

УДК 532.529 + 629

УДАРНАЯ И ДЕТОНАЦИОННАЯ ВОЛНА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАЗРЫВОВ – ЗАДАЧА КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

Булат П.В.*ООО НОЦ «Динамика», Санкт-Петербург, e-mail: pavelbulat@mail.ru*

Рассмотрены ударная и детонационная волна с точки зрения теории интерференции газодинамических разрывов. Рассмотрены основные принципы и понятия детонационного горения, проанализированы режимы медленного и детонационного горения. В статье кратко описана классификация газодинамических разрывов. Сформулированы условия динамической совместности для волновых структур, состоящих из ударных и детонационных волн. Поставлена задача и определена цель конструирования оптимальной УВС для организации детонационного горения. Предложена методика решения задачи конструирования устойчивой экстремальной УВС при помощи теории особенностей гладких отображений. Описанная теория предоставляет методические основы проектирования камер сгорания реактивных двигателей с детонационным горением. В статье приведен обзор литературы, относящейся к созданию теории интерференции газодинамических разрывов, описана история формирования математического аппарата для проектирования оптимальных УВС.

Ключевые слова: детонационный двигатель, ударная волна, детонационное горение, газодинамический разрыв

SHOCK AND DETONATION WAVE IN TERMS OF VIEW OF THE THEORY OF INTERFERENCE GAS DYNAMIC DISCONTINUITIES – THE TASK OF DESIGNING THE OPTIMAL CONFIGURATION OF SHOCK AND DETONATION WAVES

Bulat P.V.*SEC Dynamics ltd, St. Petersburg, e-mail: pavelbulat@mail.ru*

The shock and detonation wave were examined from the point of view of the theory of interference of gas-dynamic discontinuities. The main concepts and principle of detonation combustion were examined, the slow-burning and detonation combustion were analyzed. The article briefly describes the classification of gas-dynamic discontinuities. The conditions of dynamic compatibility for wave structures consisting of shock and detonation waves. The problem of constructing an optimal shock-wave structures (SWS) for the organization of detonation combustion was defined. A method for solving the problem of designing a sustainable extreme SWS using theory of singularities of smooth mappings, was proposed. The theory described provides a methodological framework design of the combustion chambers of jet engines with detonation combustion. This article provides an overview of literature related to the theory of interference gas-dynamic discontinuities, describes the history of the formation of mathematical tools for the design of optimal SWS.

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

Детонационное горение – основные понятия и термины

Дозвуковые режимы горения объединяются общим термином «дефлаграция». Зона реакции при послыном (медленном) горении сосредоточена в тонком слое – фронте пламени. Пламенем принято называть область горения, испускающую видимый свет. Механизм распространения послыного горения – тепловой или диффузионно-тепловой. Воспламенение свежих слоев вещества происходит за счет их прогрева теплом, поступающим из зоны химической реакции, и за счет диффузии химически активных частиц. Скорость фронта пламени относительно исходного вещества всегда дозвуковая.

В газовых смесях фронт нормального горения (ламинарное пламя, рис. 1) распространяется со скоростями от десятков сантиметров до десятка метров в секунду.

При турбулизации газового потока скорость горения и эффективная толщина его фронта возрастают за счет конвективного переноса пламени местными пульсационными течениями. Такое горение называют турбулентным (рис. 1, справа).

Начальная стадия развития экзотермической реакции в некотором объеме вещества, завершающаяся резким ростом температуры за счет тепловыделения и появления пламени, носит название воспламенения. Различают самовоспламенение, возникающее за счет самопроизвольных внутренних процессов при определенных начальных термодинамических параметрах системы и граничных условиях, и вынужденное воспламенение (зажигание), производимое с помощью постороннего источника, например, нагретого тела, электрической искры, лазера или путем подвода горячих продуктов сгорания.

