

## **СВЕРХЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ПРОНИЦАЕМЫХ ЭКРАНОВ**

С.В. Гувернюк

*НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

guv@mail.ru

**Аннотация.** Методами физического и численного моделирования исследованы механизмы, определяющие перестройку режимов сверхзвукового обтекания плоских проницаемых (перфорированных, сетчатых, решетчатых) экранов. Для классификации режимов взаимодействия применена теория обобщенной адиабаты проницаемой поверхности. Получен критерий перехода режимов при нормальном и наклонном взаимодействии, дано объяснение наблюдавшихся гистерезисных явлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам №№ 12-01-00985 и 15-01-99623.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Важной теоретической проблемой является изучение разрывов сплошной среды, моделирующих границы проницаемых тел, решетчатых конструкций, перфорированных экранов и т. п. объектов, часто встречающихся в технических приложениях. Взаимодействие со сплошной газовой средой материальной проницаемой границы дискретной структуры моделируется некоторой математической поверхностью разрыва параметров среды. Это дает упрощающую возможность абстрагироваться от рассмотрения сложных деталей внутреннего строения пористости материальной проницаемой поверхности и применить, так называемые, условия на скачке в виде зависимостей между параметрами среды по обе стороны от поверхности разрыва, в структуру которого включается материальная проницаемая стенка вместе с локальным слоем диссипативного пристеночного течения среды. Часть этих граничных условий получается непосредственно из общих интегральных законов сохранения/изменения энергии, массы и импульса среды в области скачка. Однако, как правило, одни эти соотношения еще не представляют замкнутую систему граничных условий, достаточную для разрешимости соответствующих краевых задач о движении сплошной среды с внутренней поверхностью разрыва, моделирующей наличие материальной проницаемой границы способной испытывать силовое воздействие. Принципиальное отличие проблемы замыкания системы граничных условий на рассматриваемом скачке от классической теории разрывов в сплошных средах состоит в том, что здесь неприменим метод получения «дополнительных» соотношений из рассмотрения «структуры разрыва», то есть построения «размазывающего» скачок непрерывного решения за счет перехода к усложненной модели сплошной среды в тонком переходном слое (поскольку материальная проницаемая граница все равно остается прежней). В нашем случае дополнительные соотношения, имеющие смысл законов просачивания среды, должны задаваться эвристически, исходя из результатов модельного физического эксперимента или численного моделирования при учете всех внутренних деталей перетекания вязкой среды через трехмерные отверстия перфорации или пористости.

Традиционно один из законов просачивания берется в виде некоторой алгебраической связи между удельным расходом среды через проницаемую поверхность и перепадом давления, представляющим скачок давления на поверхности разрыва. Такое соотношение в виде квадратичного закона типа Дарси «защито» практически во всех популярных лицензионных CFD-пакетах. Однако конкретизация вида дополнительных граничных соотношений – это еще не последний вопрос. Независимо от этого нужно определиться с количеством дополнительных соотношений, необходимых для постановки корректных краевых задач. В зависимости от состояния среды по обе стороны разрыва может потребоваться различное количество дополнительных граничных условий. Так же, как и в классической теории разрывов, число дополнительных соотношений всегда столько, сколько необходимо для эволюционности разрыва, понимаемой как однозначная разрешимость линеаризованной задачи о взаимодействии малых возмущений со скачком. При взаимодействии сверхзвуковых потоков с перфорированными границами одним из распространенных является режим «запирания», когда параметры газа на наветренной стороне проницаемой границы перестают зависеть от параметров на ее подветренной стороне. В этом случае любые законы «просачивания» среды, связывающие перепад давления или напряжение на проницаемой границе с параметрами набегающего потока, становятся непригодными в принципе.

### **ОБОБЩЕННАЯ АДИАБАТА ПРОНИЦАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Качественная теория адиабаты проницаемой поверхности [1] охватывает четыре основных режима взаимодействия E1-E4 (таблица на рис. 1). Соответствующее геометрическое отображение адиабаты в параметрической плоскости содержит 4 ветви различной размерности: точка (E2), кривые (E1, E3) и конечная область (E4), рис. 1. Для сравнения на этом же графике отображены адиабаты Пуассона и Гюгонио. Переход от одной ветви обобщенной адиабаты к другой управляется критериями «переключения режимов», имеющими смысл условий непрерывности силового воздействия на материальную проницаемую поверхность в моменты «поглощения» ударной волны пристеночной структурой проницаемой границы или наоборот, в

моменты выхода ударной волны за пределы этой структуры. На этой основе предсказаны и обнаружены экспериментально (рис. 2) режимы двойного запирания (E2) и режим свободного взаимодействия, отвечающий двумерной ветви ударной адиабаты E4, когда любое дополнительное граничное «условие просачивания» будет избыточно и сделает неразрешимой краевую задачу обтекания. Режим E4 получен для высокопроницаемого экрана за счет наличия подпора со стороны заднего тела, рис. 2,б. По мере смещения тела вниз по потоку наблюдался переход от режима E4 к E3. Приближение заднего тела вызывало обратную перестройку от режима E3 к E4, при этом отмечен гистерезис, связанный с особенностями взаимодействия скачка уплотнения перед задним телом с областью ближнего следа за экраном.

