

УДК 621.436.052

## Численное моделирование течения в газодинамических диодах

Ю.А. Гришин, И.В. Москалев, А.И. Лепеха

*С помощью программного комплекса Flow Vision, предназначенного для пространственных расчетов течений жидкости и газа, выполнено моделирование работы газодинамических диодов на режимах открытия и закрытия при различных перепадах давления. Получены расчетные поля скоростей и расходные характеристики, хорошо согласующиеся с результатами соответствующих экспериментов.*

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, газодинамический диод, FlowVision, сложные течения.

*The simulation of gas-dynamic diodes operation in opened and closed modes at different pressure drops has been carried out by means of the FlowVision software package designed to calculate the three-dimensional fluid flow. The calculated velocity fields and flow rate characteristics are in good agreement with the results of the experiments.*

**Keywords:** computational fluid dynamics (CFD), gas-dynamic diode, FlowVision, complex flows.

Различные типы газодинамических диодов или клапанов без подвижных частей применяют в системах гидропневмоавтоматики, энергоустановках и других устройствах в разных областях техники. В настоящее время используют конструкции весьма эффективных лопаточных клапанов, обеспечивающих «диодность» в десятки единиц (отношение расходов в прямом и обратном направлении при одинаковых перепадах давления). Примерами таких диодов являются устройства в виде отрезков труб, половина проходных сечений которых загромождена решеткой наклонных лопаток. Если кромки лопаток направлены навстречу потоку, то гидравлическое сопротивление резко возрастает, диод практически закрывается. При противоположном направлении течения сопротивление незначительно, и диод открыт [1, 2]. Разработаны и более сложные схемные решения таких устройств.

Применение газодинамических диодов весьма перспективно, в частности, для улучшения характеристик газообмена и наддува поршневых двигателей. Так, например, для наддува автомобильных двигателей, эксплуатирующихся в городских условиях при постоянно меняющихся режимах работы, в ряде случаев целесообразно использование приводных роторно-шестеренчатых нагнетателей (РУТС). Применяются они и в двухступенчатых системах наддува мощных тепловозных двигателей [3]. Однако работа этих нагнетателей сопровождается шумом и значительными пульсациями параметров на входе, что обусловлено особенностями так называемого внешнего, циклического сжатия. Установка диода на выходе из нагнетателя по-



**ГРИШИН**  
**Юрий Аркадьевич**  
доктор технических наук,  
профессор



**МОСКАЛЕВ**  
**Игорь Владимирович**  
аспирант  
кафедры «Поршневые  
двигатели»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)



**ЛЕПЕХА**  
**Анатолий Иванович**  
кандидат технических  
наук,  
генеральный директор  
(ЗАО «Гидроэнергетические  
машины»)

звоняет практически исключить обратные импульсы в системе, что резко улучшает характеристики нагнетателя [4].

Двухтактные двигатели с кривошипно-камерной продувкой, получившие благодаря простоте и дешевизне конструкции широкое распространение в мотоциклах, моторных лодках, средствах малой механизации и легкой авиации, имеют существенные недостатки в организации рабочего процесса и, как следствие, высокие расход топлива и токсичность выпускных газов (ВГ). Среди их недостатков следует отметить заброс ВГ через впускные окна в кривошипную камеру и даже проникновение импульсов этих газов во впускные патрубки, что резко ухудшает смесеобразование в карбюраторах. Для борьбы с этим явлением применяют обратные лепестковые (пластинчатые) клапаны, устанавливаемые перед впускными окнами, что позволяет уменьшить забросы и улучшить характеристики двигателей [5].

Однако лепестковые клапаны не решают полностью эту проблему. Во-первых, с увеличением частоты работы двигателей лепестки, обладая инерцией, «зависают» и перестают выполнять свои функции. Во-вторых, для них требуются весьма дорогие сорта тонкой упругой стали, которые отечественная металлургия не выпускает. И в-третьих, ресурс работы таких клапанов в любом случае оказывается недостаточным.

