

**ВЛИЯНИЕ КОАГУЛЯЦИИ КАПЕЛЬ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА РАСПЫЛИВАНИЯ ЗА ФОРСУКАМИ**

©2009 А. А. Свириденков, В. В. Третьяков

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

Коагуляция (слияние) частиц является одной из основных причин изменения дисперсных систем. Это явление наблюдается в различных физических ситуациях: в растворах – броуновская коагуляция, при образовании каплей дождя – гравитационная коагуляция, коагуляция каплей распыленного топлива за форсунками в камерах сгорания – турбулентная коагуляция. В работе проводится систематическое исследование распределения частиц по размерам в результате броуновской и турбулентной коагуляции каплей распыленного топлива в камерах сгорания ГТД.

Коагуляция, капля, форсунка, смесь, факел распыливания

Коагуляция (слияние) частиц является одной из основных причин изменения дисперсных систем, под которыми понимают механическую смесь среды (газообразной или жидкой) с частицами диспергированной фазы (твёрдой или жидкой). Это явление наблюдается в различных физических ситуациях: в растворах – броуновская коагуляция, при образовании каплей дождя – гравитационная коагуляция, коагуляция каплей распыленного топлива за форсунками в камерах сгорания – турбулентная коагуляция. Основные предположения физического характера, накладываемые на систему коагулирующих частиц, состоят в следующем. Число частиц достаточно велико, чтобы можно было применять функцию распределения частиц по массам и в координатном пространстве. Ограничимся рассмотрением парных столкновений частиц. Отметим, что при сближении частиц проявляется действие сил гидродинамического взаимодействия, учет которых при вычислении коэффициента захвата проведен лишь для сближения двух частиц (задача двух тел). В этих предположениях изменение концентрации и спектра размеров частиц описывается уравнением Смолуховского, полученным еще в 1916 г.:

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

Неотрицательная функция $K_{i,j}$ называется ядром коагуляции, она описывает конкретное взаимодействие между частицами с объемами i и j , n_i - число частиц в дискретном объеме i . Первый член в правой части уравнения описывает приход частиц в размер k за счет коагуляции относятся к атмо-

сферным аэрозолям, в которых этот процесс в основном вызывается броуновской диффузией. В этом случае ядро

$$K(i,j) = (3/4\pi)^{1/6} (6K_B T / \rho_p)^{1/2} (X^{1/3} + Y^{1/3})^2 \times (X^1 + Y^1)^{1/2} \cdot [1].$$

Здесь X и Y – объем частиц i, j , K_B – постоянная Больцмана. В факелах распыла за форсункой основным механизмом, вызывающим увеличение размеров каплей, является турбулентная коагуляция. Для таких сред ядро коагуляции можно записать в виде [2]

$$K(i, j) = \sqrt{\frac{8\pi}{3}} (r_i + r_j)^2 \sqrt{W_s^2 + W_a^2};$$

$$W_a^2 = 3(1-b)^2 v_f^2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \times$$

$$\times \left(\frac{(\theta_i + \theta_j)^2 - 4\theta_i \theta_j \sqrt{\frac{1 + \theta_i + \theta_j}{(1 + \theta_i)(1 + \theta_j)}}}{\theta_i + \theta_j} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{(1 + \theta_i)(1 + \theta_j)} - \frac{1}{(1 + \gamma\theta_i)(1 + \gamma\theta_j)} \right);$$

$$W_s^2 = 0.238 b v_f^2 \left(\frac{v_i^2 \theta_i}{v_f^2 C_{\epsilon i}} + \frac{v_j^2 \theta_j}{v_f^2 C_{\epsilon j}} + \right. \\ \left. + 2 \frac{v_i v_j}{v_f^2} \sqrt{\frac{\theta_i \theta_j}{C_{\epsilon i} C_{\epsilon j}}} \right),$$

W_s и W_a – относительные скорости между частицами, вызванные турбулентным ускорением и напряжением трения соответственно. Здесь $v_f^2 = \frac{\gamma(\epsilon v)^{1/2}}{0.183}$, γ – константа,

