

1. Нисматуллин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. Ч. 1. — 464 с.
2. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с.
3. Губайдуллин Д. А., Никифоров А. А. Акустические возмущения в смеси жидкости с пузырьками пара и газа // Теплофизика высоких температур. — 2010. — Т. 48, №2. — С. 188–192.
4. Губайдуллин Д. А., Никифоров А. А., Гафиятов Р. Н. Акустические волны в двухфазных пузырьковых жидкостях с фазовыми превращениями // Теплофизика высоких температур. — 2012. — Т. 50, №2. — С. 269–273.
5. Губайдуллин Д. А., Федоров Ю. В. Звуковые волны в жидкостях с полидисперсными парогазовыми и газовыми пузырьками // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2015. — №1. — С. 67–77.

СВЕРХЗВУКОВАЯ АЭРОДИНАМИКА РЕШЕТКИ ЦИЛИНДРОВ*

С. В. Губернюк¹, Ф. А. Максимов^{1,2}

¹НИИМ МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия; ²ИАП РАН, Москва, Россия

Решетка цилиндров является простейшим примером проницаемого экрана, в общем случае представляющего собой некоторую систему большого количества мелкомасштабных твердых тел, распределенных в относительно тонком слое, протяженность которого много больше, чем масштаб структуры проницаемости [1, 2]. При теоретическом описании проницаемый экран вместе с прилегающими струйно-вихревыми дискретными структурами локального течения интерпретируется как поверхность сильного разрыва с условиями совместности на скачке, учитывающими общие законы сохранения, а также дополнительные замыкающие соотношения эмпирического характера [3]. Сверхзвуковое обтекание равномерной решетки цилиндров представляет интерес как модельная задача, на примере которой можно детально исследовать взаимосвязь внешнего крупномасштабного и локального пристеночного течений около проницаемого экрана методами прямого численного моделирования. Кроме того, эта задача является важным примером для изучения эффектов аэродинамической интерференции при совместном обтекании систем твердых тел [4, 5]. В работе приведены результаты численного моделирования двумерных ламинарных течений около регулярной системы одинаковых цилиндров расположенных в плоскости перпендикулярной вектору скорости набегающего сверхзвукового потока. Метод расчета описан в [5].

Результаты расчетов. Расчеты выполнены при числе Маха $M = 6$ и числе Рейнольдса $Re = 10^5$ (по параметрам набегающего потока и диаметру цилиндра). Варьировался безразмерный период решетки h равный расстоянию между центрами соседних цилиндров в долях их диаметра. Количество цилиндров $n = 10$. В зависимости от величины h реализуется две основных схемы течения, изображенные на рис. 1, а и б.

Схема «а» наблюдается в случае густой решетки при всех h меньших некоторого критического значения $h_1 \approx 2.5$. В этом случае перед решеткой имеется гладкий отошедший скачок уплотнения подобно как перед сплошным экраном, рис. 1, а. Течение между этим скачком и проницаемым экраном дозвуковое, а в локальном

зазоре между цилиндрами достигается звуковая скорость, т.е. реализуется так называемый режим заклинивания. Далее вниз по потоку за экраном (по мере перемешивания локальных струек и следов за локальными элементами строения решетки) формируется глобальная сверхзвуковая донная струя. Таким образом, при $h < h_1$ реализуется режим двойного заклинивания [3], наблюдавшийся в экспериментах [1]. Кривые 3 и 4 на рис. 1, в представляют изменение коэффициентов сопротивления C_x срединного и крайнего цилиндров решетки. По мере приближения h к критическому значению h_1 различия величин сопротивления разных элементов решетки стремятся к нулю. Кривая 2 на рис. 1 взята из [5] для случая обтекания пары цилиндров ($n = 2$).

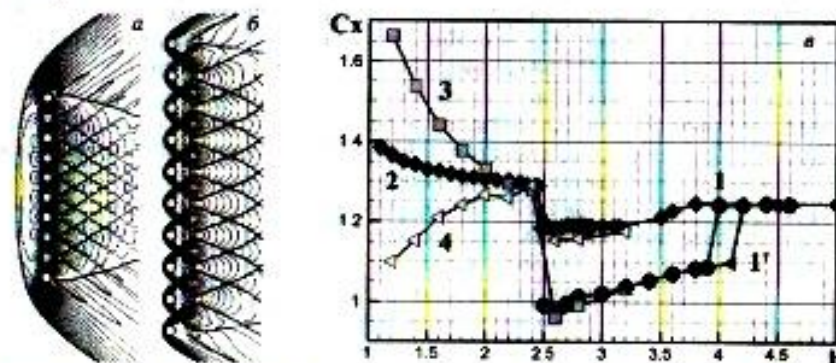


Рис. 1. Изолинии давления при $h = 2$ (а), $h = 3.2$ (б); коэффициент сопротивления (в)

