

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОБНЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ РАСЧЕТА ДВУХФАЗНЫХ СТРУЙНЫХ
ТЕЧЕНИЙ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО
СГОРАНИЯ

С. М. Фролов¹, В. С. Иванов¹, В. Basara², Е. von Berg²,
М. Suffa²

¹ИХФ РАН

г. Москва, Россия

²AVL LIST GmbH

Graz, Austria

Современные вычислительные пакеты позволяют моделировать сложные трехмерные течения газа с двухфазными струями с учетом скоростной и температурной неравновесности фаз, фазовых переходов, соударений, слипания и дробления капель, а также турбулентности, горения и образования токсичных веществ. Одна из наиболее часто используемых моделей двухфазных струйных течений — модель пробных частиц (МПЧ). В этой модели дисперсная фаза (капли) описывается конечным набором пробных частиц-представителей (ПЧ). Влияние газа на течение дисперсной фазы учитывается через решение уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для каждой ПЧ вдоль ее траектории, причем коэффициенты межфазного взаимодействия рассчитываются по соотношениям для одиночной капли. Влияние же дисперсной фазы на течение газа учитывается через суммарные источники массы, количества движения и энергии в соответствии с тем, сколько капель представляет та или иная ПЧ. Несмотря на ряд известных достоинств этой модели, она обладает серьезным недостатком: результаты расчетов проявляют «сеточную» зависимость, т. е. зависимость от пространственного разрешения трехмерной расчетной сетки.

Цель данной работы — модифицировать МПЧ с тем, чтобы уменьшить «сеточную» зависимость результатов расчетов (далее — сеточная зависимость) применительно к двигателям внутреннего сгорания (ДВС) с прямым впрыском топлива и дизелям.

Анализ причин сеточной зависимости при использовании стандартной МПЧ привел нас к следующему важному заключению: основная причина сеточной зависимости — изменение локальной числовой концентрации капель при переходе от одной сетки к другой. Действительно, если считать (как в стандартной модели), что ПЧ — это одиночная капля из ансамбля N одинаковых капель, сосредоточенная в расчетной ячейке объемом V_c , то локальная числовая концентрация капель в единице объема $n = N/V_c$ зависит от расчетной сетки. Очевидно, что величина n , которая во многом определяет интенсивность межфазных взаимодействий в струе, не должна зависеть от расчетной сетки.

Чтобы исправить ситуацию и уменьшить сеточную зависимость, мы предложили концепцию распределенной ПЧ, т. е. предложили рассматривать ПЧ как сферическое «облако» из N одинаковых капель, имеющее конечный объем V . В этом случае числовая концентрация капель $n = N/V$ не зависит от расчетной сетки, а влияние ПЧ на газ распределяется на все ячейки, находящиеся полностью или частично внутри «облака». При этом объем ПЧ может изменяться во времени t и в пространстве (x, y, z) вследствие турбулентной дисперсии «облака» и/или вследствие изменения плотности среды: $V = V(t, x, y, z)$.

Для применения модели распределенных пробных частиц (МРПЧ) к задачам о двухфазных струях в ДВС потребовалось решить ряд дополнительных проблем.

Оказалось, что эволюцию ПЧ можно разделить на две стадии: начальную и регулярную. На начальной стадии (на малых расстояниях от среза форсунки), когда струя представляет собой очень плотную пелену капель, МРПЧ, вообще говоря, ничем не отличается от МПЧ, т. е. тоже проявляет сеточную зависимость. Действительно, на этой стадии начальный объем ПЧ — это объем V_0 , занимаемый плотной упаковкой ансамбля из N одинаковых капель. В современных инженерных расчетах ДВС, как правило, $V_0 \ll V_c$ и, следовательно, степень влияния дисперсной фазы на параметры газа зависит от V_c . С ростом объема ПЧ $V(t, x, y, z) > V_0$, вызван-

ным различными газодинамическими эффектами, такая сеточная зависимость сохраняется даже при $V \approx V_c$, однако существует такой объем V (не зависящий от V_c), при котором сеточная зависимость исчезает: наступает регулярная стадия эволюции ПЧ.

Для уменьшения сеточной зависимости потребовалось разработать специальную модель межфазного обмена массой, количеством движения и энергией для начальной стадии эволюции ПЧ, а также предложить физически обоснованный критерий перехода от начальной стадии к регулярной. Кроме того, потребовались дополнительные модели для описания линейной скорости роста ПЧ на начальной и регулярной стадиях эволюции.

