

Применение альтернативных топлив в авиационных газотурбинных двигателях

Силуянова М.В.*, Челебян О.Г.**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e- mail: dc2mati@yandex.ru*

***e- mail: oganes441@gmail.com*

Аннотация

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния физических свойств жидкости на параметры топливовоздушного факела распыла за фронтальным устройством камеры сгорания газотурбинных двигателей пневматического типа. Для определения характеристик распыла и изучения процесса дробления и смешения альтернативных топлив с повышенной вязкостью разработано модельное биотопливо на основе керосина марки ТС-1. В результате проведенной работы получены ряд зависимостей характеристик среднего диаметра, скорости и концентрации капель топлива в потоке за горелкой для керосина и модельного биотоплива. Обобщив полученные данные, установлено, что при использовании вязких топлив необходимо применять способ пневматического распыла для обеспечения заданных рабочих параметров камеры сгорания газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: фронтное устройство, распыливание, биотопливо, пневматический, факел распыливания, форсунка, завихритель, камера сгорания.

Ужесточение экологических требований ИКАО (Международная Организация Гражданской Авиации) по вредным выбросам от авиационных двигателей [1], заставляют ведущие державы вести поиск альтернативных источников энергии, в частности расширять сферу применения биотоплив. Альтернативные виды топлива обладают физическими свойствами, несколько отличными от привычного авиационного керосина [2]. Использование возобновляемых биотоплив, полученных из растений или жирных кислот является весьма перспективным. В настоящее время, на авиацию приходится около 2% антропогенных выбросов CO₂. При использовании биотоплива, уровень выбросов дыма, твердого углерода, окиси углерода, серы и двуокиси углерода в целом уменьшается. Таким образом, применение в авиации биокеросина, полученного из переработанных масел семян ятрофа, взамен традиционного керосина позволит сократить «углеродный след» почти на 80%.

Иностранные компании в последние годы проводят исследования возможности применения альтернативных видов топлива без изменения конструкции ГТД [3]. Первый полет самолета на биотопливе состоялся в 2008 г. британской авиакомпаний Virgin Atlantic Airways Ltd, который является собственником этого воздушного судна. Компания Боинг и ее

международные партнеры уже работают над переводом биотоплива из стадии тестирования в стадию производства. Боинг 747-8 Freighter и 787 совершили первые демонстрационные трансатлантические перелеты через Тихий океан на биотопливе в 2011 г. и 2012 г. В мае 2014 года, Нидерландская авиакомпания KLM начала выполнять еженедельные международные рейсы на воздушном судне Airbus A330-200 между аэропортами Queen Beatrix, в Ораньестеде, и аэропорта Schiphol в Амстердаме, используя переработанное растительное масло, как авиационное топливо. В России пока не имеется в промышленных масштабах производство биотоплива [4]. Тем не менее, это направление имеет большое будущее из-за наличия больших посевных площадей и водных поверхностей в нашей стране.

1. Постановка задачи.

В данной работе исследовались влияние параметров горючих жидкостей на характеристики распыливания за фронтовым устройством камеры сгорания ГТД пневматического типа. Цель эксперимента заключалась в определении дисперсных характеристик аэрозоля, полей скорости и распределения частиц в потоке при пневматическом способе распыливания стандартных (керосин ТС-1), и вязких (биотопливо) топлив.

Большая часть топлив, используемых в авиационных двигателях, в нормальных условиях являются жидкими и поэтому должны быть распылены перед подачей в зону горения [5]. В современных силовых установках [6, 7]

используются разнообразные форсуночные устройства, отличающиеся не только конструкцией, но и принципами, на которых основана система распыла топлива. Тип распыливания наиболее просто разделить по основной энергии, затрачиваемой на распыл жидкости, т.е. использовать для классификации так называемый энергетический подход [8]. Воспламенение топлива, устойчивость и эффективность горения, уровни эмиссии вредных веществ тесно связаны с процессами дробления жидкого топлива и его смешения с воздухом в системе распыливания [9, 10].

В качестве альтернативного вида горючего была выбрана смесь авиационного керосина ТС-1 (40%), этанола (40%) и касторового масла (20%). Выбранные пропорции модельного биотоплива обеспечивают однородный и хорошо перемешанный состав без расслоения и осадков [11]. Для полученной смеси были определены физические свойства, которые в большинстве случаев влияют на процесс распыла и дробления капель. Кинематическая вязкость жидкости ν_F измерялась вискозиметром ВПЖ-1 с диаметром капилляра 1,52 мм. Коэффициент поверхностного натяжения σ_F рассчитывался по измеренным значениям плотности и температуры.

В таблице 1 приведены физические свойства при температуре 20° С, авиационного керосина марки ТС-1 и различных биотоплив, в том числе использованного в настоящей работе.

Таблица 1.

Вид рассматриваемой жидкости	Плотность, кг/м ³	Кинематическая вязкость•10 ⁶ , м ² /с	Коэффициент поверхностного натяжения•10 ³ , Н/м
Керосин ТС-1	≥780	≥ 1,3	24,3
Модельное биотопливо	860	6,9	28
Спирт этиловый	788	1,550	22,3
Касторовое масло	965	94	36,4
Масло рапсовое	916	88,62	33,2

Из таблицы видно, что основное отличие в свойствах такого показателя как вязкость, величина которой для модельного биотоплива более чем в 5 раз превышает вязкость керосина, а остальные параметры различаются всего лишь на 10 – 15%. При пневматическом распыливании жидкостей определяющими факторами являются внешние аэродинамические силы и внутренние механизмы воздействия на начальную форму струи. Величина кинематической вязкости определяет толщину формируемой пленки на выходе из топливного сопла, а поверхностное натяжение – размер частиц в потоке при дроблении скоростным напором воздуха.

