

КОАГУЛЯЦИЯ ДЫМОВЫХ ЧАСТИЦ В ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**К. А. Авдеев¹, В. С. Иванов¹, С. М. Фролов¹, В. Basara²,
Р. Priesching², М. Suffa²**

¹ИХФ РАН
г. Москва, Россия
²AVL LIST GmbH
Graz, Austria

С введением в 2012 г. нового экологического стандарта Euro-VI в Европе впервые ограничивается не только содержание дымовых частиц и сажи (не более 5 мг/км, снижение на 66% по сравнению с Euro-V), но и их количество (не более $6 \cdot 10^{11}$ шт./км) в выхлопных газах поршневых двигателей [1]. Столь существенное ужесточение требований ведет к необходимости дальнейшего улучшения рабочего процесса, а также использования в конструкции двигателей специальных систем очистки отработавших газов, в частности сажевых фильтров, устанавливаемых в выпускной трубопровод. Для успешного решения этих задач необходимо иметь представление о динамике распределения дымовых частиц по размерам при движении турбулентного потока отработавших газов по каналам выпускной системы. Поскольку все измерения эмиссионных показателей отработавших газов проводятся на выходе из выпускной системы, это поможет решить важную обратную задачу — определить истинное распределение частиц по размерам в цилиндре двигателя.

Известно [2, 3], что одной из причин изменения параметров распределения частиц по размерам является их коагуляция. В турбулентных течениях с ультрадисперсными частицами (субмикронных и нанометровых размеров) в условиях относительно низких температур коагуляция реализуется, в основном, в соответствии с тремя механизмами [2–5]: броуновским, турбулентным диффузионным и турбулентным кинетическим. Ожидается, что броуновский механизм доминирует для частиц, размер которых соизмерим с размером

молекул несущей среды [2, 3]. Турбулентный диффузионный механизм вызван тем, что частицы увлекаются турбулентными пульсациями скорости, которые и приводят к их столкновениям и коагуляции. Турбулентный кинетический механизм учитывает, что полного увлечения частиц турбулентными пульсациями не происходит, и может наблюдаться различие между скоростями частиц и несущей среды. В этом случае коагуляция частиц вызвана инерционными эффектами. Сложный характер течения газа в выпускной системе не позволяет отдать предпочтение какому-либо одному из этих механизмов: вероятно ситуация, когда доминирующий механизм коагуляции изменяется по длине выпускной системы.

В данной работе создана модель коагуляции дымовых частиц в газовом потоке, учитывающая все основные механизмы: броуновский, турбулентный диффузионный и турбулентный кинетический. Математическая модель основана на ряде упрощающих предположений: (1) течение газа в выпускной системе одномерное, квазистационарное и известно *a priori*; (2) средняя скорость частиц не отличается от средней скорости газа; (3) размер частиц изменяется только вследствие коагуляции; (4) вероятность коагуляции частиц разного размера при столкновениях равна 1; (5) вероятность коагуляции одинаковых частиц при столкновениях равна 0; (6) начальное распределение частиц по размерам описывается логнормальным законом. Принятые допущения позволяют записать следующее уравнение для числовой концентрации частиц $n(d, x)$:

$$\frac{dn}{dx} = \frac{1}{V_g(x)} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{coag}} ; n(d, 0) = \frac{n_{\text{in}}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\text{in}} d} \exp \left(-\frac{\ln^2(d/d_{\text{in}})}{2\sigma_{\text{in}}^2} \right), \quad (1)$$

где x — координата; V_g — скорость газа; d — эквивалентный диаметр частиц; параметры n_{in} , d_{in} и σ_{in} — полная числовая концентрация, средний диаметр и дисперсия в начальной логнормальной функции распределения (ФР) частиц по размерам; дифференциальный член в правой части — скорость коагуляции, определяемая из соотношения [2]:

$$\left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{coag}} = - \int_0^{\infty} n(r_2) \left\{ \int_0^{r_1} \beta(r_1, r_2) n(r_1) dr_1 \right\} dr_2. \quad (2)$$

