

УДК 532.529 + 629

**УДАРНАЯ И ДЕТОНАЦИОННАЯ ВОЛНА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
ТЕОРИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ –
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СМЫСЛ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ
СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ****Булат П.В.***ООО «НОЦ «Динамика», Санкт-Петербург, e-mail: pavelbulat@mail.ru*

Прорыв в области космических и летательных аппаратов может быть достигнут в результате создания детонационных двигателей. Принцип работы таких двигателей основан на взаимодействии ударно-волновых структур. Правильное понимание сути этих процессов является основой для построения сложных конфигураций ударных и детонационных волн. В данной статье представлена историческая справка о разработке теории интерференции стационарных и нестационарных газодинамических разрывов научной школой В.Н. Ускова. Приведены ссылки на этапные работы, представляющие результаты изучения интерференции стационарных разрывов, бегущих одномерных волн, косых бегущих волн, тройных ударно-волновых конфигураций и, наконец, нестационарных тройных конфигураций. Показан геометрический смысл уравнений газовой динамики. Введено понятие ударной и детонационной волны как особенности отображения проектирования пространства газодинамических характеристик. Представленная теория дает методические основы проектирования камер сгорания реактивных двигателей с детонационным горением.

Ключевые слова: детонационный двигатель, ударная волна, детонационное горение, газодинамический разрыв**SHOCK AND DETONATION WAVE IN TERMS OF VIEW OF THE THEORY
OF INTERFERENCE GASDYNAMIC DISCONTINUITIES. PART I.
THE GEOMETRIC MEANING OF THE EQUATIONS
OF GAS DYNAMICS OF SUPERSONIC FLOWS****Bulat P.V.***SEC Dynamics ltd, St. Petersburg, e-mail: pavelbulat@mail.ru*

A breakthrough in the field of space and aircraft can be achieved by the establishment of the detonation engines. The principle of operation of such engines is based on the interaction of the shock-wave structures. Proper understanding of these processes is the basis for the construction of complex configurations of shock and detonation waves. This article presents the historical background to the development of the theory of the interference of stationary and non-stationary gas-dynamic discontinuities scientific school V.N. Uskov. Are links to the landmark works that present the results of studying the interference of stationary discontinuities running one-dimensional waves, oblique traveling waves, triple shock-wave configurations and, finally, the time-dependent triple configurations. Shows the geometrical meaning of the equations of gas dynamics. Introduced the concept of shock and detonation waves as the imaging features of gas-dynamic characteristics of the design space. The theory gives the methodological principles of design of the combustion chambers of jet engines with detonation combustion.

Keywords: engine detonation, shock wave, detonation combustion, gas-dynamic discontinuity

В последнее время активно ведется обсуждение различных способов организации детонационного горения в перспективных воздушно-реактивных и ракетных двигателях. Чтобы правильно понять суть этих проектов, важно ясно представлять, что такое стационарный и нестационарный газодинамический разрыв (ГДР), ударная волна, и чем они отличаются от волны детонационной, которая также является газодинамическим разрывом. Условимся для определенности считать, что детонационная волна – это ударная волна, возникшая вследствие химической реакции окисления. А просто ударная волна – это газодинамический разрыв, который образуется взаимодействием сверхзвукового потока с твердой стенкой, острой кромкой или в результате пересечения (интерференции) друг друга ГДР.

**Развитие теории интерференции
газодинамических разрывов**

В настоящее время (в последние 19 лет) создана теория и математический аппарат, достаточный для проектирования оптимальных ударно-волновых структур (УВС) в детонационной камере сгорания, работающей как в стационарном, так и в импульсном режимах. Научная группа под руководством В.Н. Ускова последовательно развила теорию экстремальных УВС. Сначала теория интерференции стационарных газодинамических разрывов была обобщена В.Н. Усковым и С.Л. Старых на случай разрывов второго порядка [4–6]. Ими была исследована зависимость неравномерностей течения за разрывом от кривизны разрыва и неравномерностей течения перед ним. Затем теория была дополнена в работах

В.Н. Ускова, А.В. Омельченко и М.В. Чернышева теорией интерференции одномерных бегущих волн и взаимодействия косых нестационарных волн [7, 9, 11]. Параллельно аспирантом В.Н. Ускова Тао Ганом была разработана теория оптимальных тройных конфигураций ударных волн сначала в равномерном потоке, а затем и в неравномерном [8]. И наконец, в работах В.Н. Ускова, М.В. Чернышева и П.С. Мостовых [10, 12] она была обобщена на случай тройных конфигураций ударных волн в нестационарном и неравномерном потоке газа. Автором настоящей работы была развита теория низкочастотных колебаний ударных волн на примере течения в канале с внезапным расширением [1–3].