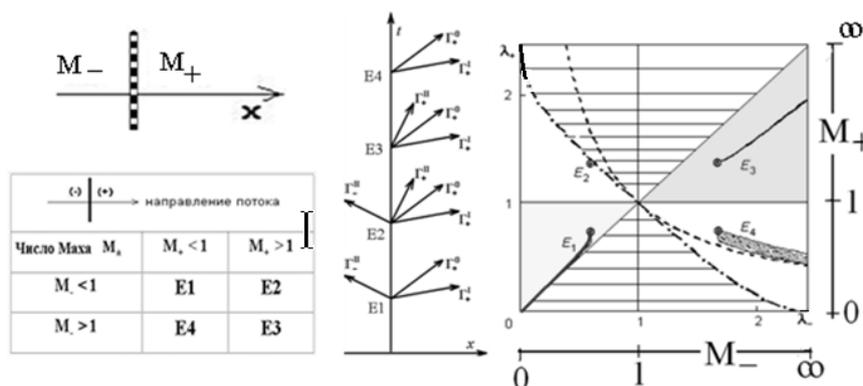


Рис. 1. Геометрическая интерпретация четырех ветвей адиабаты проницаемой поверхности E1-E4. Штрих-пунктирная кривая соответствует адиабате Пуассона, штрихи – ударной адиабате Гюгионо. Горизонтальной штриховкой обозначена нефизичная область убывания энтропии

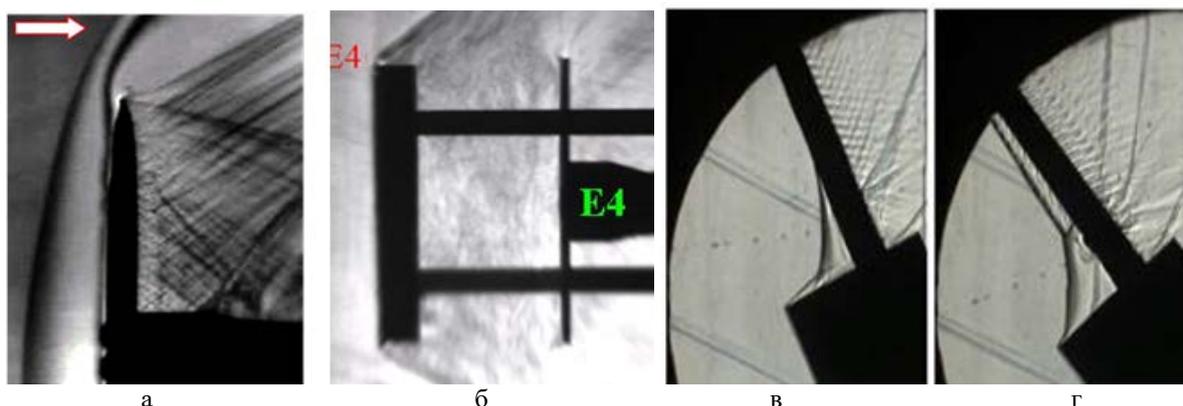


Рис. 2. Примеры экспериментальной реализации режимов E2 (а), E4 (б) при нормальном взаимодействии; а также примеры перехода от режима E3 (в) к режиму E2 (г) за счет изменения угла атаки экрана большой степени проницаемости

Находясь в сверхзвуковом потоке, плоский проницаемый (перфорированный, сетчатый, решетчатый и т. п.) экран может обтекаться либо с глобальным отошедшим скачком уплотнения, имеющим отход соизмеримый с поперечным масштабом экрана, либо с дискретной системой локальных скачков, локализованных в окрестности элементов структуры проницаемости экрана.

### НАКЛОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

При наклонном взаимодействии проницаемой границы с потоком газа следует различать типы перфорации 1-го и 2-го рода. Второй тип перфорации, характеризуется так называемым направляющим действием, когда реализуется фиксированный угол истечения среды по отношению к поверхности независимо от угла склона потока перед экраном. В наиболее распространенном случае ортогонального истечения это свойство удобно использовать при вычислении продольной нагрузки на перфорированную стенку, поскольку перетекающий через перфорацию газ должен полностью потерять свой первоначальный тангенциальный импульс (как, например, в случае решетчатых крыльев, рис. 2,в,г).

