

## ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Д.Х.Офенгейм, М.П.Сыщикова, М.К.Березкина,  
Д.М.Шаров, П.А.Войнович*

В задаче о воздействии УВ на круговой цилиндр большой интерес представляют вопросы о характере изменения и времени установления параметров на поверхности тела в процессе формирования течения. Эти вопросы в определенном объеме рассмотрены в ряде теоретических и экспериментальных работ [1,2]. Исследования проводились в широком диапазоне интенсивностей падающей ударной волны (УВ), но при этом относительное уплотнение на фронте волны  $\rho$  не превышало величины предельного уплотнения в идеальном газе с показателем адиабаты  $\gamma = 1.4 : \rho_{M=\infty} = 6$ . Однако в реальных процессах часто приходится иметь дело с УВ, величина уплотнения на фронте которых может значительно превышать это значение.

В настоящей работе при рассмотрении воздействия на цилиндр плоской УВ с большим уплотнением на фронте получены качественно новые данные о характере изменения давления в процессе установления течения. Обнаружено, что на нестационарной стадии давление на поверхности цилиндра может как превышать давление при установившемся обтекании, так и быть существенно ниже него. Впервые приводятся зависимости времени установления давления от положения точки на поверхности цилиндра. Анализ проводится по результатам численного моделирования для УВ с постоянными параметрами в течении за фронтом при  $M=3$ ,  $\gamma = 1.29$ , когда относительное уплотнение на фронте УВ  $\rho = 4.47$  и при  $M=5$ ,  $\gamma = 1.16$ , когда  $\rho = 9.10$ . В расчетах использовались модель невязкого нетеплопроводного газа и метод сквозного счета для решения системы уравнений Эйлера в двумерном случае. В методе [3,4] объединены наиболее перспективные направления в современной вычислительной газодинамике: TVD схемы повышенного порядка аппроксимации, неструктурированные сетки, адаптация сетки к неоднородностям в потоке, что позволило провести вычисления с высокой точностью.

На рис. 1 представлены распределения давления по поверхности цилиндра в фиксированные моменты времени  $P^*(\varphi)$  (рис.1, а, б) и изменения давления во времени в отдельных точках  $\bar{P}(t_R)$  (рис. 1, в, г), где  $P^*$  — давление, отнесенное к давлению нормального отражения фронта волны, а  $\bar{P}$  — к давлению, которое наблюдается в соответствующей точке на поверхности цилиндра при стационарном обтекании. Безразмерное время  $t_R = t \cdot V/R$ , где  $t$  — время, отсчитываемое от момента прихода фронта УВ в лобовую точку,  $V$  — скорость фронта УВ,  $R$  — радиус цилиндра. Кривая  $\bar{P}$  характеризует распределение давления по поверхности цилиндра

при установившемся обтекании. Отдельными точками  $G$  представлены распределения локальных максимумов давления  $P_m$ , возникающих при взаимодействии фронта УВ с поверхностью тела.

Из сопоставления рис. 1, *a* и *b* видно, что расположение эпюр  $P^*(\varphi)$  относительно стационарной кривой  $F$  существенно отличается для УВ умеренной (рис. 1, *a*) и большой интенсивности (рис. 1, *b*). В первом случае все эпюры ложатся выше кривой  $F$  и в процессе установления течения давление на поверхности цилиндра падает (рис. 1, *в*). Это качественно согласуется с результатами расчетов [1]. В случае же УВ большой интенсивности эпюры  $P^*(\varphi)$  имеют точку пересечения со стационарной кривой в окрестности  $\varphi \approx 45^\circ$ , левее которой они лежат выше, а правее — ниже кривой  $F$ . В соответствии с этим, при  $\varphi < 45^\circ$  в процессе установления давление на поверхности тела падает, а при  $\varphi > 45^\circ$ , начиная с некоторого момента времени, растет (рис. 1, *г*).

При формировании течения около кругового цилиндра в результате воздействия на него УВ можно выделить два процесса: взаимодействие фронта волны с поверхностью тела и обтекание тела потоком газа за фронтом УВ. Каждый из указанных процессов имеет свою зависимость от определяющих параметров задачи ( $M$ ,  $\gamma$ , геометрия тела). Кроме того, в случае сверхзвукового потока за фронтом УВ, область, где влияние процессов взаимодействия фронта с поверхностью тела существенно, оказывается локализованной в поле течения и сносится вслед за фронтом волны. Характер изменения давления при установлении течения будет определяться тем, насколько давление, которое реализуется в данной точке к моменту, когда она окажется вне вышеобозначенной области, меньше или больше давления при стационарном обтекании тела.

В домиделевой части имеет место отражение фронта УВ и на поверхности тела наблюдается локальный максимум давления  $P_{\max}$  (рис. 1, *a*, *b*, точки,  $G$ ). Если для УВ умеренной интенсивности значения  $P_{\max}$  всюду лежат выше стационарной кривой, то для УВ большой интенсивности, начиная с  $\varphi \approx 50^\circ$ , точки  $G$  ложатся ниже кривой  $F$  (подобная ситуация, когда значения  $P_{\max}$  оказывались меньше значения давления при стационарном обтекании, наблюдалась при отражении сильных УВ от тонких клиньев [1]). В соответствии с этим в процессе установления на поверхности тела давление либо падает (рис. 1, *в*, кривые 1, 2 и рис. 1, *г*, кривая 1), либо растет (рис. 1, *г*, кривая 3).