Геометрический смысл уравнений газовой динамики сверхзвуковых течений

В основе каждого раздела физики лежит своя геометрия пространства параметров. Геометрия Минковского описывает пространство Специальной Теории Относительности, Риманова геометрия – Общей Теории Относительности, Симплектическая геометрия – классической механики и т.п. Для того, чтобы иметь возможность воспользоваться достижениями математиков в части классификации и структурной устойчивости ударно-волновых структур (УВС), необходимо дать определения газодинамическим понятиям в терминах симплектической геометрии. По современным представлениям газодинамические переменные образуют многомерное гиперпространство, а уравнения Эйлера, описывающие течения идеального газа, задают в нем гиперповерхность, кривизна которой определяется газодинамическими неравномерностями N_i (неизобаричность, кривизна линии тока и завихренность):

$$N_1 = \frac{\partial \ln P}{\partial s}; \quad N_2 = \frac{\partial \vartheta}{\partial s}; \quad N_3 = \zeta = \frac{\partial \ln P_0}{\partial n}.$$

В осесимметричном случае уравнения Эйлера, записанные с помощью неравномерностей, выглядят в естественной системе координат, связанной с линиями тока, следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{M^2 - 1}{\gamma M^2} N_1 + \frac{\partial \vartheta}{\partial n} + \frac{\sin \vartheta}{y} &= 0; \\ \gamma M^2 \frac{\partial \ln V}{\partial s} &= -N_1; \\ M^2 N_2 &= -\frac{\partial \ln P}{\partial n}. \end{aligned}$$

В уравнениях – n – длина нормали к линиям тока; s – длина дуги вдоль линии тока; P – давление; ϑ – угол наклона вектора скорости; P_0 – полное давление; ζ – завихренность. Первое выражение – уравнение неразрывности. Второе и третье – проекции уравнения движения на оси естественной системы координат, связанной с линиями тока. Как известно, сверхзвуковые течения могут содержать области, где параметры меняются резко, скачком. В рамках модели идеального газа в таких случаях говорят о существовании газодинамических разрывов (ГДР).

Обобщение понятия поверхности – многообразие. Многообразие представляет собой произвольное множество точек, представленное в виде объединения конечного числа областей евклидового пространства, в каждой из которых заданы локальные координаты.

Ударная и детонационная волна как особенность отображения проектирования многообразия газодинамических параметров

Рассмотрим для простоты одномерное уравнение движения идеального газа (уравнение Эйлера):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

Это уравнение описывает поле скоростей свободно движущихся по прямой частицы. Закон свободного движения частицы имеет вид:

$$x = \phi(t) = x_0 + vt,$$

где v – скорость частицы. Функция ϕ удовлетворяет уравнению Ньютона. По определению: $d\phi/dt = u(t, \phi)$. Продифференцировав последнее соотношение по t , получаем уравнение:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

Таким образом, описание движения при помощи уравнения Эйлера для поля и при помощи уравнения Ньютона для частиц эквивалентны. Известно, что квазилинейные дифференциальные уравнения в частных производных решаются с помощью построения характеристик. Каждому многообразию соответствует свое характеристическое поле. Характеристики – фазовые кривые характеристического поля. Уравнение характеристик уравнения Эйлера эквивалентно уравнению Ньютона. Таким образом, задачу о распространении волны можно решить путем построения характеристик, вдоль

которых движутся материальные частицы. На рис. 1, 2 показано, как решается уравнение Эйлера с помощью характеристик.

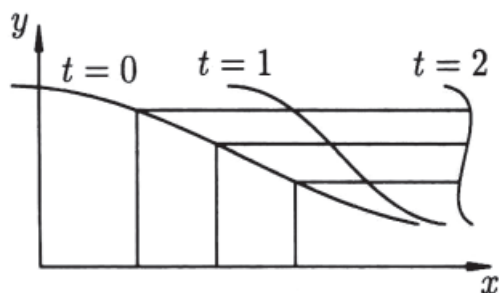


Рис. 1. Решение уравнения Эйлера с помощью характеристик

На плоскости $y-x$ задана начальная функция $y = u_0(x)_{t=0}$. Уравнения характеристик $t' = 1, y' = 0, x' = y$. В моменты времени $t = 1, t = 2$ и т.д. решение строится путем переноса вдоль характеристик значений

в начальный момент времени. Интегральная поверхность неоднозначно проектируется на плоскость $x-t$ (рис. 2). Отображение $y(x)$ перестает быть графиком функции, т.е. имеются значения x , которым соответствует несколько значений y . Кривая критических значений проектирования (касательная к поверхности вертикальна) имеет точку возврата (рис. 3).



