

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ В ДВС

Гришин Ю.А.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва*

Дальнейшее повышение основных экономических и экологических характеристик поршневых двигателей связано с усложнением их конструкций, удорожанием работ по их доводке. С целью ускорения решаемых задач в настоящее время все шире применяются методы математического моделирования процессов в двигателях, в частности, газообмена.

При моделировании нестационарных течений в газоздушных трактах двигателей в МГТУ им. Н.Э.Баумана используются, в основном, 3 базовых численных метода и их модификации: метод характеристик с плавающей сеткой (МХПС), метод распада разрыва (МРР) и метод крупных частиц (МКЧ).

Для настройки протяженных индивидуальных трактов на динамический наддув и очистку цилиндров применяется МХПС в одномерной постановке, т.к. только он обеспечивает необходимое фазовое и амплитудное соответствие моделируемого и реального процессов. Метод необходим также для наиболее точной отладки и проверки граничных условий (ГУ) на различных элементах тракта: клапанах, коленах и разветвлениях коллекторов, компрессорах и турбинах.

Наряду с явным преимуществом хорошего отражения реальной физической картины нестационарных волновых процессов базовый МХПС имеет недостаток – он является неконсервативным, приводит к определенным неточностям в определении итоговых масс, импульсов и энергий. Это обусловлено тем, что он опирается только на дифференциальные уравнения, выражающие изменения инвариантов Римана вдоль характеристических направлений. С использованием принципа осреднения параметров в деформирующихся ячейках и соблюдения всех законов сохранения при переходах через фронты элементарных волн, идущих вдоль характеристик, в МГТУ была разработана абсолютно консервативная схема МХПС [1]. При этом можно учесть также диссипативные процессы трения и теплообмена со стенками каналов.

Рассмотрим основные принципы расчета МХ с выполнением свойства консервативности на примере ячейки  $d$  (рис.1). В ячейках  $a$ ,  $b$  и др. предыдущего ряда значения газодинамических параметров уже известны, известны также координаты узлов  $M$ ,  $C$ ,  $N$  и т.д. Будем считать угловые коэффициенты характеристик  $CA$  и  $CB$  по параметрам в ячейках  $a$  и  $b$ :  $(u-a)_{AC} = u_a - a_a$ ,  $(u+a)_{BC} = u_b + a_b$ . Это позволит получить координаты  $t_A$ ,  $x_A$  и  $t_B$ ,  $x_B$ .

Запишем значения массы, импульса и энергии, которые будут переходить из ячейки *a* в ячейку *d* через фронт *AC* с учетом трения по Дарси-Вейсбаху (к-т  $\lambda$ ) и теплоотдачи по Ньютону (к-т  $\alpha$ ) в стенки канала с температурой  $T_k$  и диаметром  $D$  при единичной площади проходного сечения:

$$M_a = \rho_a a_a (t_A - t_C); \quad (1)$$

$$I_a = M_a u_a - [\lambda_0 \rho_a u_a |u_a| (x_C - x_A) / 2D - p_a] (t_A - t_C); \quad (2)$$

$$L_a = M_a e_a - [4\alpha_w (T_a - T_k) (x_C - x_A) / D - p_a u_a] (t_A - t_C), \quad (3)$$

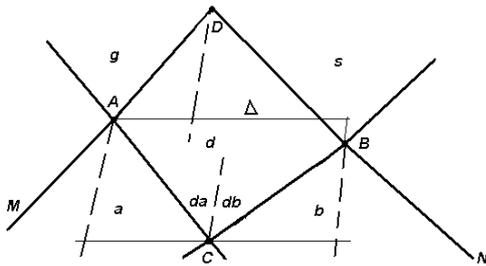


Рис.1. Ячейка МХПС

где  $e_a = p_a / [(k-1)\rho_a] + u_a^2 / 2$ . Подобным образом определяются значения  $M_b$ ,  $I_b$  и  $L_b$  для перехода из *b* в *d*. В результате в ячейке *d* окажутся запасы массы, количества движения и энергии  $M = M_a + M_b$ ,  $K = I_a + I_b$  и  $E = L_a + L_b$ , которые полностью израсходуются при переходах через замыкающие ячейку *d* фронты *AD* и *BD*.