Для проведения испытаний был использован фронтальной модуль камеры сгорания с пневматическим распыливанием топлива. Данное фронтальное устройство состоит из центрального тангенциального завихрителя, в котором движется закрученный поток воздуха по осевому топливоздушному каналу, смешиваясь с топливными струями, периферийного лопаточного завихрителя и внешнего тангенциального завихрителя. Топливный подвод спроектирован таким образом, чтобы

распределять топливо в соотношении 1/3 между периферийным и центральным каналом. Внешний тангенциальный завихритель обеспечивает дополнительное перемешивание частично подготовленной в осевом и периферийном канале топливовоздушной смеси.

Применение центрального тангенциального завихрителя позволяет увеличить степень закрутки потока и организовать на оси устройства стабильную зону обратных токов. Средний лопаточный завихритель с большим углом закрутки потока обеспечивает распыл основного топлива до мелкодисперсного аэрозоля. Внешний тангенциальный завихритель исключает возможность выброса крупных капель на срез воздушного сопла и за внешнюю границу топливовоздушного факела. Распределенный впрыск топлива по центральному и среднему воздушным каналам позволяет получить аэрозоль с более равномерным распределением концентрации топлива по сечению топливовоздушного факела за срезом сопла.

Разработанное фронтное устройство имеет сборно-разборную конструкцию, что позволяет применять различные типы воздушных сопел и тангенциальных завихрителей в зависимости от предъявляемых требований, в том числе и для распыливания вязких нефтяных и биотоплив.

2. Методика эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились на стенде лазерной диагностики характеристик топливовоздушных факелов, представленном на рисунке 1. Стенд лазерной диагностики позволяет получать характеристики

(поля мелкости распыла, поля концентраций и их пульсаций, углы факела и др.) топливовоздушных факелов, создаваемых форсунками и фронтowymi устройствами. Дополнительно на стенде возможна визуализация потока в прозрачных моделях с кварцевыми стеклами. На стенде применена замкнутая система использования топлива, при которой распыленное топливо оседает на каплеуловителе, собирается в отстойнике топлива, фильтруется и поступает обратно в баллон.

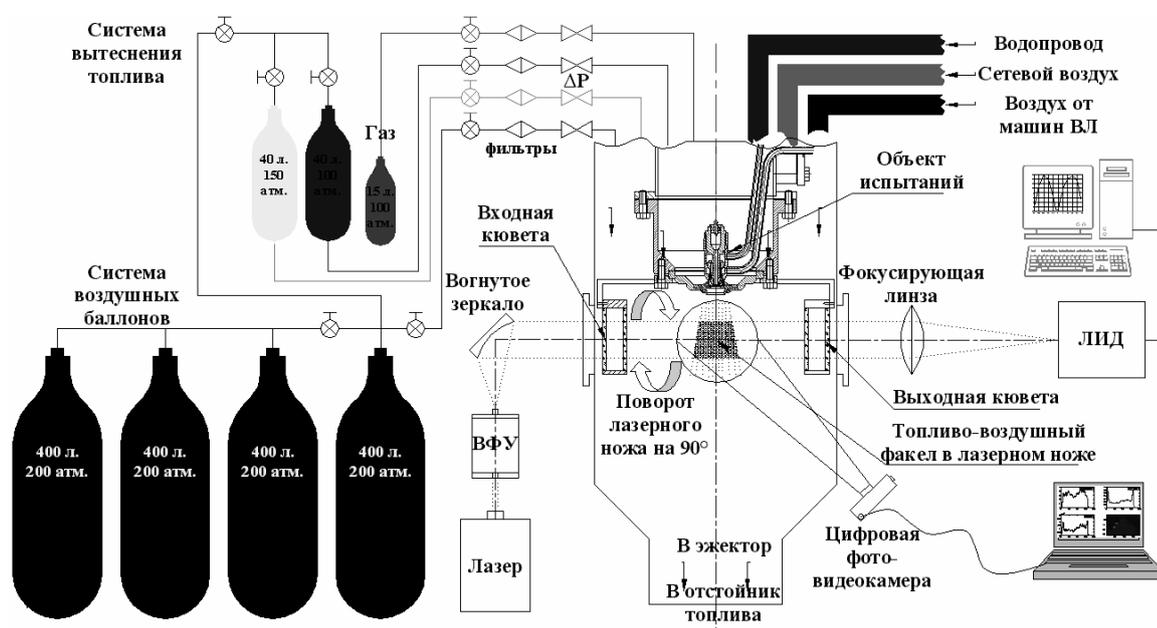


Рис. 1. Схема стенда лазерной диагностики.

Стенд снабжен аппаратурой для измерений расходов, давлений и температур топлива и воздуха. Расход G_T и плотность топлива измеряется расходомером KROHNE, расход воздуха G_B - расходомером PROMASS. Измерение давления производится датчиками ADZ. Цифровая фотосъемка осуществляется трехматричной цветной видеокамерой Canon XL-H1. Оптическая часть стенда оснащена аппаратурой для лазерных измерений

качества распыливания и скорости капель по рассеянию света каплями. В настоящей работе физические исследования проводились методом фазодоплеровской анемометрии (PDPA).