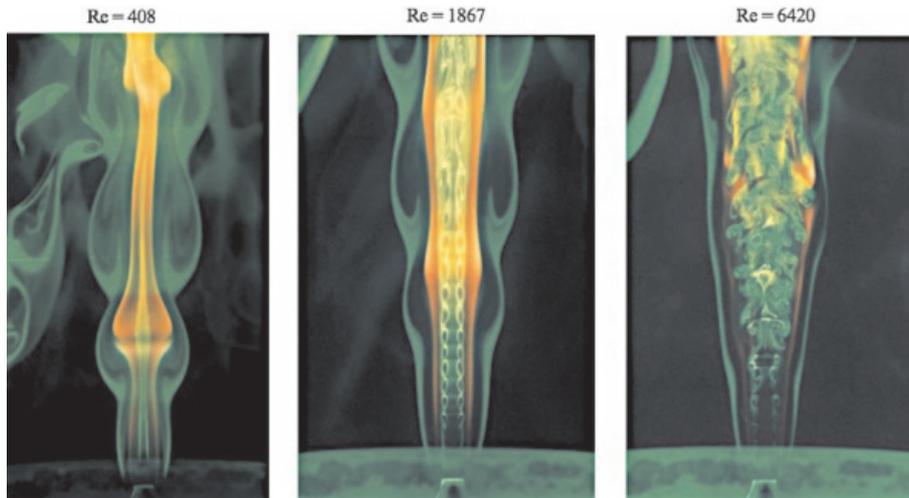


Рис. 1. Ламинарное, переходное и турбулентное горение

Законы динамической совместности на ударной волне и детонационной волне

Газодинамические разрывы (ГДР) бывают нулевого порядка Φ_0 (центр волны разрежения/сжатия, скачок уплотнения, ударная волна, детонационная волна и поверхность скольжения), на которых терпят разрыв газодинамические параметры течения (P , v , ϑ) и первого порядка, называемые также слабыми разрывами (разрывные характеристики, слабые тангенциальные разрывы) Φ_1 , на которых терпят разрыв первые производные газодинамических переменных. Можно определить особенности (разрывы) Φ_i пространства газодинамических переменных любого порядка.

Условия динамической совместности (УДС) на ГДР Φ_0 , связывающие параметры течения до разрыва и за ним, выводятся из законов сохранения потока вещества, потока энергии, компонент потока импульса, записанных перед разрывом и за ним. В качестве параметра в этих соотношениях выступает интенсивность разрыва J (чаще всего она определяется как отношение давления за разрывом к давлению перед ним).

Дифференциальные условия динамической совместности (ДУДС) Φ_0 связывают неравномерности течения перед скачком и за ним

$$N_i = c_i \sum_{j=1}^5 A_{ij} N_j.$$

Коэффициенты A_{ij} , c_i опубликованы в работе В.Н. Ускова [1]. В целях общности в уравнения добавлены $N_4 = \delta/\gamma$ ($\delta = 0$ в плоском течении) и $N_5 = K_\sigma^4$ (кривизна скачка уплотнения). УВС удобно изучать на плоскости ударных поляр $\ln J - \beta$, прозванных за характерный вид (рис. 2) сердцевид-

ными кривыми (β – угол разворота потока на скачке).

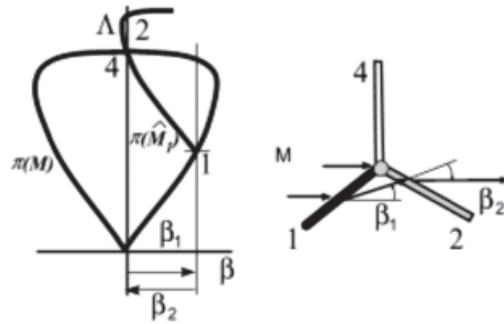


Рис. 2. Сердцевидная кривая и тройная конфигурация ударных волн

Анализ режимов медленного и детонационного горения по аналогии со скачками и ударными волнами удобно производить на плоскости адиабат (рис. 3) с помощью кривой Гюгоньо (КГ), связывающей давление и удельный объем при различных режимах горения в предположении, что протяженность фронта горения (дефлаграции или детонации) мала и может быть заменена бесконечно тонким экзотермическим скачком.