В замиделевой части имеет место дифракция фронта УВ. Структуры, возникающие в этом процессе, подробно описаны в работе [5], где установлено, что при дифракции возникает нестационарная волна разрежения, в которой формируется обращенный вторичный скачок (рис. 1, *a*, *b*, кривые 2). По мере движения области, где влияние процесса дифракции существенно, давление на поверхности тела падает от максимального значения за фронтом УВ —  $P_{\max}$  до минимального значения  $P_{\min}$ , которое достигается перед фронтом обращенного вторичного скачка. Как показывают расчеты, значения  $P_{\min}$  в зависимости от интенсивности УВ ложатся либо вблизи (рис. 1, *в*, кривая 4), либо существенно ниже стационарного уровня (рис. 1, *г*, кривые 4, 5). В результате

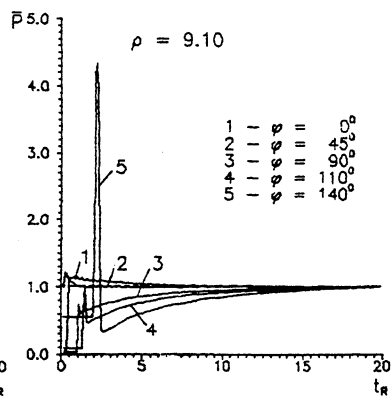
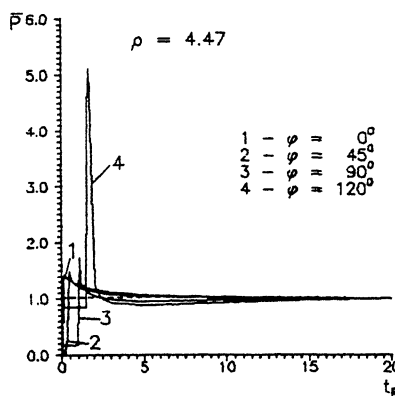
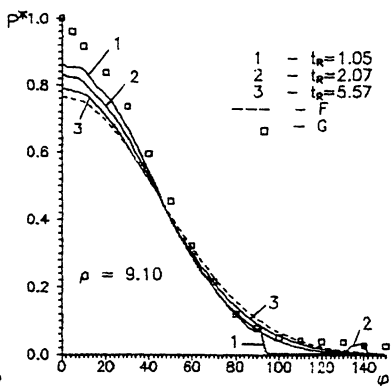
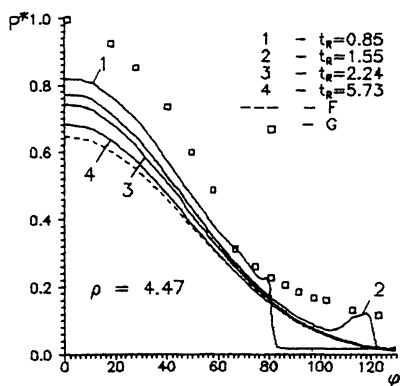


Рис. 1.

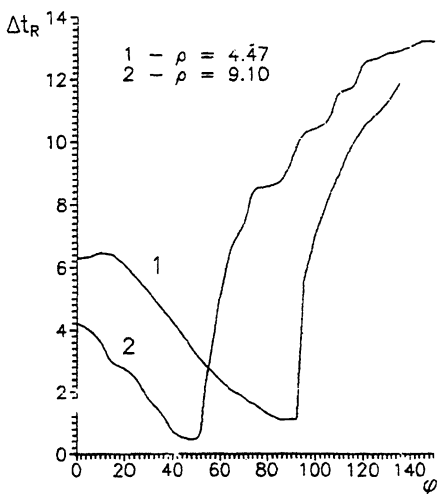


Рис. 2.

в дальнейшем в процессе установления давление на поверхности тела либо практически не меняется, либо растет.

Данные о закономерности изменения времени установления давления в различных точках на поверхности цилиндра представлены на рис. 2. Давление считалось установившимся, когда его значение отличалось от стационарного менее чем на 5%. Безразмерное время установления  $\Delta t_R$  отсчитывалось от момента прихода фронта УВ в данную точку.

Как видно из рис. 2, величина  $\Delta t_R$  зависит от интенсивности падающей УВ и от положения точки на поверхности тела. Зависимости  $\Delta t_R(\varphi)$  существенно немонотонны и имеют минимум, координата которого с увеличением интенсивности УВ смещается в сторону меньших значений  $\varphi$ . Наибольшее время установления  $\Delta t_R \approx 12-13$  наблюдается в замиделевой части тела. Как и в работе [2], в окрестности лобовой точки увеличение интенсивности УВ приводит к уменьшению величины  $\Delta t_R$ , но начиная с некоторого угла  $\varphi \approx 50^\circ$  зависимость между  $\Delta t_R$  и  $M$  становится обратной.

Проведенный анализ показывает, что характер изменения давления на поверхности цилиндра в процессе установления зависит от величины уплотнения на фронте падающей УВ и при стремлении к стационарному значению давление на поверхности тела может как падать, так и расти. Время установления давления, помимо зависимости от интенсивности УВ, имеет существенно немонотонную зависимость от положения точки на поверхности тела.

#### Список литературы

- [1] Ляхов В.Н., Подлубный В.В., Титаренко В.В. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 392 с.
- [2] Богословский К.Е. // Изв. АН СССР МЖГ. 1966. Вып. 3. С. 24-30.
- [3] Войнович П.А., Шаров Д.М. // Препринт ФТИ АН СССР № 1534. Л., 1991. 43 с.
- [4] Войнович П.А., Шаров Д.М. // Препринт ФТИ АН СССР № 1547. Л., 1991. 32 с.
- [5] Баженова Т.В., Геоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
8 июня 1993 г.