3. Результаты экспериментального исследования.

Испытания были начаты с определения расходной характеристики фронтального устройства по топливному каналу для керосина и биотоплива, а также по каналам подачи воздуха в модуль. На рисунках 2 и 3 приведены графики расходной характеристики, где ΔP_T и ΔP_B означают перепад давлений соответственно топлива и воздуха.

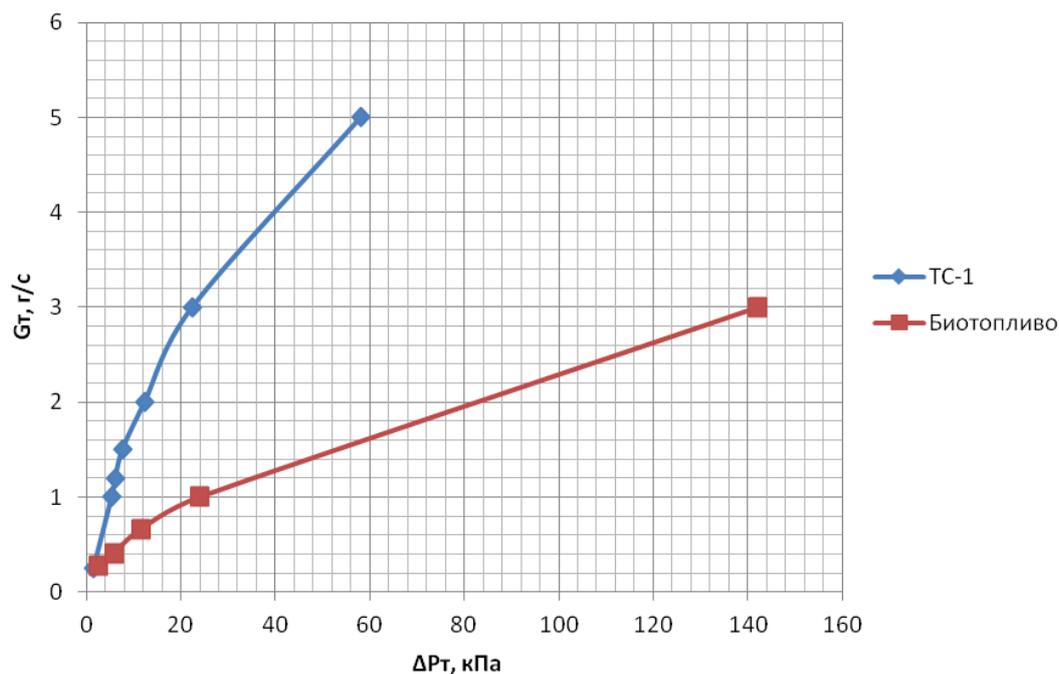


Рис. 2. График расходной характеристики по топливному каналу.

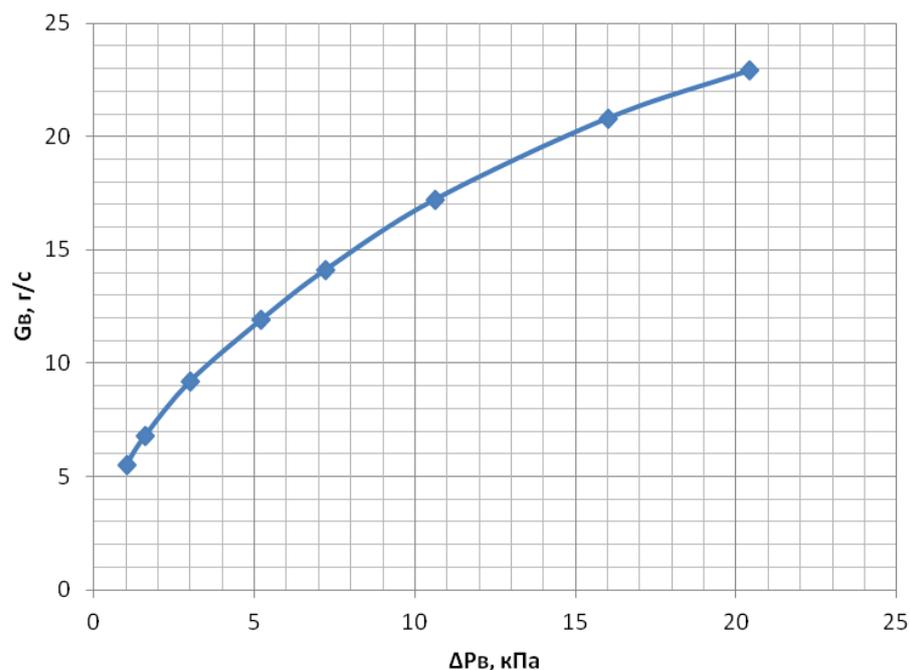


Рис. 3. График расходной характеристики по воздуху через модуль.