Рис. 2. Интегральная поверхность перестает быть графиком функции $y(x)$

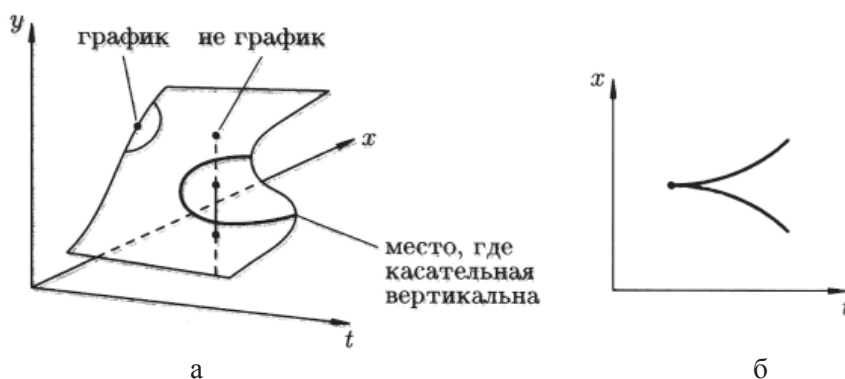


Рис. 3. ГДР – особенность отображения проектирования многообразия параметров

Нарушение единственности решения можно трактовать как свободное прохождение потоков частиц друг сквозь друга. С другой стороны, при большой плотности частиц их взаимодействием нельзя пренебречь. В этом случае, уравнение Эйлера заменяют уравнением Бюргерса, которое учитывает взаимодействие частиц газа внутри ударной волны:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

При малых ε оно приближает уравнение Эйлера в областях плавного изменения параметров. Справа и слева от ударной волны течение описывается уравнениями Эйлера, внутри ударной волны (газодинамического разрыва) – уравнением, подобным уравнению теплопроводности.

Таким образом, ударная волна или газодинамический разрыв (ГДР) – это особен-

ность отображения проектирования многообразия газодинамических параметров (рис. 3), их взаимодействие образует ударно-волновые структуры (УВС).

В рассматриваемом одномерном случае ударная волна может быть сформирована движущимся по трубе поршнем. Если скорость поршня выше некоторой критической величины, то распространяющиеся от его поверхности волны сжатия догоняют друг друга, и единственность решений нарушается. Возникает разрыв значений. До волны давление и другие параметры остаются такими же, как в невозмущенной среде, а сразу за разрывом давление скачком увеличивается. Ударная волна может возникнуть и в результате химической реакции горения, в этом случае ее называют детонационной. Предположим, что в предварительно подготовленной топливной смеси каким-то образом (искрой, теплопередачей, сжатием) создали условия для возбуждения реакции окисле-

ния (горения). Топливная смесь в определенных условиях может детонировать.

При детонации (быстром горении) воспламенение, реагирующее смеси, происходит в результате сжатия в лидирующей Ударной Волне (УВ), которая предшествует зоне химических реакций. Ударная волна распространяется со сверхзвуковой скоростью. Простейшей моделью детонационного горения является модель Зельдовича – Неймана (рис. 4).

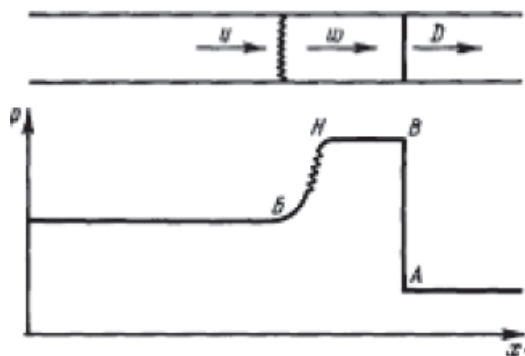


Рис. 4. Модель детонации Зельдовича – Неймана:

D – детонационная волна; ω – зона индукции; u – продукты сгорания;

$A-B$ – газодинамический разрыв;

$H-B$ – зона образования свободных радикалов;

$H-B$ – волна разрежения, в которой происходят химические реакции окисления

Заключение

Представление о сверхзвуковых течениях в терминах симплектической геометрии дает в руки исследователя важный инструмент, обладающий общностью анализа, как скачков уплотнения, так и ударных и детонационных волн. Это позволяет конструировать сложные конфигурации ударных и детонационных волн в соответствии с некоторым выбранным критерием оптимальности.

Список литературы

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Колебания донного давления // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – С. 204–207.
2. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О классификации режимов течения в канале с внезапным расширением // Теплофизика и Аэромеханика. – 2012. – № 2. – С. 209–222.
3. Булат П.В., Продан Н.В. О Низкочастотных расходных колебаниях Донного давления. – 2013. – № 4 (3). – С. 545–549.
4. Булат П.В., Усков В.Н., Продан Н.В. История изучения нерегулярного отражения скачка уплотнения от оси симметрии сверхзвуковой струи с образованием диска Маха // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9. – С. 414–420.
5. Булат П.В., Усков В.Н., Продан Н.В. Обоснование применения модели стационарной маховской конфигурации к расчету диска Маха в сверхзвуковой струе // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11. Ч. 1. – С. 168–175.
6. Булат П.В., Усков В.Н. О задаче проектирования идеального диффузора для сжатия сверхзвукового потока // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6. Ч. 1. – С. 178–184.
7. Омельченко А.В., Усков В.Н. Интерференция нестационарных косых ударных волн. Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28. – Вып. 12.