пропорциональная отношению интегрально-го и микромасштаба турбулентности;

$$b = \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f}, \quad \rho_f - \text{плотность жидкости, } \rho_p -$$

плотность частиц. Безразмерное время релаксации

$$\theta_i = \frac{\tau_i}{T_L},$$

$$\tau_i = \frac{C_{ei}(2\rho_p + \rho_f)r_i^2}{9\mu},$$

μ - динамическая вязкость жидкости,

$$T_L = \frac{0.4v_f^2}{\varepsilon} - \text{интегральный масштаб време-$$

ни, ε - скорость диссипации турбулентной энергии пульсаций,

$C_{ei} = 1 + (\lambda/r_i)(1.257 + 0.42e^{-1.1/(r_i/\lambda)})$ - коэффициент проскальзывания, зависящий от отношения длины свободного пробега молекул λ к размеру частиц [3]. Среднеквадратичная скорость пульсаций v_i в вязком и инерциальном диапазоне турбулентности равна:

$$\frac{v_i^2}{v_f^2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left\{ \frac{1 + b^2\theta_i}{1 + \theta_i} - \frac{1 + b^2\gamma\theta_i}{\gamma(1 + \gamma\theta_i)} \right\},$$

а корреляция скоростей

$$\frac{v_i v_j}{v_f^2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times \left\{ \frac{(\theta_i + \theta_j + 2\theta_i\theta_j) + b(\theta_i^2 + \theta_j^2 - 2\theta_i\theta_j) + b^2(\theta_i^2\theta_j + \theta_i\theta_j^2 + 2\theta_i\theta_j)}{(\theta_i + \theta_j)(1 + \theta_i)(1 + \theta_j)} - \frac{(\theta_i + \theta_j + 2\gamma\theta_i\theta_j) + b\gamma(\theta_i^2 + \theta_j^2 - 2\theta_i\theta_j) + b^2(\gamma\theta_i^2\theta_j + \gamma^2\theta_i\theta_j^2 + 2\gamma\theta_i\theta_j)}{\gamma(\theta_i + \theta_j)(1 + \gamma\theta_i)(1 + \gamma\theta_j)} \right\}.$$

Решение приведенных уравнений осуществлялось методом, изложенным в [4]. В этом методе распределение частиц заменялось конечным числом I дискретных секций по размерам. Капли в каждой секции предполагались моодисперсным, что означает равенство размеров всех капель для данного класса. Радиус капель задавался выражением:

$$\log_{10} r_i = \log_{10} r_{\min} + (\log_{10} r_{\max} - \log_{10} r_{\min})(i-1)/I.$$

Минимальный размер капель r_{\min} равнялся $1 \mu\text{м}$, максимальный r_{\max} равнялся 1см . Число диапазонов капель I равнялось 274. Начальное распределение численной концентрации

задавалось в виде логарифмически нормального распределения:

$$N = N_0/d \ln \sigma \sqrt{2\pi} \times \exp(-(\ln d/d_{pg})^2 / 2 \ln^2 \sigma).$$

Здесь N_0 - начальная концентрация, d_{pg} - средний медианный диаметр, σ - геометрическое стандартное отклонение распределения.

В результате решения уравнений турбулентной коагуляции исследовано влияние свойств среды на распределение капель по размерам за фронтовым модулем. В частности исследовалось влияние скорости диссипации турбулентной энергии, начального размера капель и давления окружающей среды на различных расстояниях за форсункой. Проведенные исследования показали, что на процесс коагуляции существенное влияние оказывает первоначальный размер капель. Так, при увеличении начального размера капель с 5мкм до 10мкм размер капель через 0.01 с увеличивается в 1.25 раз. Однако процесс коагуляции, который ведет к укрупнению частиц, может сопровождаться дроблением капель в результате аэродинамического воздействия воздуха, что приведет к уменьшению влияния коагуляции. На рис.1 приведены данные о влиянии давления окружающей среды на коагуляцию капель распыленного керосина. Расчеты выполнены при значении скорости диссипации турбулентной энергии $10 \text{м}^2/\text{с}^3$. Как видно из приведенного графика, при изменении давления от 1 до 25 бар средний размер капель в результате коагуляции за 0.01 с увеличивается приблизительно на 30%. Таким образом, давление окружающей среды и начальный размер капель, выходящих из форсунки оказывают существенное влияние на коагуляцию капель.