Для определения характеристик распыливания были исследованы три основных режима моделирующие работу камеры сгорания на режимах запуска, малого газа и крейсерского. Испытания проводились в условиях открытого пространства с барометрическим давлением $P=748$ мм рт. ст. и при температуре окружающей среды 20°C . Измерение параметров распыливания выполнялось в поперечном сечении топливоздушного факела на расстоянии 30 мм от среза воздушного сопла до плоскости лазерно-оптического ножа с интервалом в 5 мм. Опыты проведены при следующих режимных параметрах работы фронтального модуля:

При подаче керосина ТС-1:

1. $\Delta P_v=3,0$ кПа; $G_v=8,9$ г/с; $G_T=1,0$ г/с; $\Delta P_T=5,6$ кПа;
2. $\Delta P_v=3,0$ кПа; $G_v=8,9$ г/с; $G_T=3,0$ г/с; $\Delta P_T=23,6$ кПа;
3. $\Delta P_v=20,0$ кПа; $G_v=22,5$ г/с; $G_T=0,25$ г/с; $\Delta P_T=9,7$ кПа;

При подаче модельного биотоплива:

1. $P_B=3,0$ кПа; $G_B=8,9$ г/с; $G_T=1,0$ г/с; $\Delta P_T=7,9$ кПа;
2. $\Delta P_B=3,0$ кПа; $G_B=8,9$ г/с; $G_T=3,0$ г/с; $\Delta P_T=7,9$ кПа;
3. $\Delta P_B=20,0$ кПа; $G_B=22,3$ г/с; $G_T=0,25$ г/с; $\Delta P_T=9,7$ кПа;

Иллюстрированные фотографии факелов распыливания по режимам работы фронтального устройства для каждого типа топлива представлены на рисунках 4 и 5.



$\Delta P_B=3,0$ кПа; $G_T=1$ г/с



$\Delta P_B=3,0$ кПа; $G_T=3$ г/с



$\Delta P_B=20,0$ кПа; $G_T=0,25$ г/с

Рис. 4. Фотографии факелов распыла по режимам для керосина ТС-1.



$\Delta P_B=3,0$ кПа; $G_T=1$ г/с



$\Delta P_B=3,0$ кПа; $G_T=3$ г/с



$$\Delta P_{\text{в}}=20,0 \text{ кПа}; G_{\text{т}}=0,25 \text{ г/с}$$

Рис. 5. Фотографии факелов распыла по режимам для биотоплива.

Из представленных фотографий можно сказать, что визуально качество распыливания керосина значительно лучше, чем биотоплива. Границы факела четкие, без наличия крупных капель на периферии и стабильным углом раскрытия порядка 85-90°. Распределение капель в потоке достаточно равномерное, без возникновения обогащенных зон. При подаче более вязкого по свойствам биотоплива, общий вид полученного аэрозоля, представленного на фотографиях, уступает по наличию крупных частиц на границах факела распыла. По периферийной границе факела летит больше крупных капель, чем для керосина. Причиной тому служит процесс дробления в камере смешения завихрителя, который не справляется с большим объемом жидкости с повышенными физическими свойствами. Нераздробившиеся частицы, находящиеся в закрученном потоке воздуха, сепарируются на кромку воздушного сопла, где набирается определенная концентрация, и срываются на границу факела распыливания. Однако такие капли дробятся

уже на расстоянии одного калибра от сопла завихрителя. Связано это с тем, что струя жидкости на выходе из топливного сопла образует пленку, которая движется по цилиндрической части и начинает дробиться закрученным скоростным напором воздуха, а капли, не успевшие раздробиться, сепарируются и оседают на больших радиусах поверхностей распыла. Характерным свойством для наличия таких капель является повышенная толщина формируемой топливной пленки, которая для вязкого биотоплива превышает более чем в 5 по сравнению со стандартным керосином. Отсюда и возникновение крупных частиц на границах факела, которые отчетливо наблюдаются при увеличении расхода топлива через устройство. А при увеличении перепада давления на фронтальной части крупные капли успевают додрабливаться в большем объеме воздуха.

4. Анализ полученных результатов.

Рассмотрим измеренные кривые распределения характеристик потока за фронтальным модулем для каждого типа топлива. Все характеристики распыла были получены при одинаковых условиях работы фронтального модуля. Основное внимание уделялось влиянию вязкости жидкости и коэффициента поверхностного натяжения на процесс распыливания, дробления и смешения с воздухом. Также, при выбранном методе полного пневматического распыливания, жидкости характерным условием для эффективности смесеобразования является параметр отношения расходов воздуха к топливу λ_{AFR} , который обычно должен составлять не менее 5.

При использовании более вязких топлив, чем больше величина этого параметра, тем процесс распыливания становится более эффективным, а процесс смешения топлива с воздухом гомогенизируется. Такой способ пневматического распыла активно изучают и применяют в мировой практике ведущих авиадвигателестроительных корпораций при разработке новых фронтов для малоэмиссионных камер сгорания.

На рисунках 6 и 7 представлены график распределения характеристик факела распыла при подаче авиационного керосина ТС-1 (осреднение по ансамблю в фиксированной точке пространства).