8. Тао Ган, Усков В.Н. Оптимальные трехскачковые конфигурации // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: тез. докл. XVIII Междунар. семинара. Санкт-Петербург, 21–23 июня 2000 г. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т «Военмех», 2000. – С. 76.

9. Усков В.Н., Чернышев М.В. Сопряжение волны Прандтля – Маiera с областью квазидвимерного течения // Математическое моделирование. – 2003. – Т. 15. № 6. – С. 111–119.

10. Усков В.Н., Чернышев М. В. Особые и экстремальные тройные конфигурации скачков уплотнения // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. – № 4. – С. 39–53. – Библиогр.: С. 52–53 (16 назв.). – ISSN 0869-5032.

11. Усков В.Н. Бегущие одномерные волны. – СПб.: Изд-во БГТУ, – 2000.

12. Uskov V.N., Mostovyykh P.S. Triple-shock-wave configurations: comparison of different thermodynamic models for diatomic gases // Proceedings 28th International Symposium on Shock Waves (ISSW 28, Manchester, July 17–22, 2011), Paper. No 2597, pp. 1–7.

References

1. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Kolebanija donnogo davlenija. Fundamentalnye issledovanija, 2012, no. 3, pp. 204–207.
2. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Uskov V.N. O klassifikacii rezhimov techenija v kanale s vnezapnym rasshireniem. Teplofizika i Aeromehanika, 2012, no. 2, pp. 209–222.
3. Bulat P.V., Prodan N.V. O Nizkochastotnyh Raschodnyh Kolebanijah Donnogo Davlenija, 2013, no. 4 (3), pp. 545–549.
4. Bulat P.V., Uskov V.N., Prodan N.V. Istorija Izuchenija Nereguljarnogo Otrazhenija Skachka Uplotnenija Ot Osi Simmetrii Sverhzvukovoi Strui S Obrazovaniem Diska Maha. Fundamental'nye issledovanija, 2012, no. 9, pp. 414–420.
5. Bulat P.V., Uskov V.N., Prodan N.V. Obosnovanie Primenenija Modeli Stacionarnoj Mahovskoj Konfiguracii K Raschetu Diska Maha V Sverhzvukovoj Strue. Fundamental'nye issledovanija, 2012, no. 11, ch. 1, pp. 168–175.
6. Bulat P.V., Uskov V.N. O Zadache Proektirovanija Ideal'nogo Diffuzora Dlja Szhatiya Sverhzvukovogo Potoka. Fundamental'nye issledovanija, 2012, no. 6, ch. 1, pp. 178–184.
7. Omel'chenko A.V., Uskov V.N. Interferencija nestacionarnykh kosykh udarnykh voln. Pisma v ZhTF, 2002, vol. 28, pp. 12.
8. Tao Gan, Uskov V.N. Optimalnye trehskachkovye konfiguracii. Tehenija gaza i plazmy v soplah, strujah i sledah: Tez. dokl. XVIII Mezhdunar. seminar, Sankt-Peterburg, 21–23 ijunja 2000 g. SPb., Balt. gos. tehn. un-t «Voennemh», 2000, pp. 76.
9. Uskov V.N., Chernyshev M.V. Sopryazhenie Volny Prandtlja-Maiera S Oblastju Kvaziodnomernogo Tehenija. Matematicheskoe Modelirovanie, 2003, vol. 15, no. 6, pp. 111–119.
10. Uskov V.N., Chernyshev M.V. Osobyie i jekstremalnye trojnye konfiguracii skachkov uplotnenija. Prikladnaja mehanika i tehniceskaja fizika, 2006, vol. 47, no. 4, pp. 39–53. Bibliogr., pp. 52–53 (16 nazv.). ISSN 0869-5032.
11. Uskov V.N. Begushhie odnomernye volny. SPb., Izd-vo BGTU, 2000.
12. Uskov V.N., Mostovyykh P.S. Triple-shock-wave configurations: comparison of different thermodynamic models for diatomic gases. Proceedings 28th International Symposium on Shock Waves (ISSW 28, Manchester, July 17–22, 2011). Paper, no. 2597, pp. 1–7.

Рецензенты:

Пеленко В.В., д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе Института Холода и Биотехнологий, ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург;

Цветков О.Б., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы тепло- и хладотехники» Института Холода и Биотехнологий, ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 17.10.2013.