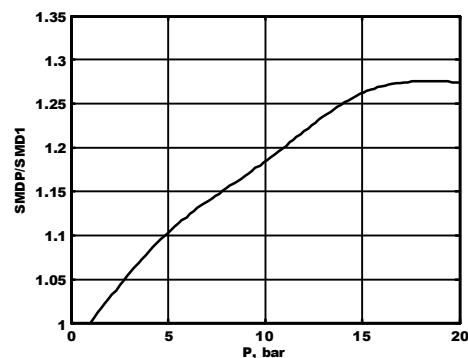


Рис.1. Зависимость относительного размера капель

в факеле распыла от давления в камере сгорания,
 $\varepsilon=10 \text{ м}^2/\text{с}^3$

Изменение среднего медианного размера капель по времени (расстоянию от форсунки) для капель первоначального размера 5 мкм и нормальном давлении окружающей среды показано на рис.2.

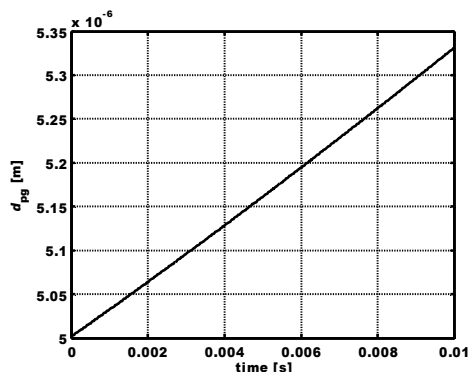


Рис.2. Зависимость размера капель в факеле распыла от времени коагуляции, $d_{pg0}=5 \text{ мкм}$, $\varepsilon=10 \text{ м}^2/\text{с}^3$

Такой рост размеров капель за распыливающими устройствами наблюдался и экспериментально, например в [5]. Характер увеличения размеров капель по времени (расстоянию) зависит от начального размера капель. Изменение среднего медианного размера капель по времени для капель первоначального размера 10 мкм и нормальном давлении окружающей среды показано на рис.3. Наибольший рост капель в этом случае наблюдается в начальный момент коагуляции, причем процентное увеличение размеров капель в три раза выше, чем для капель начального диаметра 5 мкм.

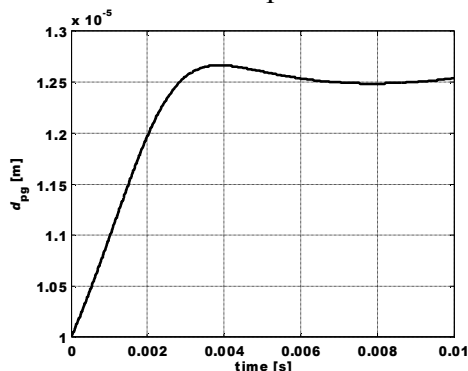


Рис.3. Зависимость размера капель в факеле распыла от времени коагуляции, $d_{pg0}=10 \text{ мкм}$, $\varepsilon=10 \text{ м}^2/\text{с}^3$

Существенным параметром, определяющим ядро турбулентной коагуляции K_{ij} является скорость диссипации турбулентной энергии ε . Оценки показывают, что за фрон-

товыми устройствами камер сгорания значения скорости диссипации могут меняться от $1 \text{ м}^2/\text{с}$ до $100 \text{ м}^2/\text{с}$. На рис. 4-5 представлено изменение относительной концентрации для двух значений диссипации турбулентной энергии. Увеличение скорости диссипации приводит к смещению распределения концентрации в область больших размеров, то есть основная доля капель распыленной жидкости будет приходиться на капли с размерами, на порядок величин превосходящие исходные капли. Распределения капель приведены за время коагуляции 0.01 с.