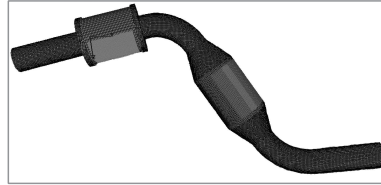


Рис. 1 Трехмерная расчетная сетка выпускной системы

Здесь $r = d/2$ — эквивалентный радиус частицы; $n(r)dr$ — числовая концентрация частиц радиусом от r до $r + dr$; $\beta(r_1, r_2) = \beta_b(r_1, r_2) + \beta_{td}(r_1, r_2) + \beta_{tk}(r_1, r_2)$ — ядро коагуляции для частиц радиусом r_1 и r_2 , а слагаемые $\beta_b(r_1, r_2)$, $\beta_{td}(r_1, r_2)$ и $\beta_{tk}(r_1, r_2)$ — ядра коагуляции в броуновском, турбулентном диффузионном и турбулентном кинетическом механизмах, определяемые известными соотношениями [2–5]:

$$\beta_b(r_1, r_2) = k_{\text{fm}}(r_1, r_2)K_b(r_1, r_2); \quad (3)$$

$$\beta_{td}(r_1, r_2) = S(r_1, r_2)\sqrt{\frac{8}{3\pi}\langle w^2 \rangle}; \quad (4)$$

$$\beta_{tk}(r_1, r_2) = S(r_1, r_2)w(r_1, r_2), \quad (5)$$

где k_{fm} — коэффициент свободномолекулярного режима коагуляции; K_b — коэффициент коагуляции; $S(r_1, r_2)$ — площадь эффективного сечения «трубки столкновений»; $w(r_1, r_2)$ — относительная скорость взаимодействующих частиц в турбулентном потоке; $\langle w^2 \rangle$ — среднее значение квадрата относительной скорости взаимодействующих частиц в турбулентном потоке.

Систему уравнений (1)–(5) дополняли базой данных теплофизических свойств веществ и интегрировали численно на заданном поле течения в выпускной системе автомобильного дизеля. На рис. 1 показана трехмерная расчетная сетка выпускной системы малоразмерного дизеля общей длиной 1,3 м, а на рис. 2 — осредненные по сечению распределения скорости газа V_g и диссипации кинетической энергии турбулентности ε . Газодинамические расчеты выполнены с помощью программы AVL FIRE®.

Для решения задачи использовали два независимых алгоритма: алгоритм со статической сеткой размеров частиц и алгоритм с адап-

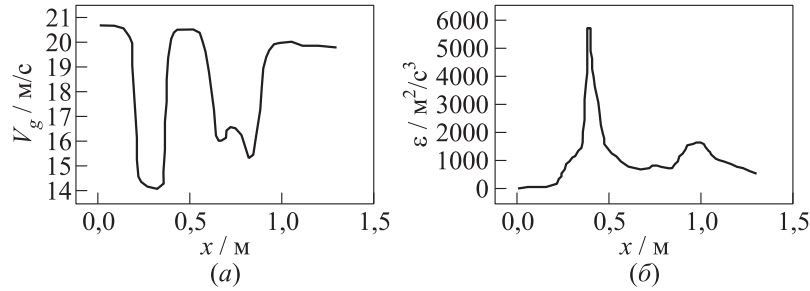


Рис. 2 Осредненные по сечению распределения скорости газа (а) и диссипации кинетической энергии турбулентности (б)

тивной динамической сеткой. В обоих алгоритмах сначала формировали дискретный аналог начального логнормального распределения частиц по размерам, а затем решали систему (1)–(5) консервативными разностными методами. Оба алгоритма приводили к одинаковым результатам.

На рис. 3 представлен пример расчета коагуляции частиц вдоль выпускной системы дизеля при $d_{in} = 10$ нм, $\sigma_{in} = 0,38$ и $n_{in} = 2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Отметим, что приблизительно такое распределение частиц по размерам получается в результате расчета сажеобразования в цилиндре малоразмерного дизеля непосредственно перед открытием выпускного клапана [6]. Из рис. 3 следует, что ФР претерпевает значительную трансформацию: средний диаметр частиц изменяется от $d_{in} = 10$ нм на входе в выпускную систему до $d_{out} \approx 85$ нм на ее выходе. В этом примере среди трех рассматриваемых механизмов коагуляции доминирующим оказался броуновский механизм, тогда как оба турбулентных механизма практически не повлияли на эволюцию ФР.

При изменении среднего диаметра частиц на входе в выпускную систему d_{in} от 10 до 60 нм (при прочих равных условиях) средний диаметр частиц на выходе d_{out} изменялся почти линейно (рис. 4). Дополнительный анализ показал, что форма ФР в процессе коагуляции оставалась логнормальной.

