуночным модулем МОГОС выявили некоторые недостатки смесеобразования и привели к выводу о необходимости использования префильмера в области струйной подачи топлива [4]. Для проверки распределения топлива на кольцевом префильмере описанное устройство было испытано при подаче в качестве топлива керосина. В опытах расход воздуха при перепаде 2 кПа составлял 100 г/с, варьируемыми параметрами были G_K - расход топлива через коллектор наружного контура, G_Φ - расход топлива через центральную форсунку. Фотография факела распыла приведена на рис.15, а результаты измерений размеров топливных капель - на рис.16.

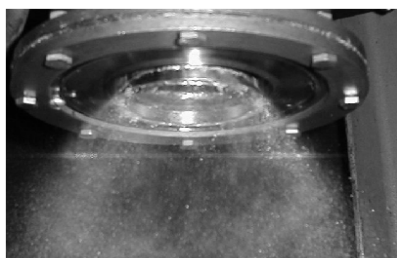
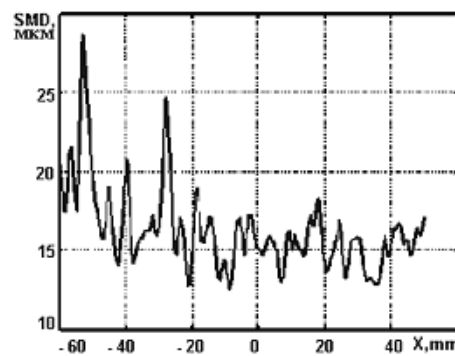
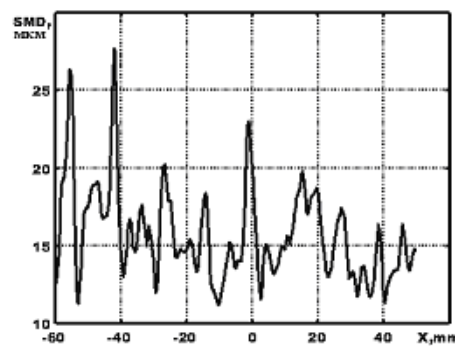


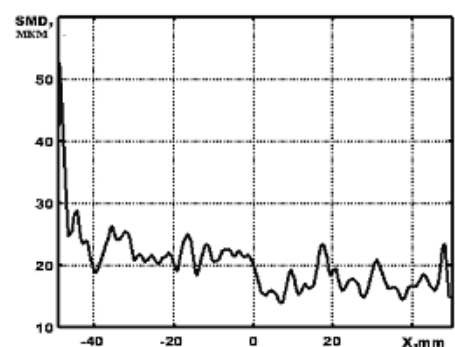
Рис.15. Фотография факела распыла $DP_0=2$ кПа, $G_{T\bar{a}}=G_K+G_\Phi=5$ г/с



а



б



в

Рис.16. Распределение размеров капель по диаметру факела:

а- $DP_0=2$ кПа, $G_{T\bar{a}}=G_K+G_\Phi=5$ г/с;
б- $G_K=4$ г/с., $G_\Phi=0$; в- $G_K=0$, $G_\Phi=2$ г/с

Опыты показали, что факел распыла в среднем однороден по размерам капель и распределениям объёмных концентраций,

однако при этом пульсации концентраций весьма велики и достигают более 50%.

Выводы

В работе проведён анализ результатов экспериментальных исследований характеристик топливоздушных аэрозолей, генерируемых различными модельными фронтными устройствами камер сгорания перспективных схем.

Обнаружено, что подача воздуха в центральный канал форсунки приводит к подавлению зоны обратных токов на оси факела, улучшению распыла и выравниванию концентрация капель в поперечном направлении; при этом улучшается стабилизация обоих потоков: и жидкости, и газа; наблюдается существенное локальное уменьшение размеров капель (до 10 мкм, при $\Delta P_{\text{в}} - \Delta P_{\text{цв}} = 10$ кПа для керосина).

Распыл жидких плёнок с поверхностей пластин показал, что характеристики этого распыла весьма близки к известным характеристикам для пневматических форсунок (углы раскрытия факела и мелкость распыла).

