

УДК 621.438

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОАГУЛЯЦИИ КАПЕЛЬ В ЗАКРУЧЕННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАМЕРАМ СГОРАНИЯ ГТД

© 2013 А. А. Свириденков, В. В. Третьяков

ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», Москва, Россия

Разработана модель коагуляции капель топлива применительно к камерам сгорания ГТД. По разработанной модели выполнены расчёты коагуляции капель при различных значениях углов раскрытия топливного факела и начальных размеров капель. Найдены значения концентраций капель и размеров в зависимости от геометрических и режимных характеристик распыливающего устройства. Показано, что уменьшение угла распыливания топлива при одних и тех же начальной концентрации капель и их размеров приводит к смещению максимума распределения концентрации топлива в сторону больших размеров и увеличению концентрации капель.

Камера сгорания, коагуляция, распыливание, топливный факел.

Введение

Процессы коагуляции капель играют наиболее заметную роль в процессах формировании топливного факела непосредственно вблизи места впрыска топлива. Эти процессы включают в себя процессы дробления топливных струй и пленок на капли, движения капель в нестационарных воздушных потоках, их дробления, столкновения, слияния и последующего дробления. Таким образом, коагуляция капель – это лишь некоторая часть описанной совокупности взаимосвязанных процессов. Выделить каждый процесс из их совокупности и экспериментально исследовать вблизи места впрыска топлива не представляется возможным. Поэтому единственным способом получения необходимой информации о входных характеристиках топливных факелов является моделирование вышеперечисленных процессов. Альтернативой такого подхода является использование экспериментально полученных вдали от места подачи топлива характеристик распыла и задание этих характеристик на выходе их распыливающего устройства. Этот подход наиболее часто используется при решении практических задач (см., например, [1]). Его главный недостаток состоит в том, что в тех областях, где удаётся получить экспериментальные данные о характери-

стиках распыливания, топливный факел является достаточно разреженным и в нём уже закончены процессы коагуляции. Таким образом, во-первых, из рассмотрения исключается ряд параметров, влияющих на формирование факела, и, во-вторых, для каждого устройства требуется проведение специальных опытов.

В работе [2] исследовано влияние трёх параметров на коагуляцию капель в факелах распыливания: начального размера капель, давления окружающей среды и степени турбулентности воздушного потока. Причём последнее влияние является наиболее существенным и определяется величиной диссипации энергии турбулентности. В данной работе ставится задача разработки модели и проведение расчётов коагуляции капель применительно к камере сгорания ГТД. Эти расчёты проведены в нестационарном поле течения за осерадиальным завихрителем камеры сгорания [3], а характеристики распыливания (размеры капель, длина нераспавшейся части топливной пленки и др.) рассчитаны по методике [4].

Описание модели

Принятая в данной работе модель расчёта основана на уравнениях движения совокупности капель. Основные предположения, относящиеся к процессу коагу-

ляции частиц, состоят в следующем. Число частиц достаточно велико, так что можно ввести функцию распределения частиц по массам в каждой точке пространства. Рассматриваются только парные столкновения частиц, частицы коагулируют всякий раз, как сталкиваются, и при этом сохраняются их суммарные масса и объём. Каждая образующаяся при коагуляции частица формируется из целого числа т.н. «базовых» частиц (мономеров), которые полагаются наименьшими, простыми, устойчивыми частицами факела, а плотность числа частиц n_k , состоящих из k мономеров, как функция времени является решением следующего уравнения баланса [5]:

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k K_{i,j} n_i n_{k-i} - n_k \sum_{i=1}^{\infty} K_{k,i} n_i. \quad (1)$$

Неотрицательная функция K_{ij} называется ядром коагуляции, она описывает конкретное взаимодействие между частицами с объёмами V_i и V_j . Первый член в правой части уравнения описывает прирост частиц k мономеров за счёт их коагуляции из i и j мономеров: $i + j = k$, второй – уход частиц из размера k за счёт коагуляции со всеми остальными частицами.