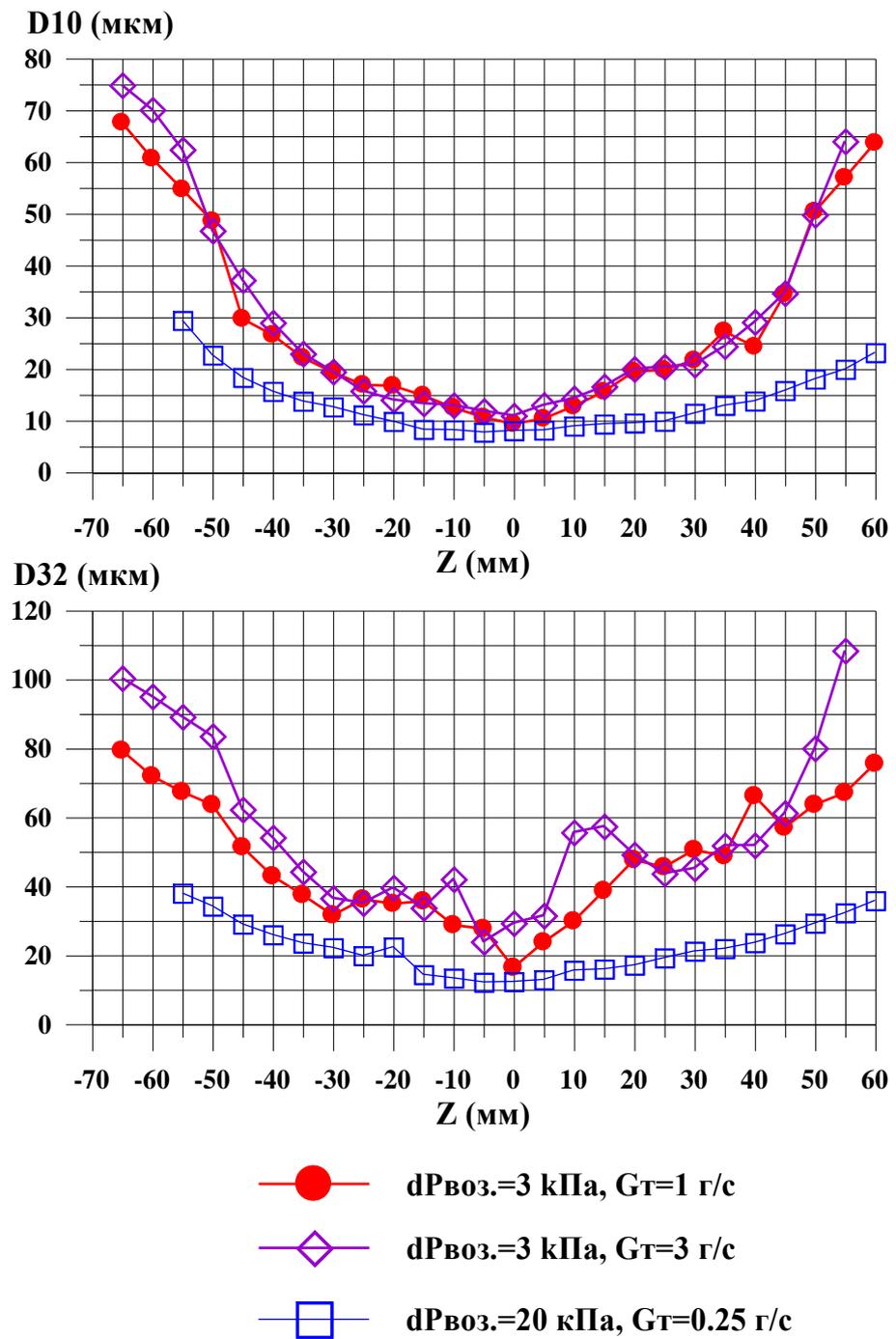


Рис. 6. Графики распределения среднего (D_{10}) и среднезаутерского (D_{32}) диаметра капель в поперечном сечении по диаметру факела распыла для керосина ТС-1.