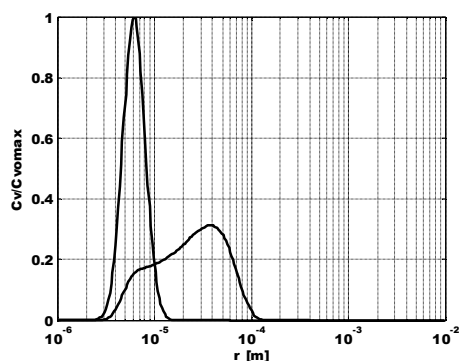


Рис.4 Распределение по размерам относительной концентрации:

— - начальное распределение;
 - распределение через 0.01 с.;
 $\varepsilon=1 \text{ м}^2/\text{с}^3$

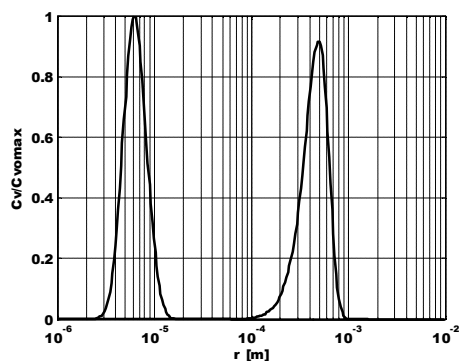


Рис.5 Распределение по размерам относительной концентрации:

— - начальное распределение;
 - распределение через 0.01 с.;
 $\varepsilon=100 \text{ м}^2/\text{с}^3$

Во всех вышеприведенных результатах расчетов коагуляции капель не учитывалось расширение струи по мере удаления от сопла форсунки. С учетом этого расширения кривая распределения объемной концентрации по размерам смещается в область более мелких капель (рис.6, 7). Расширение струи в расчетах учитывалось следующим образом. На каждом шаге по времени получае-

мая численная концентрация корректировалась на величину отношения площадей поперечного сечения струи в данном и предыдущим временном шаге.

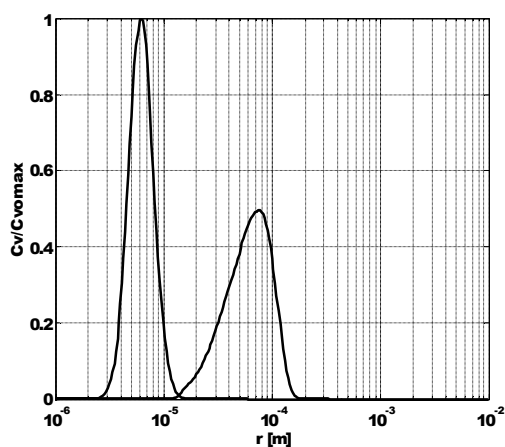


Рис.6 Распределение по размерам относительной концентрации;

— - начальное распределение;
 - распределение через 0.01 с.;
 $\varepsilon=10 \text{ м}^2/\text{с}^3$, угол раскрытия струи 1° .

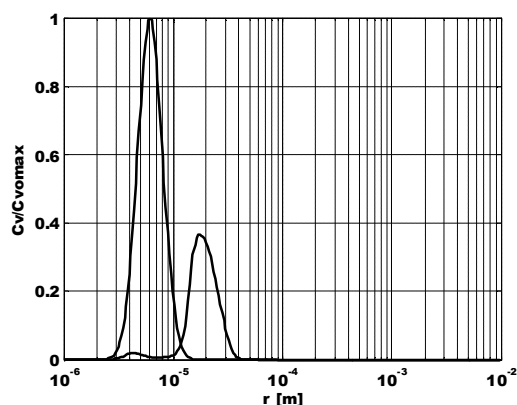


Рис.7 Распределение по размерам относительной концентрации;

— - начальное распределение;
 - распределение через 0.01 с.;
 $\varepsilon=10 \text{ м}^2/\text{с}^3$, угол раскрытия струи 30°

Приведенные результаты по влиянию различных параметров окружающей среды на размеры и распределения капель по размерам показывают важность измерения размеров капель при автономных испытаниях в условиях, максимально приближенных к реальным условиям в камерах сгорания. Так измерения размеров капель за фронтными устройствами камер сгорания обычно проводятся при нормальном атмосферном давлении. Однако проведенные расчеты показали существенную зависимость размеров капель