Введем обозначения:  $\Delta$  - ширина струйки, проходящей через ячейку *d*, т.е. между точками *A* и *B*;  $\Delta x = x_B - x_A$ ,  $\Delta t = t_B - t_A$ . Величину  $\Delta$  можно представить соотношением  $\Delta = \Delta x - u_d \Delta t$ , где  $u_d$  - пока неизвестное среднее значение скорости в ячейке *d*. Для определения этой скорости, а также средних давления  $p_d$  и плотности  $\rho_d$  в ячейке *d* следует рассмотреть систему уравнений

$$\rho_d \Delta x = M + \rho_d u_d \Delta t; \quad (4)$$

$$M u_d = K + p_d \Delta t; \quad (5)$$

$$M \left[ \frac{p_d}{(k-1)\rho_d} + \frac{u_d^2}{2} \right] = E + p_d u_d \Delta t. \quad (6)$$

Из этой системы с использованием обозначений  $\iota = K/M$ ,  $\lambda = E/M$ ,  $\delta = \Delta x / \Delta t$  получается формула для определения скорости:

$$u_d = \frac{\delta + k\iota}{k+1} \pm \sqrt{\left( \frac{\delta + k\iota}{k+1} \right)^2 - 2 \frac{(k-1)\lambda + \delta\iota}{k+1}}, \quad (7)$$

далее из системы находятся  $p_d$  и  $\rho_d$ . Для выбора знака перед радикалом используется контрольное значение скорости  $u_d$ , получаемое из (5) при  $\Delta t = 0$ . Затем можно переходить к расчету следующих ячеек сетки.

Наибольший объем численных исследований производится с помощью методов сквозного счета с фиксированной сеткой. Для моделирования нестационарного газообмена развернутых многоцилиндровых двигателей целесообразно использовать одномерные схемы МРР, которые не дают «нефизичных» всплесков и раскачки параметров за фронтами импульсов. Эти вычислительные осцилляции, характерные, например, для базовой версии

МКЧ [2], совершенно неприемлемы для моделирования газообмена в КДВС с турбинами и компрессорами.

С использованием принципа установления процесса МКЧ целесообразно применять для решения сложных задач пространственного анализа и конструирования элементов газоздушного тракта. Цель работ – снижение потерь, получения необходимых характеристик закрутки заряда в цилиндре и др. Вследствие простоты алгоритма скорость вычислений у МКЧ выше, чем у МРР. Однако при решении многовариантных и объемных задач по заказам промышленности время счета все-таки оказывается весьма значительным. Поэтому актуальны работы по усовершенствованию численных методов, направленные на ускорение расчетов.

Было отмечено, что в базовый МКЧ для обеспечения устойчивости вычислений затопленных струй и отрывных течений, характерных для ДВС, требует применения весьма малых значений сеточного числа Куранта:  $Co = a\Delta t/h = 0,05 - 0,1$  ( $a$  – скорость звука,  $h = \min\{\Delta x, \Delta y, \Delta z\}$ ). Это приводило к увеличению времени счета и ухудшению точности, поскольку, очевидно, область зависимости разностных уравнений получается на порядок больше области зависимости исходных газодинамических дифференциальных уравнений.