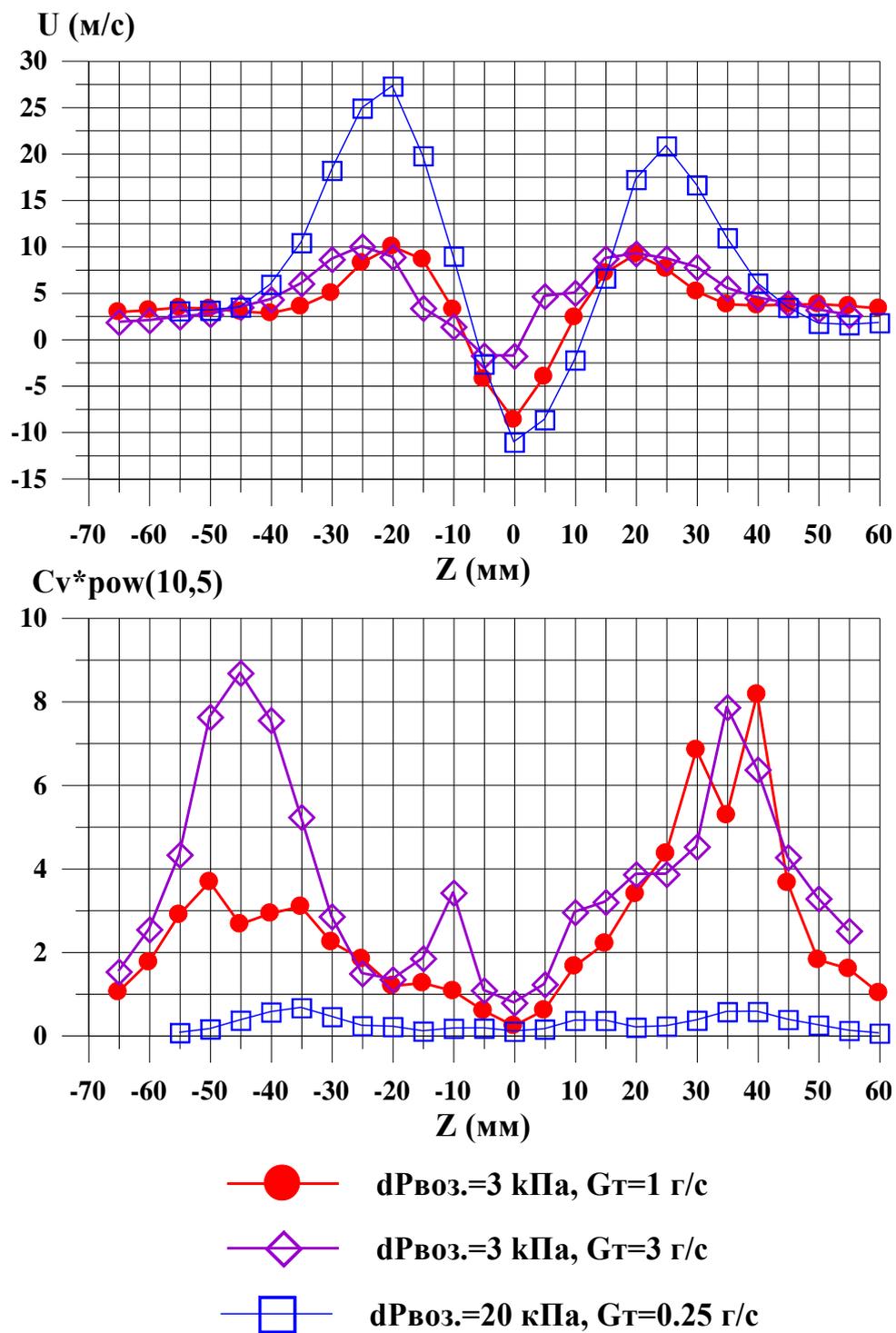


Рис. 7. Графики распределения осевой скорости (U) и полей объемной концентрации потоков частиц в поперечном сечении по диаметру факела распыла для керосина ТС-1.

Полученные распределения дисперсности аэрозоля показывают, что основное отличие при изменении отношений расходов проявляется на крайних точках факела. В целом факел распыла имеет однородную и хорошо перемешанную структуру. Капли распределены в потоке равномерно по размерам, а средние по плоскости измерения значения Заутерского диаметров D_{32} для режимов составляют: 1 – 44,9 мкм, 2 – 48,7 мкм, 3 – 22,9 мкм. На оси устройства формируется стабильная зона обратных токов в пределах от 2,5 – 8,0 м/с на перепаде давления в 3 кПа а максимальное значение отрицательной скорости достигает 12 м/с на режиме при $\Delta P_{в}=20$ кПа, а ширина при этом составляет 20 мм. Уровень параметров такого аэрозоля позволит сжигать топливо в камере сгорания ГТД с высокой полнотой сгорания и обеспечить низкий уровень эмиссии вредных выбросов.

Теперь рассмотрим характеристики аэрозоля при подаче более вязкой жидкости в аналогичных условиях проводимого эксперимента. Графики распределения по дисперсности, скорости и концентрации частиц в потоке за горелкой представлены на рисунках 8 и 9.