Радикальным решением данной проблемы является установка диодов, не имеющих подвижных частей и, очевидно, обладающих неограниченными надежностью и ресурсом. Кроме того, работоспособность диодов практически не зависит от режима работы двигателя. Известны результаты экспериментов на мотоциклетных двигателях ММВЗ-3.112, ТМЗ-5.101 и YAMAHA YТ 175L с установкой диодов перед впускными окнами. Во всех случаях достигнуты значительные результаты. Серийный двигатель YAMAHA укомплектован лепестковым клапаном. Замена этого клапана на диод обеспечила снижение удельного расхода топлива на 20...25% во всем диапазоне режимов работы [6].

Следует отметить, что течение газа в диодах носит весьма сложный пространственный характер, их экспериментальная доводка очень трудоемка. Для правильного выбора конструктивных соотношений их элементов необходимо проводить трехмерное математическое моделирование.

В данной работе расчетные исследования проводились на ЭВМ с четырехядерным процессором Intel Core-i7 2.8GHz численным методом контрольных объемов (МКО) [7] с учетом эффектов турбулентного теплообмена на расчетных сетках около 1 млн ячеек. Для расчетов использовался передовой отечественный программный комплекс трехмерной вычислительной гидродинамики FlowVision НРС.

Как и в других методах сквозного счета с фиксированной сеткой в МКО расчетная область с определенным шагом по пространству  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  разбивается на некоторое вполне определенное число непересекающихся объемов — ячеек с центральными узлами (рис. 1). Систему исходных уравнений газовой динамики, представляющую собой в общем случае совокупность уравнений конвективно-диффузионного переноса, можно записать в обобщенной дифференциальной форме:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v}f) = \nabla(D\nabla f) + Q, \quad (1)$$

где  $f$  — рассчитываемая переменная;  $\mathbf{v}$  — вектор скорости;  $D$  — коэффициент диффузии;  $Q$  — источниковый член.

Уравнения (1) интегрируют по каждому контрольному объему ( $i$ -й ячейке) расчетной сетки и по отрезку времени от  $t = t^n$  до  $t = t^{n+1}$  ( $t^{n+1} - t^n = \Delta t$  — шаг расчета по времени) и в случае отсутствия дополнительного источника  $Q$  переменной  $f$  можно записать

$$\int_{V_i} f dV \Big|_{t^{n+1}} - \int_{V_i} f dV \Big|_{t^n} + \int_{\Delta t A_i} \oint f \mathbf{v} dA dt = \int_{\Delta t A_i} \oint D \nabla f dA dt, \quad (2)$$

где  $V_i$  — объем ячейки;  $A_i$  — ее поверхность (сумма площадей всех граней),  $A_i = A_{ei} + A_{wi} + A_{ni} + A_{si} + A_{hi} + A_{li}$ .