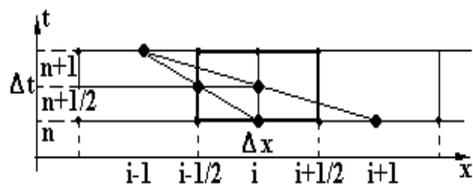


Рис.2. Ячейка МКЧ

С помощью представления о наклонных секущих для трех смежных расчетных ячеек с использованием параметров не только  $n$ , но и  $n+1$  временного слоя удалось аналитически выразить значение промежуточного давления. В одномерном случае

$$\tilde{p}_i = \frac{p_i^n - (k-1) \cdot C p_i^{n+1/2} \{0,5[u_i^n + u_{i+1}^n - (0,5p_{i+1}^n - p_{i-1/2}^{n+1/2}) \cdot C / \rho_i^n] - u_{i-1/2}^{n+1/2}\}}{1 - 0,25(k-1) \cdot C^2 p_i^{n+1/2} / \rho_i^n}, \quad (8)$$

где  $C = \Delta t/\Delta x$ , а затем и всех других газодинамических параметров в средней ячейке  $i$  на эйлеровом этапе. Тем самым для политропного газа была получена новая неявная модификация МКЧ с переходом на второй порядок точности по времени, не требующая дополнительных итераций [3]. Это позволило повысить устойчивость и точность расчетов. Несмотря на некоторое усложнение расчетного алгоритма, за счет увеличения числа  $Co$  время вычислений сократилось в несколько раз.

Подобный прием был использован и для получения неявной модификации МРР [4]. В работе [4] показано также, что расчетные осцилляции МКЧ обусловлены несоответствующим нестационарному течению принципом задания средних арифметических значений давления и скорости на границах ячеек. Использование для этих границ на эйлеровом этапе соотношений линеаризованного распада разрыва позволяет полностью исключить раскочку параметров.

Важным шагом в развитии схем расщепления типа МКЧ явился учет

изменения плотности на эйлеровом этапе [4].

Частица в ячейке с первоначальным размером  $\Delta x$  (рис.3) под действием импульсов сил и работ, совершаемых на границах  $i-1/2$  и  $i+1/2$ , получает промежуточные значения скорости  $\tilde{u}_i$  и удельной полной энергии  $\tilde{e}_i$ . Эти параметры, относящиеся к центру тяжести частицы, не зависят от того, деформируется частица или нет. В МКЧ этой деформацией пренебрегают и принимают для плотности допущение  $\tilde{\rho}_i = \rho_i^n = const$ . Такой подход, очевидно, неточен. Т.к. скорости перемещаемых границ могут заметно различаться, частица будет расширяться или сужаться. Соответствующее изменение плотности легко

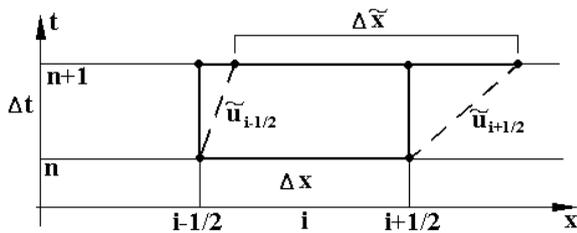


Рис.3. Деформация ячейки МКЧ

учесть. Очевидно, что  $\rho_i^n \Delta x = \tilde{\rho}_i \Delta \tilde{x}_i$  и  $\Delta \tilde{x}_i = \Delta x + (\tilde{u}_{i+1/2} - \tilde{u}_{i-1/2}) \Delta t$ . Тогда

$$\tilde{\rho}_i = \rho_i^n / \left[ 1 + \frac{\tilde{u}_{i+1/2} - \tilde{u}_{i-1/2}}{\Delta x} \Delta t \right] = \rho_i^n / \left[ 1 + \frac{\tilde{u}_{i+1} - \tilde{u}_{i-1}}{2\Delta x} \Delta t \right]. \quad (9)$$

В принципе этот расчет изменения плотности можно рассматривать как еще один этап схемы расщепления. Затем следует лагранжев этап с определением потоков массы через границы ячеек. В частности, для  $i+1/2$  границы при  $\tilde{u}_i + \tilde{u}_{i+1} > 0$  будем иметь:

$$\Delta M_{i+1/2}^n = \tilde{\rho}_i \frac{\tilde{u}_i + \tilde{u}_{i+1}}{2} F \Delta t. \quad (10)$$

Далее производится обычный заключительный этап с исполнением законов сохранения массы, импульса и энергии. Учет деформации крупной частицы с  $\rho = var$  позволяет поднять предел устойчивости расчетов по  $Co$  до величин, близких к 1, и значительно уменьшить амплитуду колебаний за фронтами моделируемых волновых процессов.