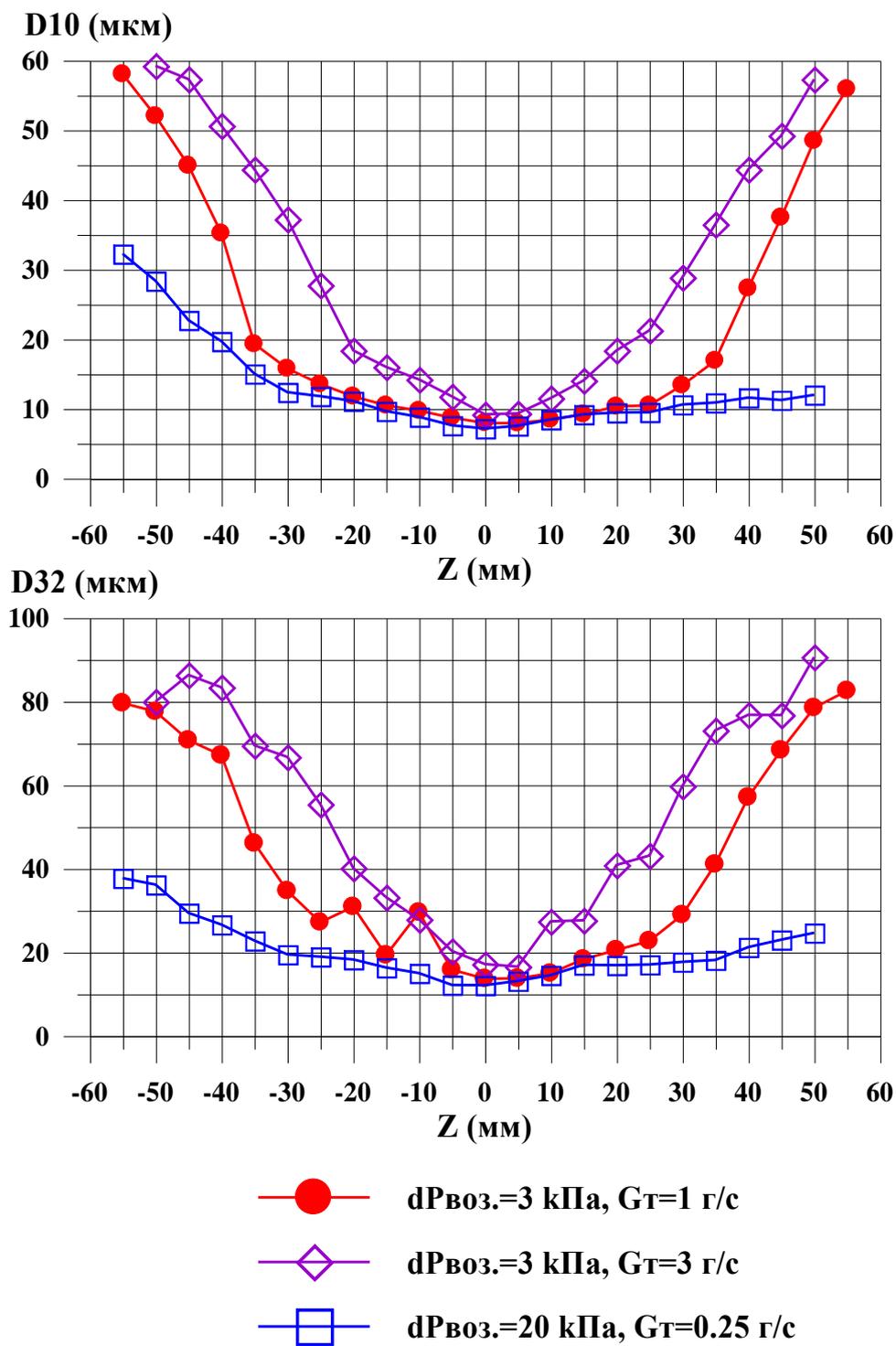


Рис. 8. Графики распределения среднего (D_{10}) и среднезаутерского (D_{32}) диаметра капель в поперечном сечении по диаметру факела распыла для модельного биотоплива.

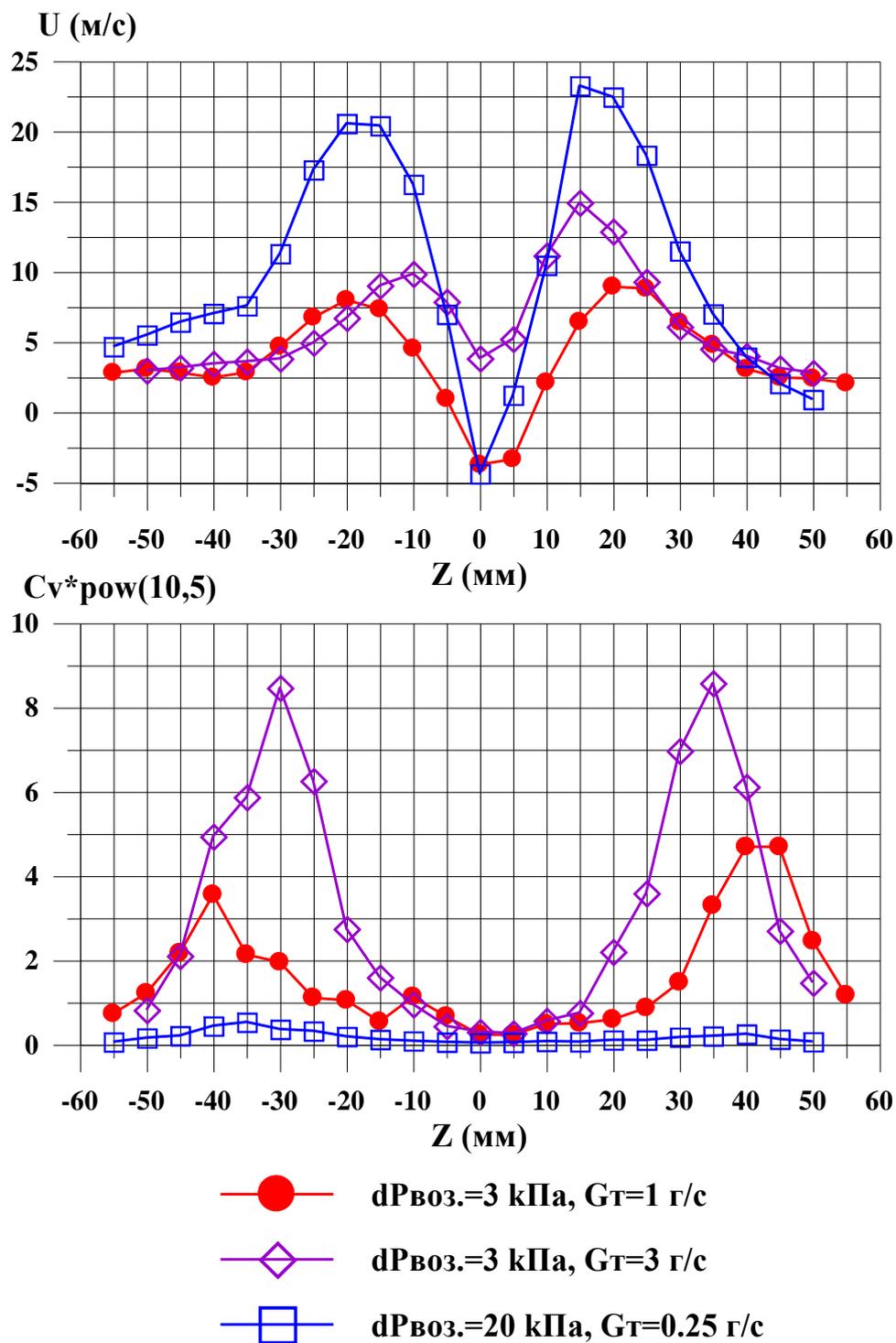


Рис. 9. Графики распределения осевой скорости (U) и поле объемной концентрации потоков частиц в поперечном сечении по диаметру факела распыла для модельного биотоплива.