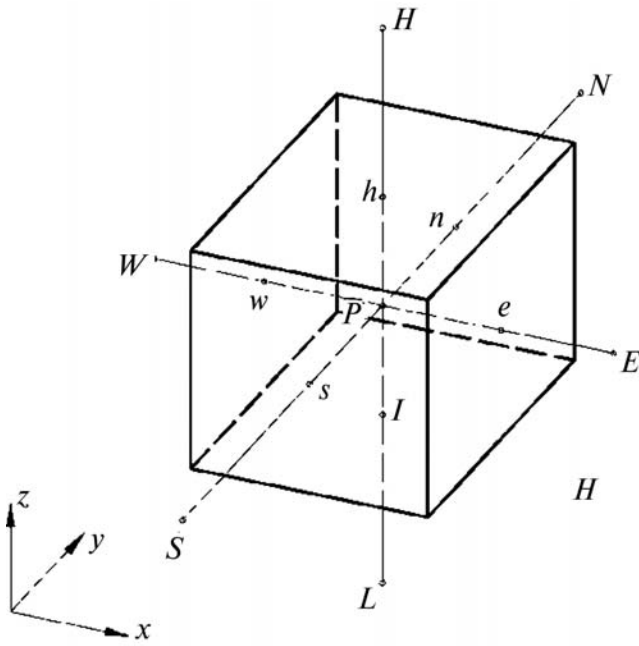


Рис. 1. Расчетная ячейка МКО

В конечно-разностной форме уравнение (2) представляется в виде

$$V_i (f_i^{n+1} - f_i^n) + A_{ei} F_{ei} + A_{wi} F_{wi} + A_{ni} F_{ni} + A_{si} F_{si} + A_{hi} F_{hi} + A_{li} F_{li} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $f^{n+1}$  и  $f^n$  — осредненные значения этой переменной по объему  $i$ -ячейки в моменты времени  $t^{n+1}$  и  $t^n$  соответственно, в частности

$$f_i^n = \int_{V_i} f dV |_{t^n}; \quad F_{ei} = \int_{\tau} (\bar{f}v + D\nabla f) dt \quad (4)$$

— осредненная плотность потока рассчитываемой переменной  $f$  через грань  $A_{ei}$ . Аналогично записывают плотности потока параметра через грани  $w, n, s, h$  и  $l$ .

При записи дифференциальной формы (1) и последующих, в качестве переменной  $f$  имеют в виду любую переменную, характеризующую состояние среды, например, плотность  $\rho$ . Значение переменной в узловой точке  $P$  рассматриваемого объема есть ее среднее, т. е. удельное значение в объеме  $V$ . Так, для плотности имеем

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (5)$$

где  $M$  — полная масса, заключенная в объеме с центром  $P$ . Тогда при рассмотрении параметра  $\rho$  получаем закон сохранения массы, выра-

жающий тот факт, что полное приращение массы в объеме  $V$  равно сумме притоков массы через все грани объема за счет двух составляющих — конвекции и диффузии.

Отметим, что, если рассматриваемая ячейка примыкает к границам расчетной области, в уравнении (3) будет присутствовать слагаемое  $\sum_j G_i^j g_i^j$ , выражающее плотность потока переменной  $f$  через твердые поверхности площадью  $g^j$  ( $j < 6$ ), ограничивающие расчетную область в части данной ячейки. Если обозначить эти части переменной  $f$  индексом « $w$ », для соответствующей плотности потока можно записать

$$G_i^j = \int_{\tau} [f_{wj} v_{wj} + D(\nabla f)_{wj}] dt. \quad (6)$$

Для получения адекватных результатов численного моделирования большое значение имеет организация расчетной сетки. В программном комплексе FlowVision НРС применяется специально разработанная прямоугольная адаптивная локально измельчаемая сетка (АЛИС). В свободной части расчетной области размещается прямоугольная неравномерная сетка. Если же ячейка сетки пересекается элементом границы, то она делится на восемь равных ячеек. Если необходима дальнейшая детализация геометрии, деление («адаптация» в терминологии FlowVision) каждой получившейся ячейки повторяется.

Адаптация ячейки до третьего уровня продемонстрирована на рис. 2. При генерации АЛИС учитывается ограничение: ячейки, имеющие общую грань, не могут быть адаптированными на уровни, отличающиеся более чем на единицу.

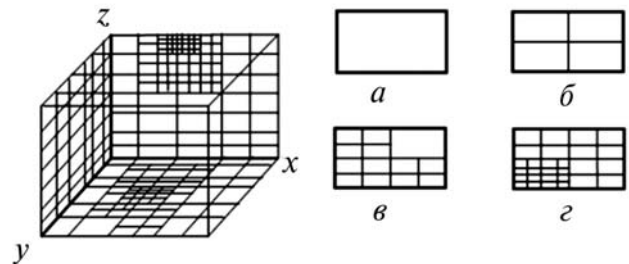


Рис. 2. Адаптивная локально измельченная сетка. Измельчение ячеек на несколько уровней: а-г — 0–3 уровни адаптации