Ударная адиабата связывает параметры идеального газа до ударной волны и за ней. Исходное состояние вещества до ударной волны и зоны горения характеризуются параметрами P_0, V_0 . Прямая, проведенная через точку P_0, V_0 и какую-либо точку на КГ, называется прямой Михельсона или прямой Рэлея. На КГ имеются две точки касания с прямыми Михельсона, по одной на каждой ветви, причем верхней точке соответствует минимальная скорость распространения волны для верхней ветви, нижней точке касания – максимальная скорость волны для нижней.

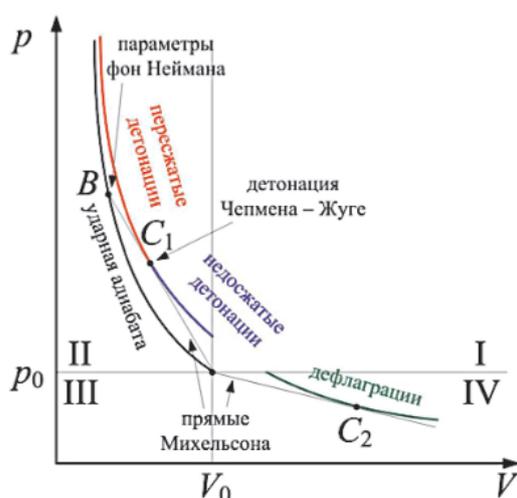


Рис. 3. Ударная адиабата (черная) и кривая Гюгио (разноцветная)

Скорость волны для всех точек верхней ветви КГ сверхзвуковая, а для нижней ветви – дозвуковая. Таким образом, детонационным волнам соответствует только верхняя ветвь КГ. Ее называют детонационной адиабатой. Нижняя ветвь (на рис. 3 – зеленая) отвечает волнам горения, иначе, дефлаграции.

В точках касания скорость продуктов превращения относительно скачка равна местной скорости звука. Установившаяся детонация, соответствующая точке касания прямой Михельсона к детонационной адиабате, называется детонацией Чепмена-Жуге. Детонации, отвечающие участку КГ выше точки Чепмена-Жуге (на рис. 3 – красный), называют пересажатыми, так как плотность продуктов детонации за их фронтом выше, чем в точке ЧЖ. На участке КГ ниже точки Чепмена-Жуге (на рис. 3 – синий) детонации соответственно называют недосажатыми. Чепмен и Жуге предполагали, что реальные самоподдерживающиеся детонации отвечают именно точке касания. Но известны также различные виды устойчивой пересажатой детонации.

Из сказанного выше следуют два вывода:

– «оставленная в покое» детонационная волна стремится к детонации Чепмена-Жуге, т.е. реализовать более высокие параметры продуктов сгорания за фронтом детонационной волны возможно только в устойчивой пересажатой детонации;

– целью конструирования оптимальной УВС для организации детонационного горения с возможно более высокими параметрами является отыскание множества пересечения областей существования устойчивых экстремальных ТК УВС и устойчивых пересажатых детонаций.

О задаче конструирования устойчивой экстремальной УВС

УДС и ДУДС позволяют составить полный перечень возможных конфигураций взаимодействующих ГДР, а также исследовать область их существования, но они ничего не могут сказать о структурной устойчивости и возможных перестройках УВС при изменении параметра (J). Эта задача решается с помощью теории особенностей гладких отображений. Проектируя оптимальную УВС (в смысле достижения максимума некоторого функционала), мы ставим задачу, например, добиться максимального повышения статического давления за УВС при минимальных потерях полного давления. При этом УВС должна быть структурно устойчива к малым возмущениям.

Структурная устойчивость и возможные перестройки УВС стали предметом исследований в 80-е и 90-е годы. Допустимые перестройки УВС обусловлены выпуклостью ограничения на пространство импульсов функции Гамильтона уравнений типа уравнения Бюргерса [6]. Большой вклад в создание полной классификации возможных перестроек УВС внесли Богаевский [7], Гурбатов и Саичев [9] (1983 г.). Ими выявлено, что, начиная с размерности 2, пространства газовой динамики с четной и нечетной размерностью описываются разными типами геометрий, симплектической и контактной. Таким образом, классификация устойчивых УВС распадается на нетождественные подмножества в зависимости от размерности пространства.