Проведя сравнительный анализ представленных графиков характеристик потока за фронтовым модулем, видим, что при использовании альтернативного топлива для выбранного устройства с пневматическим способом распыла структура аэрозоля практически не изменилась. По дисперсности полученный аэрозоль не уступает керосину, а местами даже и лучше. Различия наблюдаются по плотности распределения капель на периферии факела, где сконцентрирована основная масса крупных частиц. В центральной же зоне засеяно больше мелких по размерам частиц, чем для ТС-1. Измеренный средний D_{32} размер капель по сечению факела для биотоплива по режимам составляет: 1 – 32 мкм, 2 – 50 мкм, 3 – 20 мкм. Полученный средний по плоскости измерения уровень дисперсной характеристики аэрозоля D_{32} для модельного биотоплива на 30% превосходит D_{32} для ТС-1 на пусковом режиме работы фронтового модуля. На остальных двух режимах с большими значениями AAFR дисперсность аэрозоля практически не меняется.

Так как свойства испытуемой жидкости в основном отличаются по вязкости, то поле распределения скорости частиц в потоке изменилось в зоне обратных токов. Максимальная отрицательная скорость сохранилась только на двух режимах, и снизилась до 5 м/с, а ширина отрывной зоны составляет от 6 мм до 9 мм. При больших расходах подачи топлива (режим 2) отрицательная скорость исчезает и переходит в положительную и составляет 4 м/с. Это объясняется торможением потока воздуха, находящимися в нем крупными каплями, которые по массе больше чем капли керосина. В зоне

обратных токов сконцентрированы, в основном, самые мелкие частицы, которые находятся в постоянном движении внутри циклона. Затрачиваемой на дробление капель жидкости энергии закрученного воздуха на дробление капель жидкости, начинает не хватать для выработки отрицательной скорости частиц в зоне обратных токов – отсюда и уменьшение этой компоненты для биотоплива. При этом максимальные значения скорости не изменились, и лежат в диапазоне от 10 м/с до 23 м/с. Капли распределены в потоке равномерно по размерам и по диаметру факела распыливания.

5. Заключение.

В результате проведенных экспериментальных исследований по влиянию параметров жидкостей на процесс распыливания и смешения топлива с воздухом во фронтальном устройстве пневматического типа можно сделать следующие выводы.

1. При пневматическом способе распыливания жидкостей с различными свойствами, вязкость слабо влияет на дисперсность капель в потоке. Основным параметром, который оказывает влияние на процесс дробления и размер капель является коэффициент поверхностного натяжения.

2. При распыливании альтернативных топлив высокой вязкости отражается в основном, на поле осевой скорости в зоне обратных токов, но при этом общий характер течения не нарушается. Пиковые значения

скорости не измены, но стабилизационная зона сужается вдвое, а максимальная составляющая компонента отрицательной скорости частиц в потоке сохраняется лишь при небольших расходах жидкости.

3. Пневматический распыл жидкости обеспечивает требуемый уровень характеристик топливовоздушного потока, и может быть использован для применения как нефтяных, так и альтернативных топлив при подготовке гомогенной смеси и эффективного сжигания в камере сгорания современных и перспективных газотурбинных двигателей.

Проведенные опыты позволили изучить влияние физических свойств жидких топлив на характеристики аэрозоля при пневматическом способе распыливания жидкости.

Библиографический список

1. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эмиссия авиационных двигателей, URL:
http://dspk.cs.gkovd.ru/library/data/prilozhenie_16_tom_2_emissiya_aviadvigateley.pdf
2. Васильев А.Ю., Челебян О.Г., Медведев Р.С. Особенности применения биотопливной смеси в камерах сгорания современных газотурбинных двигателях // Вестник СГАУ. 2013. № 3(41). С. 57-62.
3. Liu, K., Wood, J. P., Buchanan, E. R., Martin, P., and Sanderson, V., "Biodiesel as An Alternative Fuel in Siemens DLE Combustors: Atmospheric and

HighPressure Rig Testing,” *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 1, 011501, 2010.

4. Дамская И.А., Разносчиков В.В. Методика определения новых составов альтернативных топлив // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 72-80.

5. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, 3rd ed., CRC Press, 2010.

6. Силуянова М.В., Попова Т.В. Исследование теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла // Труды МАИ, 2015, выпуск № 80, URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56934>

7. Силуянова М.В., Попова Т.В. Разработка методики проектирования и расчета теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла // Труды МАИ, 2016, выпуск № 85, URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=66210>

8. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. - М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.

9. Законы горения / Под общ. ред. Ю.В. Полежаева. - М.: Энергомаш, 2006. – 352 с.

10. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.; Мир, 1986. - 566 с.

11. Anna Maiorova, Aleksandr Vasil'ev and Oganesh Chelebyan, "Biofuels - Status and Perspective", book edited by Krzysztof Biernat, ISBN 978-953-51-2177-0, Published: September 30, 2015, ch.16, pp. 329-347.