Межфазный обмен массой, количеством движения и энергией на начальной стадии эволюции ПЧ моделировали как двухступенчатый процесс. Сначала происходило взаимодействие капель и газа внутри объема ПЧ $V < V_c$, а затем учитывалось взаимодействие газа в ПЧ и газа в ячейке посредством турбулентного переноса массы, количества движения и энергии. Другими словами, газ в ПЧ имел локальные параметры, вообще говоря, отличающиеся от параметров газа в ячейке.

В отличие от стандартного МПЧ, такая модель оперирует «истинной» числовой концентрацией капель $n = N/V$, а также учитывает влияние коллективных эффектов на межфазное взаимодействие и конечную скорость распространения диффузионных потоков. Специальные исследования показали, что начальная стадия заканчивается, когда объем ПЧ приблизительно равен суммарному объему аэродинамического следа за всеми каплями в ПЧ, т. е. когда в объеме ПЧ достигаются условия, близкие к условиям однородной изотропной турбулентности.

Для оценки линейной скорости роста ПЧ провели серию трехмерных модельных расчетов обтекания сферических облаков частиц турбулентным газовым потоком, используя очень мелкие расчетные сетки. Оказалось, что на начальной стадии процесса обтекания при больших числовых концентрациях частиц в ПЧ и высоких относительных скоростях газа и ПЧ (до 200–300 м/с) линейная скорость роста ПЧ составляла некоторую долю от относительной скорости газа и ПЧ U : $w = \alpha U$, где $\alpha \approx 0,02$. На регулярной стадии процесса обтекания при умеренных концентрациях частиц в ПЧ и невысоких относительных скоростях газа и ПЧ линейная скорость роста ПЧ

определялась параметрами турбулентности в окрестности ПЧ — интенсивностью $u' = \beta U$ и частотой $\omega \approx u'/V^{1/3}$, где $\beta \approx 0,2$.

Сеточную зависимость новой модели проверили на нескольких примерах.

Пример 1

На рис. 1, *a* представлено три разных расчетных сетки: мелкая, средняя и грубая — с размерами ячеек 0,5, 1,0 и 2,0 мм соот-

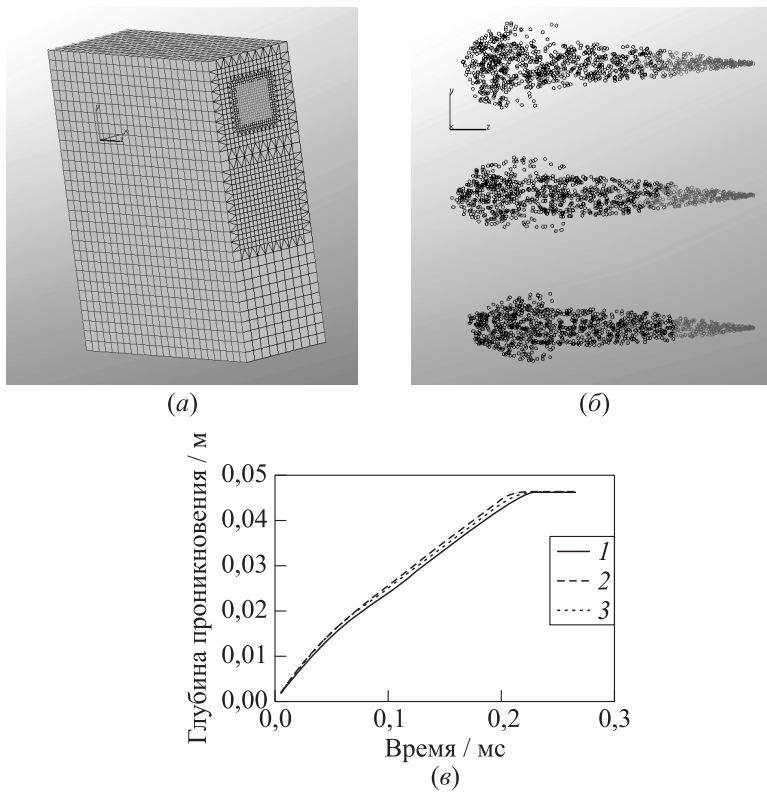


Рис. 1 Расчетные сетки (*a*), изображения струй (*б*) и зависимости глубины проникновения струй от времени (*в*) для примера 1: 1 — 2 мм; 2 — 1; 3 — 0,5 мм

