

## Сверхзвуковое движение тела в трубе, наполненной разреженным газом

А.Н. Якунчиков, А.Р. Газизова

Москва, Механико-математический ф-т МГУ им. М.В.Ломоносова  
e-mail:art-ya@mail.ru

В работе исследована плоская задача об обтекании цилиндра, движущегося со сверхзвуковой скоростью в канале, наполненном разреженным газом. Расчеты проводились методом прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC) и методом событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD). Рассмотрены случаи движения при числе Маха 1.5 и 3, числе Кнудсена 0.1, 1, 3.5 и различных размеров движущегося тела (0.1–0.8) по отношению к размеру канала. Получены поля плотности, давления, скорости и температуры, коэффициент сопротивления и теплового потока.

**Supersonic body motion in a channel with rarefied gas.** A.N. Yakunchikov, A.R. Gazizova. The problem of supersonic flow past cylinder moving in a channel with rarefied gas was investigated in plane statement. The Direct Simulation Monte-Carlo (DSMC) and Event-driven Molecular Dynamics (EDMD) methods were used for computation. The following cases were considered: Mach number 1.5 and 3, Knudsen number 0.1, 1, 3.5 for different sizes of body (0.1–0.8) relative to channel size. The fields of density, pressure, velocity and temperature were obtained, drag coefficient was calculated.

Рассматривалась задача обтекания тела, движущегося со сверхзвуковой скоростью в канале, наполненном разреженным газом, в плоской постановке. В качестве тела выбран цилиндр. В системе координат, связанной с телом, на тело набегают поток разреженного газа, стенки движутся с той же скоростью (рис. 1). Высота канала  $H$ , диаметр цилиндра  $D$ . На входной границе задавалась плотность, скорость и температура газа, на выходной границе – условие свободного вытекания (поглощающая граница). На стенках канала и цилиндра ставилось условие рассеяния с полной аккомодацией энергии и импульса (ядро рассеяния Максвелла).

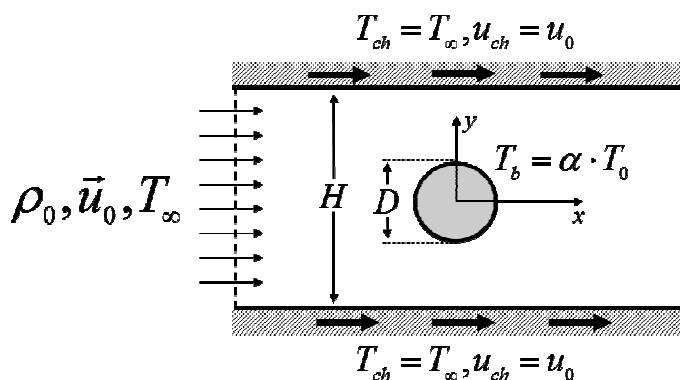


Рис. 1. Схема задачи.

Расчеты проводились двумя методами – методом прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC) и методом событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD). Использовались собственные программные реализации данных методов, перед расчетом рассматриваемой в настоящей работе задачи методы были успешно протестированы на нескольких классических задачах динамики разреженного газа (течение в канале, обтекание цилиндра и др.).

На рис.2 приведены стационарные поля плотности, давления и температуры, полученные при  $M = 3, Kn = 0.1, T_b = T_\infty$  и различных размеров тела. Видно, что на некотором

расстоянии от тела формируется прямой скачок, далее дозвуковая область и разгон опять до сверхзвуковой скорости в «сопле» за счет сужения сечения потока на теле. Из соотношений на разрыве следует, что чем выше скорость до ударной волны, тем ниже она после нее. Поэтому при уменьшении скорости следует ожидать, что число Маха в дозвуковой области увеличится, следовательно, при данном размере тела «соплов» может стать нерасчетным. Эти рассуждения подтверждаются расчетами – при уменьшении скорости до  $M = 1.5$  волна начинает отходить от тела дальше вверх по потоку, но в итоге течение устанавливается. Сравнение результатов для  $M = 1.5$  и  $M = 3$  представлены на рис. 3. Видно, что при  $M = 1.5$  между ударной волной и телом формируется градиент давления, что является результатом движения стенок относительно тела.