Схема «б» возникает при переходе h через критическое значение h_1 . Происходит перестройка обтекания: фронт ударной волны перед решеткой теряет гладкость и трансформируется в систему локальных скачков непосредственно перед каждым цилиндром, рис. 1, б. При этом скачки уплотнения от соседних цилиндров получают возможность попадать в область ближнего следа, что вызывает скачкообразное падение C_x за счет увеличения донного давления в локальной отрывной области непосредственно за цилиндрами, рис. 1, в. Важно отметить, что обтекание решетки на режиме «б» теряет глобальный характер и для его изучения можно перейти к упрощенной постановке расчета, выделяя лишь один период в виде плоско-параллельного канала шириной h , с расположенным в середине одиночным цилиндром (на стенках канала ставятся условия периодичности течения). Для режима «а» такая постановка задачи была бы некорректна из-за заклинивания потока в зазоре между элементами решетки. Но при $h > h_1$ заклинивания нет и можно перейти к рассмотрению периодического течения за бесконечной решеткой, задавая на входе в канал периодичности сверхзвуковой поток. Линии 1 и 1' на рис. 1, в получены в расчете бесконечной решетки. Существует критическое значение $h = h_2 \approx 4.2$ такое, что при $h > h_2$ коэффициент сопротивления каждого цилиндра решетки перестает зависеть от периода и в точности равен коэффициенту сопротивления уединенного цилиндра. Это объясняется тем, что возмущения от соседних цилиндров сносятся далеко вниз по потоку, попадают в область сверхзвукового следа и, поэтому, не могут влиять на локальное обтекание цилиндра, рис. 2, б.

О гистерезисе обтекания редкой решетки. На графике $C_x = f(h)$ непосредственно перед отметкой $h = h_2$ наблюдается петля гистерезиса (линии 1 и 1' на рис. 1, в). Если «сжимать» решетку, т.е. в качестве начальных условий использовать решение, полученное при больших значениях h , то C_x изменяется по линии 1,

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-01-99623). Расчеты проводились на МВС-100К МСЦ РАН.

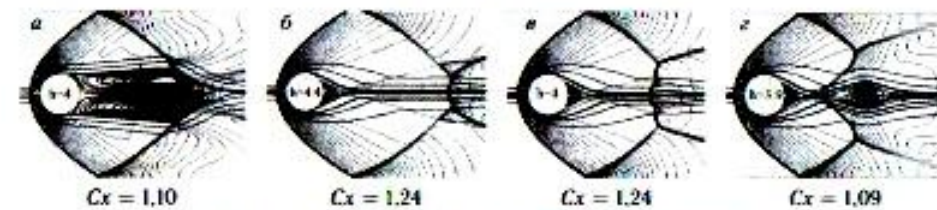


Рис. 2. Гистерезисные режимы обтекания решетки

если двигаться в обратном направлении, то C_x изменяется по линии I'. Этот эффект подтверждается реализованными в расчете существенно различными картинами течения для $h = 4$, рис. 2, а и в. При увеличении h («расширение» решетки) от значений, незначительно превышающих h_1 , ударные волны от соседних элементов решетки, взаимодействуя с областью возвратно-циркуляционного течения за цилиндром, приводят к ее разрастанию и поддержанию низкого сопротивления цилиндра (рис. 2, а). При достижении $h = h_2$ «большая» циркуляционная зона колеблется и в итоге разрушается, локализуясь в донной области непосредственно за цилиндром (при этом коэффициент сопротивления возрастает скачком, рис. 1, в). При обратном ходе по h картина течения при $h = 4$ оказывается иной, рис. 2, в. При дальнейшем «сжатии» решетки, в области взаимодействия скачков со следом образуется отрывной предвестник, который, постепенно разрастаясь, смыкается с циркуляционной областью за цилиндром (рис. 2, г), вызывая падение донного сопротивления.

1. Гувернюк С. В., Саяинов К. Г., Ульянов Г. С. Сверхзвуковое обтекание затупленных перфорированных экранов // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1985. — №1. — С. 143–149.
2. Гувернюк С. В. О гиперзвуковом обтекании тел с сетчатыми экранами // Газовая и волновая динамика. Вып. 4. — М.: Айрис-пресс, 2005. — С. 236–242.
3. Гувернюк С. Адиабата проникаемой поверхности // Аэромеханика и газовая динамика. — 2002. — №3. — С. 84–89.
4. Максимов Ф. А. Сверхзвуковое обтекание системы тел // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, №6. — С. 969–980.
5. Максимов Ф. А. Об аэродинамической интерференции при обтекании двух тел // Тр. 57-й НК МФТИ «Актуальн. пробл. фундамент. и прикл. наук в области физики». Управление и прикладная математика. Т. 2. — М.: МФТИ, 2014. — С. 32–34.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОГО ЭЖЕКТОРНОГО ВАКУУМ-НАСОСА

Ю. В. Гуменикова, О. Е. Лаврус, Р. Н. Черницына

СамГУПС, Самара, Россия

В настоящее время в промышленности широко используются различные устройства, работающие на использовании вихревого эффекта, возникающего в турбулентном потоке вязкого сжатого воздуха. К числу таких устройств относятся вихревые трубы с дополнительным потоком, самовакuumирующие трубы, вихревые делительные трубы и различные их модификации.

Способность вихревой трубы с диффузором создавать в присоединяемой об-