На базе описанных модификаций МКЧ с участием А.С.Кулешова и А.Н.Каримова был разработан программный комплекс NSF (Non-steady flow), который позволил решить целый ряд важных практических задач по улучшению характеристик газоздушных трактов двигателей, результаты переданы на заводы для внедрения. Отметим некоторые из них.

На 59 % снижены потери выпуска из окон в коробку, на 48 % - потери в коллекторе и на 14 % - пульсации давления перед турбиной свободнопоршневого генератора газа спецназначения. Для двухтактного авиадизеля ТДА-450, создававшегося в НПП "Мотор", были спроектированы пояса окон, впускные и выпускные коробки. По отношению к базовым конструкциям потери на впуске снижены на 64 %, на выпуске - на 83 %. Результаты работы использованы при изготовлении опытных образцов дизеля.

Модельная лопаточная выпускная коробка для дизеля 6ТД (6ДН

12/2x12) завода им.Малышева, изготовленная на базе расчетов, при испытаниях на заводе показала улучшение расходной характеристики по сравнению со штатной в среднем на 10 %. Чертежи соответствующих прессформ для отливки коробок были переданы заказчику.

Для дизеля 61Б-31 (16 ДРПН 23/2x30) завода «Русский дизель» была разработана «двухэтажная» лопаточная выпускная коробка с улучшением расходной характеристики по ходу открытия окон от 45 до 20 %. При испытаниях дизеля с новым комплектом коробок за счет снижения потерь выпуска и дисбаланса мощности турбины и компрессора получено снижение удельного расхода топлива на 8-10 %.

Расчетная доводка заходной части впускных каналов четырехклапанной крышки цилиндра дизеля 6ЧН 30/38 (30ДГМ, ОАО «Коломенский завод») с ликвидацией отрывной зоны в первом по потоку канале и общее улучшение профиля каналов подняло их расходную характеристику в среднем на 4-6 %.

Для дизелей ЯМЗ-236Н и ЯМЗ-752 разработаны выпускные коллектора с потерями полного давления, уменьшенными соответственно на 72,5 и 43,3 % по отношению к базовым вариантам, значительно снижена неравномерность выпусков из цилиндров.

Для бензиновых двигателей ЗиЛ-130 и ЗиЛ-375 улучшены профили впускных винтовых каналов, внедренных в производство. Это позволяет экономить на каждом автомобиле 700-900 л топлива в год.

В выпускных коллекторах наддувной и безнаддувной модификаций дизеля ЗиЛ-645 потери давления удалось снизить в 2 раза при обеспечении равномерности выпуска по отдельным цилиндрам. Во впускных коллекторах потери были снижены соответственно на 75 и 35 %. Стендовые испытания безнаддувного дизеля с новой впускной системой показали уменьшение расхода топлива до 4 г/кВт·ч.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин Ю.А. Консервативный метод характеристик с плавающей сеткой // Тезисы докладов V Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях, Самара, 5-10 июня 2004 г.- М.: Вузовская книга, 2004. - С. 79-80.
2. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике.- М.: Наука, 1982 .- 392 с.
3. Гришин Ю.А. Экономичные аналитико-численные алгоритмы метода крупных частиц // Численн. исслед. актуальн. проблем машиностр. и механ. сплош.и сыпуч.сред методом крупных частиц: В 5 т./Под ред. Ю.М.Давыдова / Нац. Академия прикл.наук.- М.,1995.- Т.4.- С.1277-1289.
4. Гришин Ю.А. Разработка неявных схем на базе методов распада разрыва и крупных частиц. Математическое моделирование.РАН.- 2004.- т.16.- N 6.- с.81-84.