Предполагается, что броуновской диффузией частиц можно пренебречь и считать, что основным механизмом, вызывающим увеличение размеров капель, является турбулентная коагуляция. В этом случае согласно [6] ядро коагуляции можно записать в следующем виде:

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{8\rho}{3}} (r_i + r_j)^2 \sqrt{W_s^2 + W_a^2}. \quad (2)$$

Здесь r_i и r_j – радиусы частиц i и j ; W_s и W_a – относительные скорости между частицами, вызванные напряжением трения и турбулентным ускорением соответственно. Конкретные выражения для величин W_s и W_a приведены в работе [6].

Результаты расчётов

Для решения системы уравнений (1) – (2) используется одномоментный секционный метод, в котором весь диапазон размеров капель делится на секции и для полного описания частиц в данном классе используется один параметр – число частиц данного размера (численная концентрация частиц в данной секции) [7]. Ниже приводятся результаты этих расчётов при давлении в камере сгорания 12 бар и температуре 800 К.

На рис.1 приведено распределение численной начальной концентрации (а) и распределение концентрации на расстоянии 1 см от места подачи топлива (б). Расчёты проведены при значении скорости турбулентных пульсаций 1,7 м/с и скорости диссипации энергии турбулентности $20 \text{ м}^2/\text{с}^3$. Угол раскрытия факела распыливания задавался равным $2\phi = 90^\circ$. Начальные среднегеометрические размеры капель приняты равными 10 мкм.

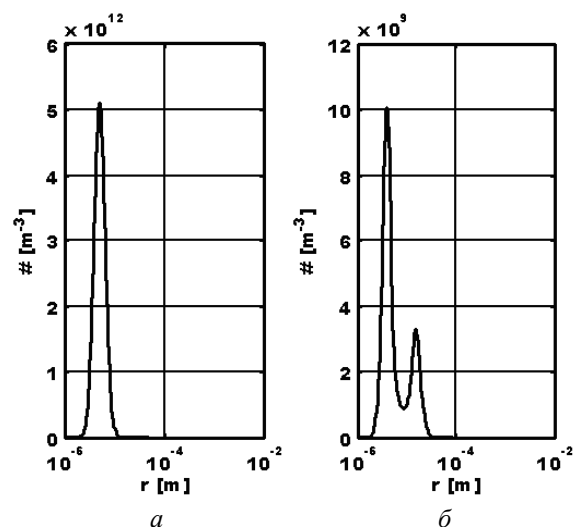


Рис.1. Распределение по размерам численной концентрации капель

Влияние угла распыливания факела на процесс коагуляции приведено на рис.2 для двух различных значений угла раскрытия факела распыливания: рис.2, а – $2\phi=60^\circ$, рис. 2, б – $2\phi=30^\circ$. Распределения концентрации приведены на расстоянии 1 см от места подачи топлива. Скорость диссипации энергии турбулентности со-

ставляла также $20 \text{ м}^2/\text{с}^3$, а начальные среднегеометрические размеры капель – 10 мкм. Распределение капель по размерам принималось нормальным.

Из рис. 2 видно, что уменьшение угла распыливания топлива при одной и той же начальной концентрации капель и их размеров приводит к двойному эффекту. С одной стороны, коагуляция капель приводит к смещению максимума распределения концентрации топлива в сторону больших размеров, с другой стороны, уменьшение угла раскрытия факела увеличивает значение численной концентрации топлива как в области больших капель, так и в области мелких капель.

На рис.3 представлены распределения объёмной концентрации капель для углов раскрытия факела $2\varphi = 90, 60$ и 30° .

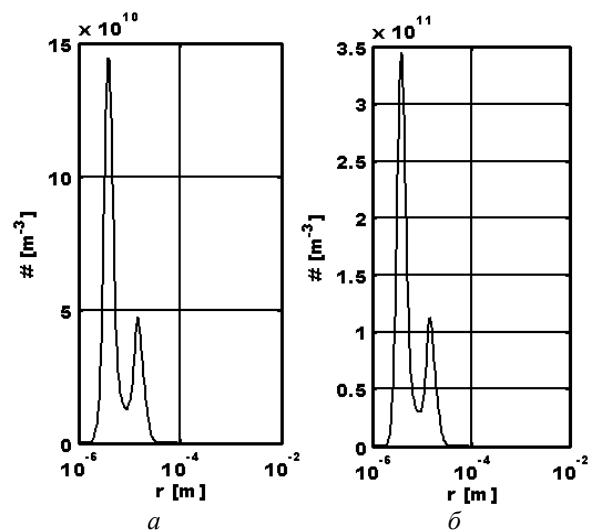


Рис.2. Распределение по размерам численной концентрации капель для различных углов раскрытия факела распыливания: а - $2\varphi=60^\circ$, б - $2\varphi=30^\circ$