ветственно. На всех трех сетках одинаковые струи испаряющейся жидкости, состоящие из одинаковых капель начальным диаметром 10 мкм, впрыскивались в объем, заполненный воздухом с температурой 1000 К и давлением 1 атм, по нормали к боковой стенке (по оси z). На рис. 1, б показаны изображения струй, полученные на разных сетках в один и тот же момент времени. На рис. 1, в проведено сравнение расчетных зависимостей глубины проникновения струй от времени, полученных на трех сетках. Видно, что изменение объема расчетной ячейки в $4^3 = 64$ раза практически не повлияло на форму струи и глубину ее проникновения. Интересно, что

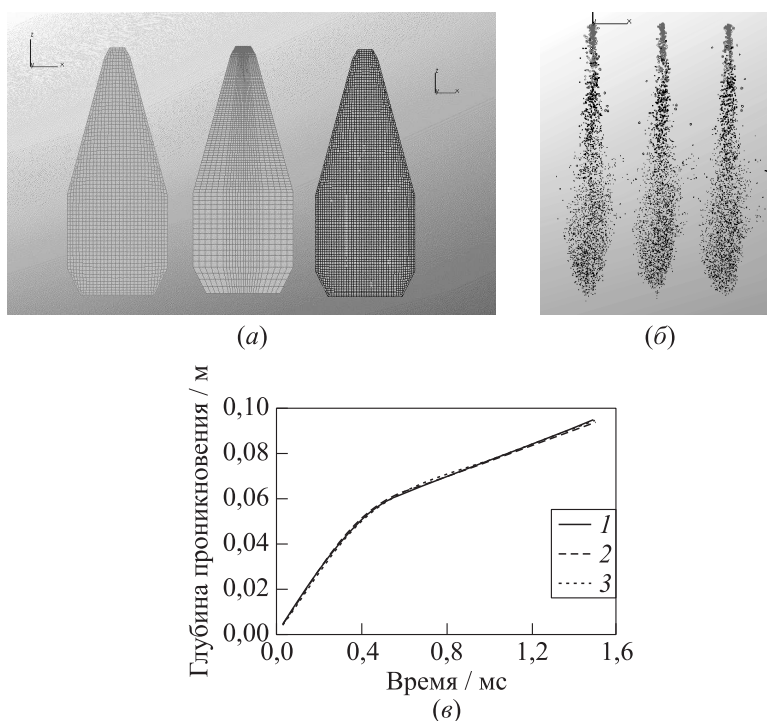


Рис. 2 Расчетные сетки (а), изображения струй (б) и зависимости глубины проникновения струй от времени (в) для примера 2: 1 — 30 000; 2 — 50 000; 3 — 100 000

начальная стадия эволюции ПЧ (отмечена светлыми кружками на рис. 1, б) оказалась более продолжительной для ПЧ, расположенных в ядре струи. Это физически оправдано, так как числовая концентрация капель в ядре струи больше, чем на периферии, и, следовательно, переход к регулярной стадии затягивается.

Пример 2

Аналогичные результаты проверки сеточной зависимости представлены на рис. 2. Здесь показаны три расчетные сетки с количеством ячеек 30 000, 50 000 и 100 000 и размером ячеек 1,3, 1,1 и 0,9 мм соответственно (рис. 2, а), изображения струй с начальной стадией, выделенной светлыми кружками (рис. 2, б), и расчетная глубина проникновения струй, полученная на трех сетках.

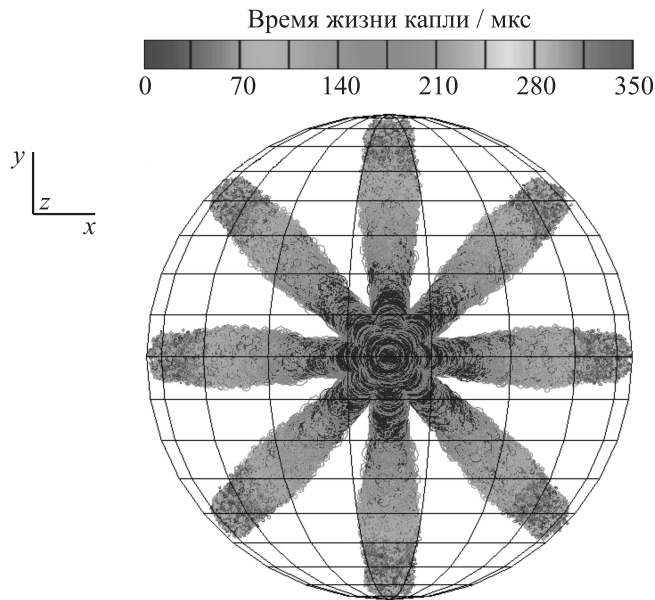


Рис. 3 Проверка сеточной зависимости МРПЧ при расчете смесеобразования в дизеле с форсункой в виде восьмилучевой звезды: глубина проникновения струй не зависит от их ориентации относительно расчетных ячеек