Традиционно в расчетах используют неструктурированные сетки (конечно-элементные методы), либо структурированные мультиблоковые сетки (для конечно-объемных и конечно-разностных методов). Ячейки таких сеток вдали от границ расчетной области имеют постоянное число соседних ячеек, соприкасающихся гранями. Ячейки же системы АЛИС имеют переменное число соседей — в трехмерном случае по грани с ячейкой могут соседствовать либо одна, либо четыре соседа. Последнее обстоятельство затрудняет реализацию численных методов, но АЛИС имеет значительные преимущества по сравнению с пространственными сетками. Во-первых, большая скорость генерации сетки. Во-вторых, АЛИС не предъявляет высоких требований к оперативной памяти компьютера по сравнению с неструктурированными сетками. Это обусловлено древовидной структурой АЛИС, при которой каждая ячейка связана с сеткой нулевого уровня, имеющей полную геометрическую информацию. В-третьих, при генерации АЛИС не образуются «плохие ячейки», которые имеют слишком большие отношения площадей граней.

Обычно при использовании сетки АЛИС геометрия объектов в расчетной области аппроксимируется первым порядком точности — «ступеньками». Повышение порядка разбиения сетки около поверхностей позволяет уменьшить вносимую такой аппроксимацией погрешность, но может потребовать слишком больших ресурсов компьютера. По этой причине в программном комплексе FlowVision используется технология подсеточного разрешения геометрии. Геометрия (расчетная область) описывается как набор плоских, выпуклых и непересекающихся граней — фасеток. На первом этапе алгоритма определяются фасетки, которые попали в ячейки расчетной области, т. е. которые формируют расчетную область. Затем ячейки делятся на конечные объемы  $V_i$ , ограниченные гранями ячеек и фасетками. Если в ячейке нет фасеток, то конечный объем совпадает с ней.

В процессе решения задачи течения газа в диоде была проанализирована сходимость по

сетке и получена оптимальная расчетная сетка порядка миллиона расчетных ячеек. Для формирования этой расчетной сетки использовалась адаптация в объеме диода около лопаток и в пространстве непосредственно за окончанием (смотря по направлению потока) лопаточной части.

Как показали численные эксперименты, в пространстве за лопаточной частью имеет место сложное течение газа, разрешение которого заметно сказывается на точности решения. В то же время на входе в диод возмущения потока минимальны, что позволяет использовать вытянутые ячейки до первой лопатки. В окрестности лопаток и в пространстве за ними использовалась равномерная сетка.

При решении задачи течения воздуха в газовом диоде во всех постановках использовались следующие граничные условия: на входе — полное давление, величина которого обеспечивает необходимый перепад; на выходе — атмосферное давление; на стенках — логарифмические пристеночные функции распределения параметров [8]. На рис. 6 приведены векторы скорости в плоском сечении, однако масштаб и разрешение не позволяют отразить изменение профиля около стенок трубки. Для учета турбулентности использована стандартная  $k-\varepsilon$  модель [9].

Предварительный расчет модели диода показал, что сразу за лопаточным аппаратом поток сильно турбулизован и закручен, образуются вихри, провоцирующие втекание газа через выход. Поэтому для получения достоверных результатов необходимо было либо отодвигать от лопаток выходной срез, либо вводить на выходе дополнительный объем, в который выходил бы поток.

В расчетах использовались параметры геометрии для прямой и изогнутой труб (на рис. 3. приведена часть изогнутой трубки), экспериментальные данные для которых приведены в [10]. Параметры обоих диодов, за исключением кривизны изогнутой трубки (радиус осевой линии 105 мм), одинаковы: 35 лопаток; угол установки лопаток в продольном сечении  $55^\circ$ ; угол установки лопаток относительно нормального, т. е. перпендикулярного оси трубки сече-