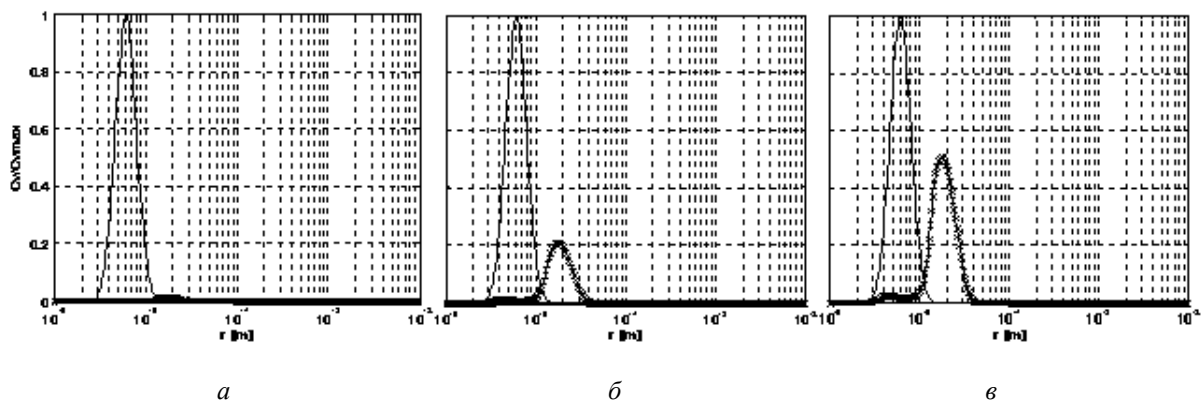


Рис.3. Распределение относительной объёмной концентрации: а - $2\varphi=90^\circ$, б - $2\varphi=60^\circ$, в - $2\varphi=30^\circ$

На рис.3 кривые слева соответствуют начальным распределениям капель, справа – после коагуляции. Таким образом, из сравнения рис.2 и 3 видно, что в то время, как численная концентрация в области мелких капель превосходит соответствующие значения для крупных капель, объём, занимаемый мелкими частицами по сравнению с крупными, существенно меньше.

На рис.4 в качестве сравнения приведены распределения относительной

объёмной концентрации капель при угле раскрытия факела $2\varphi=60^\circ$ для начальных размеров капель 30 (рис.4, а) и 50 мкм (рис.4, б).

Видно, что увеличение начального размера капель приводит к возрастанию максимального значения относительной объёмной концентрации капель и смещению этого максимума в область крупных капель.

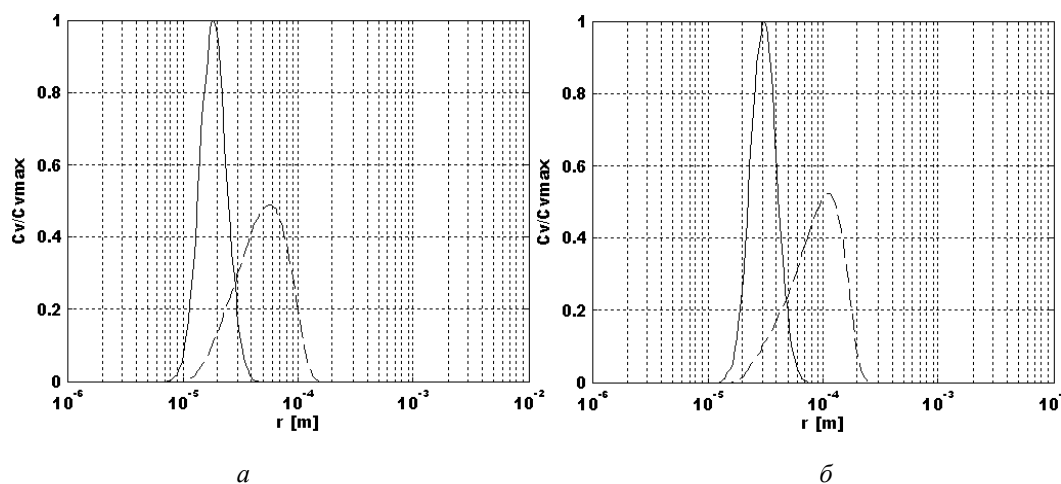


Рис.4. Распределение относительной объёмной концентрации капель при угле факела $2\varphi=60^\circ$
 а - $D=30$ мкм; б - $D=50$ мкм