Сравнительное исследование факелов распыла за фронтными устройствами показало, что двухъярусный завихритель обеспечивает мелкость распыла порядка 20 мкм при приемлемой равномерности распределения концентраций топлива на расстоянии одного калибра от места распыла. Трёхъярусный завихритель модуля МОГОС также обеспечивает достаточную равномерность поля концентраций капель, но при мелкости распыла в диапазоне от 40 до 60 мкм. Трёхъярусный завихритель МОГОС с префильмером даёт размеры капель порядка и менее 20 мкм и также обеспечивает достаточную равномерность поля их концентраций.

Для каждого из рассматриваемых устройств получены значения пульсаций концентраций капель, что очень важно для оценки завихрителей в отношении их экологических характеристик.

Анализ результатов исследований позволил сделать следующие рекомендации:

а) при организации топливоподачи для слияния струй в кольцевую топливную пелену и её оптимального дальнейшего

дробления на капли расстояние между выходами струй должно быть порядка 2-4 калибра струи;

б) для пневматических низконапорных форсунок с распыливанием топливной плёнки найдено оптимальное по мелкости капель и минимальному давлению топливоподачи расположение шнека относительно топливной иглы;

в) на начальном участке топливного факела для уменьшения средних размеров капель полезно интенсивное разбавление его воздухом.

Библиографический список

1. Комбинированная измерительная система для определения характеристик факела распыливания применительно к низкоэмиссионным КС [Текст] / А. Ю. Васильев, А. Г. Голубев, А. А. Свириденков [и др.] // Труды X юбилейной международной научно-технической конференции, 23-26 июня 2009 г. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – С.302-305.

2. Васильев, А. Ю. К проектированию пневматических форсунок для малоэмиссионных камер сгорания [Текст] / А. Ю. Васильев // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2009": материалы V Всерос. науч.-техн. конф. 12-13 октября 2009 г. – Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета, 2009. – Т.1- С. 155-161.

3. Образование и распад жидкой плёнки в закрученном потоке за центробежной форсункой [Текст] / А. Ю. Васильев, А. И. Майорова, А. А. Свириденков [и др.] // Теплоэнергетика. – 2010. – №2. – С.54-57.

4. Третьяков, В. В. Эффективность смешения капельно-жидкого топлива с воздухом в завихрительных фронтных устройствах [Текст] / В. В. Третьяков, А. А. Свириденков // Вестн. СГАУ. – Самара: Изд-во СГАУ. – 2009. – №3(19), ч.2. – С.162-170.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 11-01-00352.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FLUID ATOMIZATION BY MODEL FRONTAL DEVICES OF COMBUSTION CHAMBERS

©2011 A. Yu. Vasilyev, A. A. Sviridenkov, V. V. Tretyakov

Central Institute of Aviation Motors (Moscow)

The paper presents the analysis of results of experimental research of characteristics of fuel-air sprays produced by various model frontal devices of combustion chambers of promising design. The influence of air supply to the central duct of the atomizer on the configuration of the reverse current zone and the characteristics of the spray cone is revealed. Comparative study of spray cones behind frontal devices of various types is carried out. Data on spraying liquid films from plate surfaces and the distribution of concentration pulsations in the flow are obtained.

Combustion chamber, atomizer, spray cone, visualization.

Информация об авторах

Васильев Александр Юрьевич, кандидат технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. E-mail: yagodkin@ciam.ru. Область научных интересов: экспериментальные методы исследования гидродинамики, распыливания топлива и смесеобразования.

Свириденков Александр Алексеевич, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. E-mail: sviriden@ciam.ru. Область научных интересов: экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

Третьяков Валентин Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова. E-mail: tretjak@ciam.ru. Область научных интересов: расчетно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

Vasilyev Alexander Yurievich, Cand. Tech. Sci., Federal State Unitary Enterprise Central institute of aviation engine production named after P.I. Baranov (FGUP CIAM), chief of sector. E-mail: yagodkin@ciam.ru. Area of research: experimental methods of research of hydrodynamics, fuel atomization and mixing processes.

Sviridenkov Alexander Alekseevich, Federal state unitary enterprise Central institute of aviation engine production named after Baranov (FGUP CIAM), leading engineer. E-mail: sviriden@ciam.ru. Area of research: experimental, computational and theoretical methods of research in hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.

Tretyakov Valentin Valentinovich, candidate of physical and mathematical science, associate professor, leading researcher, Central Institute of Aviation Motors. E-mail: tretjak@ciam.ru. Area of research: computational and theoretical methods of research of hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.