Предложено и обосновано полуэмпирическое граничное условие для режимов запирания газового потока при наклонном взаимодействии с перфорированным экраном, структура пористости которого обладает направляющим действием [2].

На рис. 3 показаны результаты численного эксперимента [3] по обтеканию решетки тонких пластин в сверхзвуковом потоке при изменении угла атаки. Взаимодействие скачков уплотнения от передних кромок

планов с пограничным слоем на стенках каналов решетки приводит к отрыву потока на подветренной стороне планов, вследствие чего в каналах решетки возникают отрывные структуры со скачками уплотнения перед ними. Эти структуры распространяются вверх по потоку по мере увеличения угла атаки, достигая передних кромок планов. Интерференция скачков приводит к существенной перестройке ударно-волновой структуры на входе в каналы, присоединенные скачки слабого семейства на наветренной стороне планов перерождаются в присоединенные скачки сильного семейства с дозвуковой областью за ними. В результате при некотором критическом угле атаки происходит заклинивание каналов и переход к режиму обтекания с отошедшей ударной волной перед решеткой.

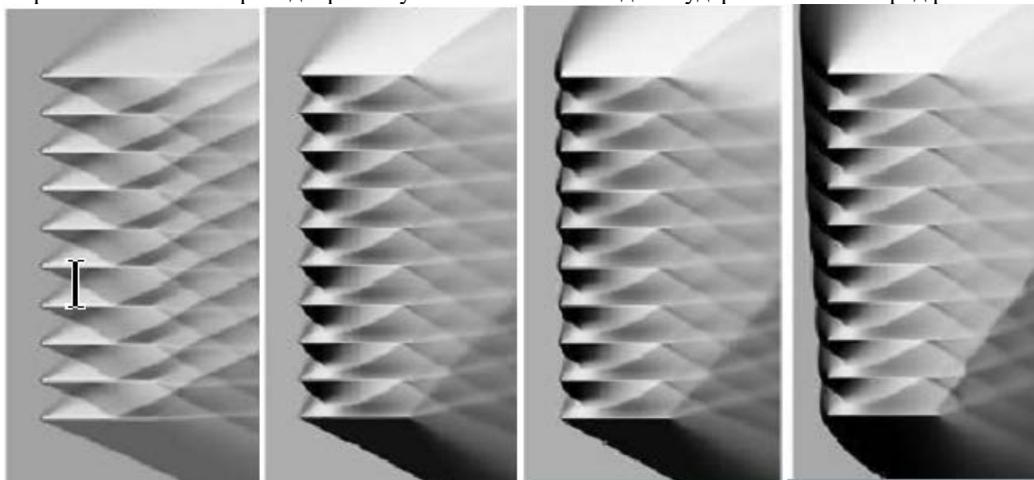


Рис. 3. Рассчитанные поля плотности при обтекании решетки пластин сверхзвуковым потоком ( $M = 2,5$ ) под углом атаки: а –  $10^\circ$ ; б –  $25^\circ$ ; в –  $27^\circ$ ; г –  $35^\circ$

При уменьшении угла атаки происходит обратная смена режимов обтекания. Угол заклинивания – возрастающая функция числа Маха набегающего потока, степени геометрической проницаемости и относительного шага решетки. На режиме заклинивания при увеличении угла атаки угол наклона отошедшей ударной волны по отношению к фронтальной плоскости решетки увеличивается. Результаты вычислений удовлетворительно согласуются с данными экспериментов.

Численное моделирование решетки цилиндрических тел выполнено также в [4].

При проведении физических экспериментов использовались аэродинамические установки НИИ механики МГУ: сверхзвуковая труба А-8 и трансзвуковая труба А-7 с перфорированными стенками. Расчеты выполнены с помощью пакета GDT (версия 5.94).

В работе принимали участие А.Ф. Зубков, М.М. Симоненко, А.А. Синявин.

#### Литература

1. Гувернюк С.В. Адиабата проницаемой поверхности // *Аэромеханика и газовая динамика*. 2002. № 3. С. 84-89.
2. Гувернюк С.В., Синявин А.А. Об условиях заклинивания на газопроницаемой поверхности перфорированных тел // *Космонавтика и ракетостроение*. 2009. № 1. С. 70-78.
3. Гувернюк С.В., Симоненко М.М., Синявин А.А. Особенности обтекания сверхзвуковым потоком решётчатых крыльев при больших углах атаки // *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 1. С. 55-62.
4. Максимов Ф.А. Сверхзвуковое обтекание системы тел // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2013. Т. 5 (6). С. 969-980.