от давления. Таким образом, желательно проводить измерения размеров капель при больших давлениях, то есть в условиях барокамеры. Проведенный анализ подтвердил также важность получения мелкодисперсных капель на выходе из форсунки для улучшения качества распыливания топлива, поскольку взаимодействие более крупных капель вызывает более быстрое увеличение капель в результате коагуляции. Также отметим, что для улучшения перемешивания распыленного топлива с воздухом желательно увеличить энергию турбулентных пульсаций. Однако увеличение энергии турбулентных пульсаций будет вызывать рост скорости диссипации турбулентной энергии, что приведет к росту размеров капель в результате коагуляции.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 07-08-00573.

Библиографический список

1. Friedlander, S. K. Smoke Dust and Haze. Oxford Univ. Press, Oxford. p.210, 2000.
2. Kruis F. E., and Kusters K.A. The Collision Rate of Particles in Turbulent Flow, Chem. Eng. Comm. 158, p. 201-230. 1997
3. W. C. Hinds. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. John Wiley and Sons, New York, NY, 2nd edition, 1999.
4. Simo Aleksi Maiharju, Aerosol dynamics in a turbulent jet, A Thesis the Degree Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University, 2005
5. Пиралишвили, Ш.А. Исследование структуры закрученного потока и качества распыла топлива за фронтным устройством КС/ Ш.А. Пиралишвили, С.М. Хасанов, М.М. Шумаков // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: матер. докл. - Самара, 2006. Ч.1.- С. 185-186.

References

1. Friedlander, S. K. Smoke Dust and Haze. Oxford Univ. Press, Oxford. p.210, 2000.
2. Kruis F. E., and Kusters K.A. The Collision Rate of Particles in Turbulent Flow, Chem. Eng. Comm. 158, p. 201-230. 1997

3. W. C. Hinds. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. John Wiley and Sons, New York, NY, 2nd edition, 1999.

4. Simo Aleksi Maiharju, Aerosol dynamics in a turbulent jet, A Thesis the Degree Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University, 2005

5. Piralishvili, S.A. Research of structure of the swirl flow and fuel spray quality behind front device CC//S.A. Piralishvili, S.M.Hasanov, M.M.Shumakov// Problems and development prospects propulsion engineering: rep. mat. - Samara, 2006. part.1. - pp. 185-186.

EFFECT OF COAGULATION OF DROPS ON FUEL SPRAY CHARACTERISTICS BEHIND ATOMIZERS

© 2009 A. A. Sviridenkov, V. V. Tretiyakov

Central Institute of Aviation Motors, Moscow

Coagulation (fusion) of particles is one of the main reasons of dispersion evolution, which means mechanical mixture of environment (gaseous and liquid) with particles of disperse phase (solid or liquid). The phenomenon is observed in various physical situations: in solutions – Brownian coagulation, in rain drops formation process – gravitation coagulation in combustion chambers over atomizers – turbulent coagulation. The time evolution of particle size distribution due to Brownian and turbulent coagulation in combustion chambers was systematically investigated.

Coagulation, nozzle, spray

Информация об авторах

Свириденков Александр Алексеевич, ведущий инженер Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел. (495) 362-90-36. E-mail: sviriden@ciam.ru. Область научных интересов: процессы смешения в камерах сгорания ГТД.

Третьяков Валентин Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел. (495) 362-90-36. E-mail: tretjak@ciam.ru. Область научных интересов: процессы смешения в камерах сгорания ГТД.

Sviridenkov Aleksander Alekseevich, The leading engineer of The Central Institute Aviation Motors P.I. Baranova's name. Phone: (495) 362-90-36. E-mail: sviriden@ciam.ru. Area of research: mixture processes in combustion chambers of GTE.

Tretjakov Valentin Valentinovich, Candidate of Engineering Science, Head Researcher, assistant professor of The Central Institute Aviation Motors P.I. Baranova's name. Phone: (495) 362-90-36. E-mail: tretjak@ciam.ru. Area of research: mixture processes in combustion chambers of GTE.