Критической точкой гладкой функции называется точка, в которой дифференциал функции равен 0. Критическая точка называется невырожденной, если второй дифференциал – невырожденная квадратичная форма. Всякая вырожденная критическая точка при малом «шевелении» (Лемма Морса [4]) распадается на несколько невырожденных.

Закон Морса – функции общего положения (структурно устойчивые) имеют лишь невырожденные критические точки. Вырожденные критические точки появляются естественным образом только в тех случаях, когда функция зависит от параметра [12].

Итак, при исследовании УВС на структурную устойчивость, необходимо на плоскости поляра выявить вырожденные критические точки [5], а при исследовании возможных перестроек УВС при изменении параметра (интенсивности скачка) – дважды вырожденные точки. Соответствующие им УВС и их перестройки на практике реализоваться не должны.

Заключение

Таким образом, зная начальное положение УВС и направление ее изменения, можно точно предсказать, как она будет трансформироваться, будет ли течение газа за ней стационарным, нестационарным или колебательным. Используя этот математический аппарат, российские математики нашли все возможные последовательности перестроек ударных волн вплоть до трехмерного случая включительно. Видимо, первыми нашли подтверждение данной теории в ходе вычислительных экспериментов корейские ученые [13]. Они вычисляли трансформацию плоской волны детонации, распространяющейся по круглой трубе. В вычислениях задавались симметричные малые возмущения в начальный момент времени. Картина в точности повторяет схемы перестройки волновых фронтов, приведенные в работе В.И. Арнольда [3]. Таким образом, была создана теория и математический аппарат, достаточный для проектирования оптимальных УВС в детонационной камере сгорания, работающей как в стационарном, так и в импульсном режиме.

С помощью описанного математического аппарата автор решил задачу об отыскании диска Маха в сверхзвуковой струе, а также о колебательном движении тройных конфигураций ударных волн при взаимодействии с перпендикулярной преградой.

Список литературы

1. Арнольд В.И. Лекции об уравнениях с частными производными. – М.: ФАЗИС, 1997. – 180 с.
2. Арнольд В.И., Варченко А.Н., Гусейн-Заде С.М. Особенности дифференцируемых отображений. Том 1. Классификация критических точек, каустик и волновых фронтов. М.: Наука, 1982, 304 с., Том 2. Монодромия и асимптотики интегралов. – М.: Наука, 1984. – 334 с.
3. Арнольд В.И. Особенности каустик и волновых фронтов. – М.: ФАЗИС, 1996. – 334 с.
4. Богаевский И.А. Особенности распространения коротких волн на плоскости // *Мат. Сб.* – 1995. – № 186 (11). – С. 35–52.
5. Богаевский И.А. Перестройки особенностей функций минимума и бифуркации ударных волн уравнений Бюргерса с исчезающей вязкостью // *Алгебра и анализ.* – 1989. – № 1(4). – С. 1–16.
6. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Формирование струи при плавном запуске сопла Лавала // *Газодинамика и теплообмен.* Вып. 10. Течения газов в каналах и струях. – СПб.: Изд-во СПУ, 1993. – С. 1–22.
7. Гурбатов С.Н., Саичев А.И., Якушин И.Г. Нелинейные волны и одномерная турбулентность в средах без дисперсии // *Успехи физ. наук.* – 1983. – № 141 (2). – С. 221–255.
8. Усков В.Н. и др. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. – Новосибирск: ВО «Наука», 1995. – 180 с.
9. Усков В.Н., Булат П.В., Продан Н.В. История изучения нерегулярного отражения скачка уплотнения от оси симметрии сверхзвуковой струи с образованием диска Маха // *Фундаментальные исследования.* – 2012. – № 9 (часть 2). – С. 414–420;
10. Усков В.Н., Булат П.В. О задаче проектирования идеального диффузора для сжатия сверхзвукового потока // *Фундаментальные исследования.* – 2012. – № 6 (часть 1). – С. 178–184.

11. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбоходолительных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы // *Вестник МАХ.* – 2012. – № 1. – С. 57–60.