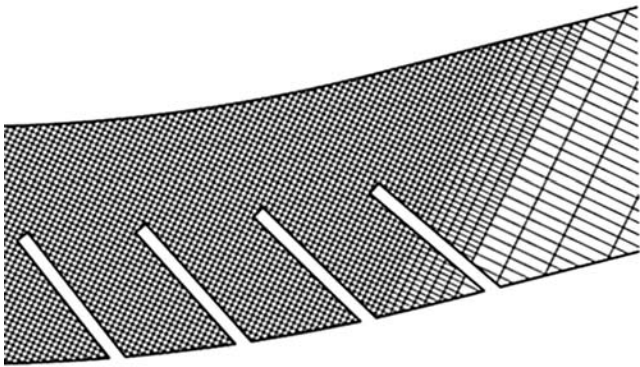


Рис. 3. Расчетная сетка, адаптация в боксе до 1-го уровня

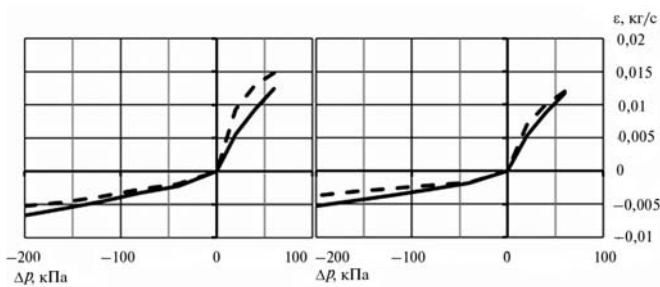


Рис. 4. Зависимость расхода воздуха  $g$  в диодах от перепада давления  $\Delta p$ :

$a$  — прямой диод;  $b$  — изогнутый диод;  
 ———— результат расчета;  
 - - - - экспериментальные результаты

ния  $10^\circ$ ; толщина лопаток  $0,8...1,0$  мм; диаметр трубок  $14$  мм.

Основные результаты расчетов приведены на рис. 4, где показано, в основном, хорошее согласование с результатами соответствующих экспериментов. Было выявлено, что в «открытом» варианте диода, когда лопатки наклонены по потоку, расход обеспечивается практически плоскопараллельным течением в свободной, необлопаченной, части трубки. В межлопаточных объемах наблюдаются застойные вихревые течения малой интенсивности.

В «закрытом» варианте, когда лопатки наклонены против потока, формируется интенсивное спиральное вихревое течение с наклоном витков, соответствующим наклону лопаток. Причем спираль загромаждает все сечение трубки, как в лопаточной, так и в свободной части (рис. 5). Исключением является входной участок трубки, на котором спиральное течение только начинает формироваться. Запирание происходит вследствие многократного уд-

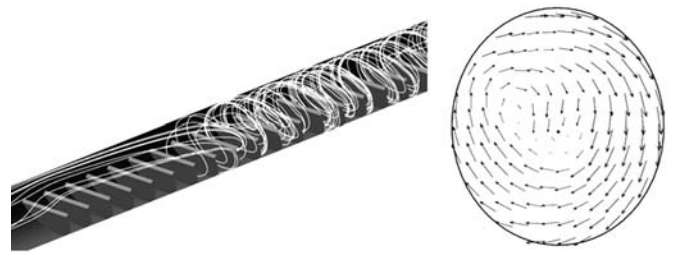


Рис. 5. Линии тока в прямом диоде («закрытый» вариант) и векторы скорости в межлопаточном сечении, параллельном лопаткам

линения пути, проходимого основной частью потока при спиральном движении, и увеличения затрат энергии на организацию этого движения.

Как показали эксперименты и численное моделирование, диодность изогнутого канала с расположением лопаток на внешнем радиусе выше, чем прямого. Связано это с тем, что спиральный поток под действием центробежных сил отжимается в облопаченную часть канала, над внутренним радиусом трубки начинается образование отрывной зоны. В результате имеет место дополнительное уменьшение расхода, т. е. эффективность диода возрастает.

Как видно на рис. 6, поток, встречая на своем пути первую лопатку, перескакивает несколько последующих лопаток и лишь затем вовлекается в спиралевидное вихревое течение. Первые лопатки, таким образом, не вносят свой вклад в вихреобразование. Введение предварительной закрутки на входе (например, с помощью эксцентрично расположенного подводящего канала, перпендикулярного оси диода) или специальные геометрические параметры первых лопаток позволят повысить удельную эффективность диода. Численный эксперимент показал, что при давлении  $200$  КПа расход для прямого диода без закрутки составляет  $-0,00665$  кг/с, а для диода с закруткой  $\sim 0,0052$  кг/с.