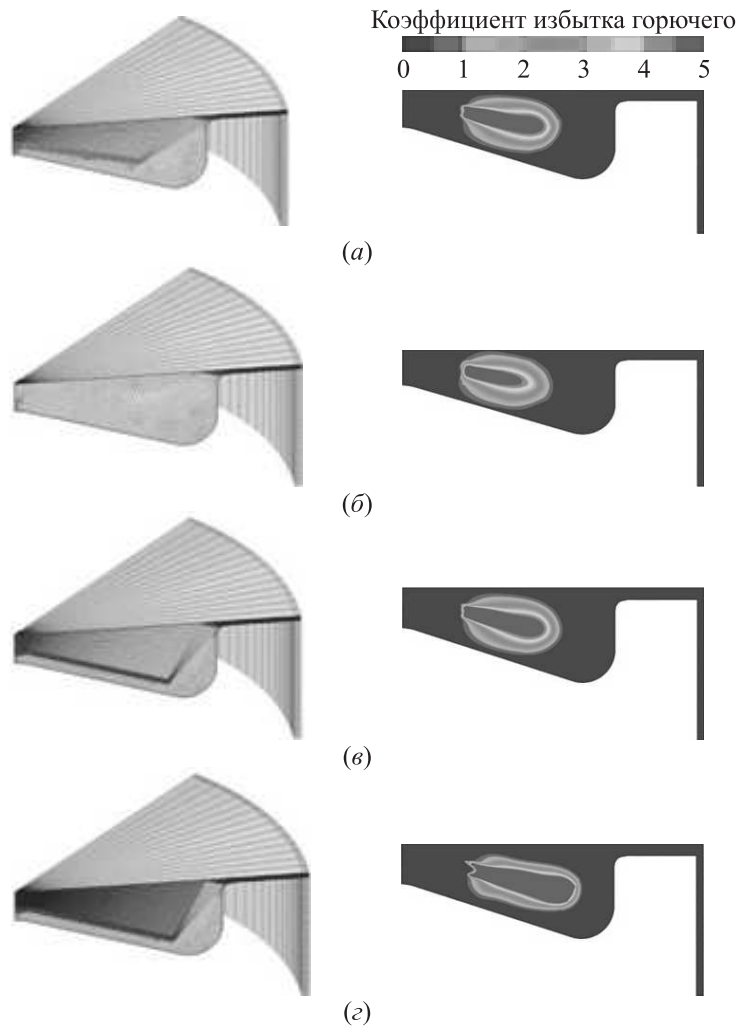


Рис. 4 Проверка сеточной заивисмости МРПЧ при расчете смесеобразования в дизеле на разных расчетных сетках (слева) на примере пространственных распределений коэффицента избытка горючего в паровой фазе: сетки с 58 290 (а), 32 325 (б), 71 685 (в) и 282 765 ячеек (г)

Пример 3

В примере 3 проверили сеточную зависимость при разной ориентации двухфазных струй относительно расчетных ячеек (распространение вдоль ячейки или вдоль диагонали ячейки, рис. 3). В отличие от стандартной МПЧ применение новой модели к задаче о смесеобразовании в дизеле с форсункой в виде восьмилучевой звезды не проявляет никакой сеточной зависимости.

Пример 4

В примере 4 проверили сеточную зависимость при расчете смесеобразования в дизеле. На рис. 4 показаны 4 расчетные сетки и соответствующие результаты расчета в виде полей коэффициента избытка горючего Φ в паровой фазе в один и тот же момент времени при одинаковых пределах изменения Φ . Видно, что результаты расчетов с использованием МРПЧ проявляют очень слабую сеточную зависимость.

Таким образом, для моделирования сложных трехмерных течений газа с двухфазными струями применительно к ДВС с прямым впрыском топлива и дизелям в ИХФ РАН разработана модель распределенных пробных частиц, которая обеспечивает значительно меньшую сеточную зависимость результатов расчетов, чем стандартная модель пробных частиц. Сеточную зависимость новой модели проверили на нескольких примерах.

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