12. Arnold V.I. Wave front evolution and equivariant Morse lemma. *Comm. – Pure Appl. Math.* – 1976. – № 29(6). – P. 557–582.

13. Deok-Rae Cho, Su-Hee Won, Jae-Ryul Shin, Jeong-Yeol Choi. Numerical study of three-dimensional detonation wave dynamics in a circular tube. – *Proceedings of the Combustion Institute.* – 2013. – Vol. 34, Issue 2. – P. 1929–1937.

References

1. Arnol'd V.I. *Lekcii ob uravnenijah s chastnymi proizvodnymi.* M.: FAZIS, 1997, 180 p.
2. Arnol'd V.I., Varchenko A.N., Gusejn-Zade S.M. *Osobnosti differenciruemyh otobrazhenij. Tom 1. Klassifikacija kriticheskikh toček, kaustikovolnovykh frontov.* M.: Nauka, 1982, 304 s., Tom 2. *Monodromijai asimptotiki integralov.* M.: Nauka, 1984, 334 p.
3. Arnol'd V.I. *Osobnosti kaustiki volnovykh frontov.* M.: FAZIS, 1996, 334 p.
4. Bogaevskij I.A. *Osobnosti rasprostraneniya korotkikh voln na ploskosti.* *Mat. Sb.* 1995, 186 (11), 35–52 p.
5. Bogaevskij I.A. *Perestrojki osobnostej funkcij minimuma i bifurkaciiudarnykh voln uravnenij Bjurgersa s ischezajushhh evjazkost'ju.* *Algebra i analiz,* 1989, 1(4), p.1-16.
6. Bulat P.V., Zasukhin O.N., Uskov V.N. *Formirovanie strui pri plynom zapuske sopla Lavalja* // *Gazodinamika i teploobmen.* Vol. 10. *Techeniya gazov v kanalah i strujah.* SPb.: Izd-vo SPU, 1993. pp. 1–22.
7. Gurbatov S.N., Saichev A.I., Yakushin I.G. *Nelinejnye volny i odnomernaja turbulentnost' v sredah bezdispersii.* *Usp. ehifiz. Nauk.,* 1983, 141 (2), pp. 221–255.
8. Uskov V.N. i dr. *Interferencija stacionarnykh gazodinamicheskikh razryvov.* Novosibirsk: VO «Nauka», 1995. 180 p.
9. Uskov V.N., Bulat P.V., Prodan N.V. *Istorija izuchenija nereguljatornogo otrazhenija skachka uplotnenija ot osi simmetriisverh zvukov ojstrui s obrazovaniem diska Maha.* // *Fundamental'nye issledovanija.* 2012. no. 9 (chast' 2). pp. 414–420.
10. Uskov V.N., Bulat P.V. *O zadache proektirovanija ideal'nogo diffuzora dlja szhatijasverh zvukovogopotoka* // *Fundamental'nye issledovanija.* 2012. no. 6 (chast' 1). pp.178–184.
11. Uskov V.N., Bulat P.V. *Obissledovanii kolebatel'nogo dvizhenija gazovogo podvesa rotora turbohodolil'nyh i detandernykh mashin. Chast'II. Kolebanija davlenija v soplah pitajushhej sistemy nasverh kriticheskom rezhimeraboty* // *Vestnik MAN.* 2012. no. 1. pp. 57–60.
12. Arnold V.I. Wave front evolution and equivariant Morse lemma. *Comm. Pure Appl. Math.,* 1976, 29(6), 557–582.
13. Deok-Rae Cho, Su-Hee Won, Jae-Ryul Shin, Jeong-Yeol Choi. Numerical study of three-dimensional detonation wave dynamics in a circular tube. *Proceedings of the Combustion Institute.* Volume 34, Issue 2, 2013, pp. 1929–1937.

Рецензент:

Усков В.Н., д.т.н., профессор Балтийского государственного технического университета «Военмех», г. Санкт-Петербург;

Емельянов В.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника» Балтийского государственного технического университета «Военмех», г. Санкт-Петербург;

Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, профессор Университета Kwangwoon University, Korea. Работа поступила в редакцию 05.12.2013.