## Выводы

Эксперименты в программном комплексе FlowVision убедительно доказали пригодность численных методов для решения задач с таким нетривиальным течением, как в газодинамических диодах. Очевидно, что натурный экспери-

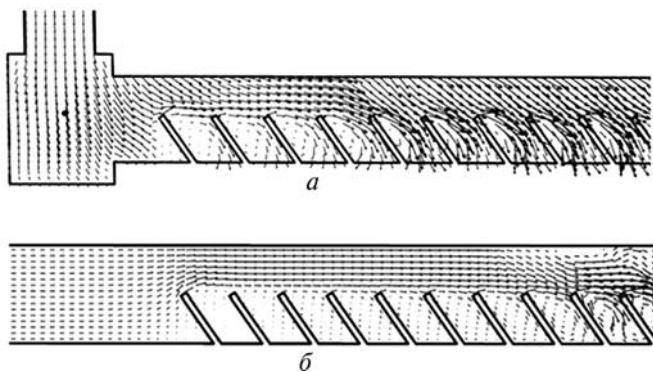


Рис. 6. Векторы скорости в прямом диоде в закрытом состоянии:

*a* — с закруткой потока на входе;  
*б* — без закрутки потока на входе

мент в сравнении с численными методами оказывается неэффективным, дорогим, медленным. Детальный анализ течения, понимание тонких процессов, особенностей вихреобразования в вычислительной среде несоизмеримо проще, чем в эксперименте: получение распределения любой характеристики в объеме или в любом сечении на ЭВМ не требует специального измерительного оборудования, а разрешение, по сути, ограничивается лишь размерностью расчетной сетки.

Проведенные численные эксперименты показали:

- использование изогнутого канала с лопатками на внешнем радиусе повышает диодность клапана;
- во входной части запирающего диода спиралевидное течение формируется не сразу, для его интенсификации необходимы дополнительные конструктивные меры, например, предварительная закрутка потока на входе с помощью тангенциальной трубки подвода газа. Это позволяет повысить эффективность запирающего потока, т. е. повысить диодность.

Детальное исследование влияния различных параметров геометрии и газодинамических параметров на диодность газодинамического клапана становится не только возможным, но и эффективным при использовании таких комплексов вычислительной гидродинамики, как FlowVision.

## Литература

1. Анохин В.Д., Круглов М.Г., Лепеха А.И. Исследование течения в гидромеханическом клапане без подвижных частей // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 1. С. 74—78.
2. Анохин В.Д., Лепеха А.И. Гидромеханические клапаны без подвижных частей в ДВС // Двигателестроение, 1986. № 9. С. 58—59.
3. Агрегаты воздушного снабжения комбинированных двигателей внутреннего сгорания / Под ред. М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1973. 296 с.
4. Айрбабамян С.А., Анохин В.Д., Лепеха А.И. Снижение шума компрессорных установок. Борьба с шумом и звуковой вибрацией // Материалы НТ семинара. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1984. С. 66—71.
5. Балахтар А.И., Плешаков А.А. Двухтактный двигатель с обратным клапаном на впуске // Автомобильная промышленность. 1985. № 3. С. 12—13.
6. Исследование работы мотоциклетных двигателей с клапанами без подвижных элементов: Техн. отчет / ВНИИмотопром; Руководитель работы Е.А. Михалковский. Договор № 354; № ГР 81050060. Серпухов, 1987. 34 с.
7. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publishing Corp., 1980. P. 214.
8. Жлуктов С.В., Аксенов А.А., Харченко С.А. и др. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision HPC // Вычислительные методы и программирование, 2010. Т 11. № 2. С. 246—249.
9. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD, DCW Industries, Inc., 1994. P. 460.
10. Лепеха А.И. Лопаточный клапан без подвижных частей в системах газообмена двигателей внутреннего сгорания: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 164 с.

Статья поступила в редакцию 22.12.2011