На рис. 5 приведен пример сравнения двух ФР дымовых частиц по размерам: экспериментальной (кривая 1) и расчетной (кривая 2). Экспериментальная кривая построена по результатам изме-

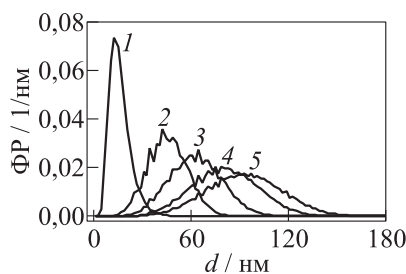


Рис. 3 Эволюция ФР дымовых частиц по размерам вдоль выпускной системы малоразмерного дизеля: 1 — $x = 0$ м (вход); 2 — 0,2; 3 — 0,37; 4 — 0,79; 5 — $x = 1,3$ м (выход)

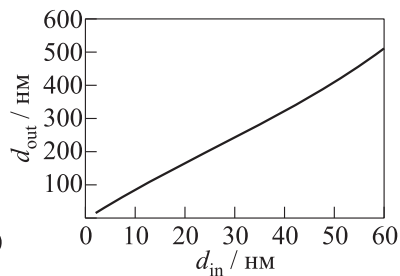


Рис. 4 Зависимость среднего диаметра дымовых частиц в выходном сечении выпускной системы d_{out} от среднего диаметра частиц во входном сечении d_{in}

рений на выходе из выпускной системы реального крупноразмерного дизеля [7] (параметры выпускной системы не известны). В эксперименте средний размер частиц составил около 140 нм. Расчетная ФР получена для выпускной системы рис. 1 при таких значениях d_{in} , σ_{in} и n_{in} , при которых достигалось наилучшее согласие с экспериментом. Из такого сравнения следует, что при учете коагуляции частиц в выпускной системе их средний диаметр в цилиндре дизеля должен быть на уровне ~ 75 нм. Это важное заключение следует иметь в виду при сравнении результатов расчетов сажеобразования в цилиндре дизеля с экспериментальными данными: измерения размеров частиц на выходе из выпускной системы могут не иметь ничего общего с размерами частиц в цилиндре двигателя.

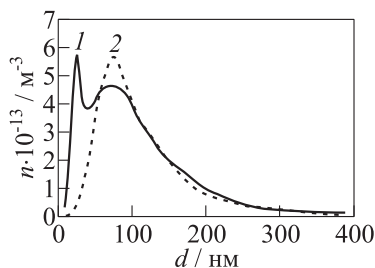


Рис. 5 Сравнение двух ФР дымовых частиц по размерам: экспериментальной (1) и расчетной (2)

Таким образом, нами предложена модель коагуляции дымовых частиц в выпускной системе поршневого двигателя, включающая три механизма: броуновский, турбулентный диффузионный и турбулентный кинетический. Расчеты показали, что процесс коагуляции оказывает значительное влияние на средний размер дымовых частиц в выходном сечении выпускной системы (средний диаметр может увеличиться почти на порядок), а доминирующим механизмом коагуляции частиц в выпускной системе дизеля является броуновский механизм.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 11-08-01168 и 11-08-97548-р_центр).

Литература

1. COMMISSION REGULATION (EC) No.692/2008 of July 18, 2008. http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/environment/eurovi/index_en.htm. P. 130.
2. Payne, J. F. B., and G. Skyrme. 1993. An analytical means of comparing the rates of different agglomeration mechanisms, and its application to a PWR containment. *Int. J. Multiphase Flow* 19(3):451–470.
3. Friedlander, S. K., ed. 2000. Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosols dynamics. 2nd ed. New York–Oxford: Oxford University Press Inc. 407 p.
4. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: ГИЗ физико-математической литературы, 1959. 700 с.
5. Пискунов В. Н. Теоретические модели кинетики формирования аэрозолей. — Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000. 209 с.
6. Медведев С. Н., Власов П. А., Фролов С. М., Басара Б., Пришинг П., Суффа М. База данных для расчета функций распределения сажевых частиц по размерам в двигателях внутреннего сгорания // Горение и взрыв / Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012. Вып. 5. С. 83–90.
7. Petrovich, V. 2011. Methods for measurement and verification of ultra fine particles concentration from diesel engine emission. *Automotive Conference (International) “Science and Motor Vehicles 2011” Proceedings*. Beograd, Serbia. Paper No. NMV11-5E03.