Выводы

Разработана модель коагуляции капель топлива применительно к камерам сгорания ГТД. По разработанной модели выполнены расчеты коагуляции капель при различных значениях угла раскрытия топливного факела и начальных размеров капель.

Показано, что при углах раскрытия факела $2\varphi = 60$ и 30° максимальные значения численной концентрации капель в 15 и 35 раз больше соответствующего значения для $2\varphi = 90^\circ$ при среднегеометрических начальных размерах капель $D=10$ мкм.

Уменьшение угла распыливания топлива при одних и тех же начальной концентрации капель и их размеров приводит к смещению максимума распределения концентрации топлива в сторону больших размеров и увеличению значений численной концентрации капель.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований. Проект № 11-01-00352.

Библиографический список

1. Третьяков, В.В. Расчет распределений топлива во фронтовом устройстве камеры сгорания с трехъярусным завихрителем [Текст] / В.В. Третьяков // Изв. вуз. Авиационная техника, №4. – Казань, 2007. – С.34–38.

2. Свириденков, А.А. Влияние коагуляции капель на характеристики факела распыливания за форсунками [Текст] / А.А. Свириденков, В.В. Третьяков // Вестн. СГАУ. – № 3 (19). – Ч.2. – Самара, 2009. – С. 157-161.

3. Третьяков, В.В. Влияние нестационарности на процессы смесеобразования и теплообмена в камерах сгорания [Текст] / В.В. Третьяков, А.А. Свириденков // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011»: материалы VI Международ. науч.-техн. конф. – Казань, 12-14 октября 2011. – Т.1. – С.234-241.

4. Свириденков, А.А. Модель движения и распада пленки топлива за форсункой в воздушном потоке [Текст] / Свириденков А.А., Третьяков В.В. // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011»: материалы VI Международ. науч.-техн. конф. – Казань, 12-14 октября 2011. – Т.1. – С.242-248.

5. Friedlander, S. K. (2000). Smoke, Dust and Haze. Oxford Univ. Press, Oxford.

6. Kruijs F.E., Kusters K.A. (1997) «The Collision Rate of Particles in Turbulent Flow», Chem. Eng. Comm. Vol. 158, 201-230.

7. Maiharju S.A (2005). Aerosol dynamics in a turbulent jet, A Thesis the Degree Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University.

SIMULATION OF DROP COAGULATIONS IN SWIRLED TIME DEPENDENT STREAMS WITH REFERENCE TO GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS

© 2013 A. A. Sviridenkov, V. V. Tretyakov

Central Institute of Aviation Motors (Moscow)

The paper presents a model of fuel drop coagulation with reference to gas turbine engine combustion chambers. Calculations of drop coagulation are carried out at various values of the fuel spray expansion angles and initial drop sizes using the model developed. The values of drop concentrations and their sizes depending on geometrical and performance characteristics of the sprayer are specified. It is shown that the decrease of the fuel spray angle, with the initial drop concentration and their sizes being the same, leads to the shift of the fuel concentration maximum towards larger sizes and increase in drop concentrations.

Combustion chamber, coagulation, atomization, fuel spray.

Информация об авторах

Свириденков Александр Алексеевич, ведущий инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ФГУП ЦИАМ). 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, Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ФГУП ЦИАМ). E-mail: tretjak@ciam.ru. Область научных интересов: расчетно-теоретические методы исследования гидродинамики, распыливания топлива, смесеобразования и процессов тепло- и массообмена.

Sviridenkov Alexander Alekseevich, leading engineer, Central Institute of Aviation Motors. E-mail: sviriden@ciam.ru. Area of research: experimental, computational and theoretical research methods of investigating hydrodynamics, fuel atomization, mixing and heat-mass transfer processes.

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