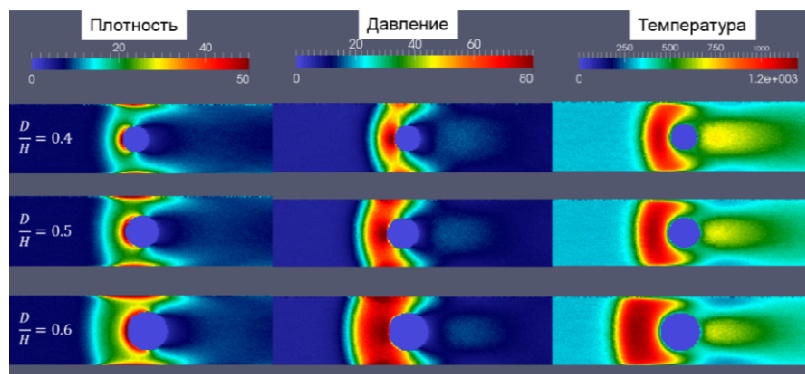


Рис. 2. Поля плотности, давления и температуры при  $M = 3, Kn = 0.1, T_b = T_\infty$  для различных относительных размеров тела  $D/H = 0.4, 0.5, 0.6$ .

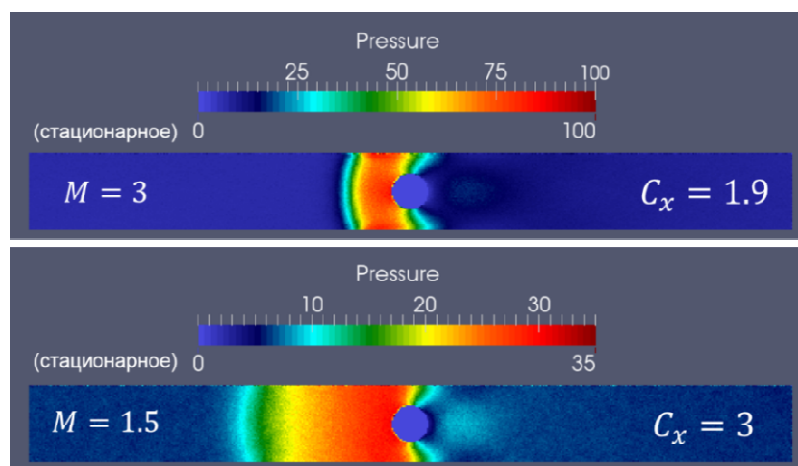


Рис. 3. Сравнение полей давления для случаев  $M = 1.5$  и  $M = 3$  при  $Kn = 0.1, T_b = T_\infty$ .

При размерах тела более  $D/H = 0.6$  и  $Kn = 0.1$  ударная волна значительно отходит вверх по потоку, поэтому для корректного решения при этих параметрах необходимо увеличивать расчетную область. При  $Kn = 1$  и  $Kn = 3.5$  при всех рассмотренных размерах течение стационарно, все возмущения находятся вблизи тела и не отходят вверх по потоку.

В работе решена задача обтекания тела, движущегося со сверхзвуковой скоростью в трубе, наполненной разреженным газом, в плоской постановке. Получено, что в сильном разрежении ( $Kn \geq 1$ ) при всех рассмотренных размерах тела ( $D/H = 0.1 - 0.8$ ) реализуется стационарный режим обтекания и возмущения заметно не отходят от тела вверх по потоку. При  $Kn = 0.1$  образуется отошедшая ударная волна, положение которой зависит от числа Маха и размера тела: чем ниже скорость и больше тело, тем выше по потоку отходит скачок.

Вычисления проводились с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова и суперкомпьютера МСЦ РАН.