

# НАТУРФИЛОСОФИЯ УДАРНЫХ ВОЛН (ПОДСКАЗКА УНИВЕРСИТЕТСКОМУ СТУДЕНТУ И ДОЦЕНТУ)

У Валентин Анатольевич Белоконов, Москва, Россия, 2016, У Valentine Belokogne, Russia, 2016  
член Национального Комитета по теоретич. и прикладной механике, академик Академии Космонавтики.

Педагогически значимые соображения о фундаментальных свойствах структуры фронта ударной волны и его аналитических моделях.  
The tutorial important considerations on the key properties of a shock front structure analytic models.

Ключевые слова: фронт ударной волны; сплошная среда; диссипация; молекулярный свободный пробег.  
Key words: shock front; continuum media; dissipation; molecular free path.

В звуковой волне термодинамическая эволюция среды непрерывно адиабатична, что для совершенного газа означает соблюдение "адиабаты Пуассона"  $p \sim \rho^\gamma$ , где  $\gamma = C_p/C_v$ . Звуковая волна может быть и волной разрежения, а удельная энтропия среды звуковой волной не меняется, т.е. звуковая эволюция среды обратима.

Во фронте (структуре) ударной волны, способной только на сжатие среды, адиабатичность соблюдается по иному - необратимо.

Для достаточно сильных ударных волн их фронт (структура) заключена в удивительно тесные пространственно-временные рамки.

Независимо от интенсивности ударной волны, в структуре ударного фронта происходит такая необратимая трансформация состояния среды, которая непременно подчиняется стандартным "соотношениям Рэнкина-Гюгонно", а значит рост удельной энтропии среды монотонно возрастает с амплитудой ударной волны. Внутри структуры ее фронта энтропия достигает максимума.

С кинетической точки зрения этим подразумевается почти неправдоподобная быстрота перестройки, скажем, доскачкового максвелловского распределения молекул газа в послескачковое. Из аналитической механики следует, что минимум такой перестройки - два средних свободных пробега молекулы.

Типичный пример: при неэкзотически сильной ударной волне скорость ее в воздухе (1 атм, 0° С) превышает скорость звука в три раза.

Если скорость ударной волны не столь существенно превышает скорость звука, то ширина ее фронта составляет немало средних длин свободного пробега молекул ( $\approx 100$ ) для  $M_{\text{shock}} = 1.02$ .

Троекратная скорость звука ударной волны, то есть  $\approx 1$  км/сек подразумевает ширину ее фронта порядка двух-трех средних свободных пробегов, то есть  $\approx 10^{-5}$  см  $O_2$  и  $N_2$ . Значит, время ударной релаксации составляет  $\approx 10^{-5} \text{ см} / 10^5 \text{ см/сек} \approx 10^{-10} \text{ сек} \approx 100$  пикосек.

Здесь педагогически преднамеренно подразумевался случай только трех трансляционных степеней свободы молекул, что скорее подходит для одноатомного аргона, нежели воздуха.

Поскольку среднее расстояние между молекулами воздуха в данном примере  $\approx 1/30$  среднего свободного пробега молекул, то в механике сплошной среды замена среды молекулярной на континуум в какой-то мере оправдывается: ширина структуры ударного фронта распространена на несколько десятков средних межмолекулярных расстояний на сильном скачке и на многие сотни - на слабом...

Появление достаточно убедительной кинетической теории структуры скачка все еще ожидается, а пока что гидродинамика и кинетика согласованы лишь на банальном уровне слабых отклонений от термодинамической равновесности.

Что касается принципиального понимания ударно-волновой адиабатичности, то здесь продуктивен феноменологический подход, с точки зрения которого континуум, втекающий в структуру ударного фронта, сначала воспринимает тепло, а при выходе из этой структуры отдает тепло вверх по потоку, так что  $q_{in} + q_{out} = \Delta q = 0$  - **тотальная адиабатичность** в отличие от **локальной адиабатичности** в волне звуковой.

Такая специфическая адиабатичность была открыта Вильямом Рэнкиным (1870), а затем изящно описана бароном Рэлеем (1910) с помощью так называемой "Прямой Рэлея", соединяющей на р-ν плоскости начальное состояние среды с ее состоянием после стационарного ударного фронта (см. рисунок):

$$dp/dv \approx \Delta p/\Delta v = -(\rho v)^2 = \text{const.}$$

Термодинамически существенно, что начальным участком прямой Рэлея описывается

приток тепла и соответствующей энтропии. Итоговый отрезок той же прямой описывает потери тепла и соответствующей энтропии. Таким образом, приток и отток тепла полностью скомпенсированы, но возрастание энтропии и ее падение не скомпенсированы - в пользу возрастания энтропии. При этом энтропия максимальна внутри стационарной структуры ударной волны не только в модели Рэнкина. Это отмечено Львом

Ландау в его лекции по гидродинамике.

Эта модель Вильяма Рэнкина в течение сорока лет была единственной строгой аналитической теорией структуры ударных волн. Его теория соответствовала доминированию теплопроводности, то есть безразмерному числу Прандтля  $Pr \ll 1$ . К 1910 году была создана следующая строгая аналитическая теория структуры ударных волн по Г. Тэйлору, которая соответствовала доминированию вязкой диссипации, когда Прямая Рэлея уже не работает, а число Прандтля  $Pr \gg 1$ . При этом энтропия сплошной среды монотонно возрастает локально адиабатически до значения, предусмотренного ударной адиабатой Рэнкина-Гюгонно. В такой структуре ударного фронта нет ни теплообмена, ни транспорта энтропии. Значит, отсутствует и ее максимум.

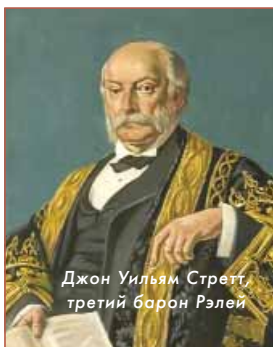
Однако, реальная среда - в том числе воздух - может соответствовать числу Прандтля порядка единицы. Теорию на такой случай более или менее внятно излагает в своем курсе теоретической физики Ландау.

Классические модели Рэнкина и Тэйлора являются примерами принципиальной нечувствительности соотношений Рэнкина-Гюгонно к конкретным разновидностям диссипации в структуре ударного фронта - вплоть до так называемой "бесстолкновительной ударной волны", рассматриваемой в работах школы Роальда Сагдеева.

Между тем, "окончательная" обобщенная формулировка интегральных соотношений на фронте ударной волны была открыта Пьером Гюгонно накануне своей гибели и опубликована в 1887-89 гг. В своей редуцированной теории он игнорирует конкретную диссипацию, то есть доказывает без использованием информации - **почему, что** возрастает: например плотность среды и энтропия на ударной волне.

В задачах астрофизического класса кроме молекул вещества начинают присутствовать фотоны вплоть до их доминирования. В таком диапазоне температур может случиться утечка энергии среды, называемая иногда "высвечиванием". Тогда соотношение Рэнкина-Гюгонно нарушится, а скачок может превратиться в изотермический.

**Послесловие:** смысл и жанр данной публикации: она является альтернативой соответствующему разделу первого издания университетского учебника "Механика сплошных сред" видного ученого и педагога академика Р.И. Нигматулина.



Связь с автором: [belok3@mail.ru](mailto:belok3@mail.ru)