

Ударно-волновые процессы и ударно-волновые структуры

Павел Викторович Булат,

Владимир Николаевич Усков,

Университет ИТМО

Аннотация. Рассмотрена история появления задач, связанных с взаимодействием (интерференцией) разрывов. Вводится понятие ударно-волновой структуры. Рассматривается классификация разрывов в ударно-волновой структуре, вводится понятие приходящих и исходящих разрывов. Описан подход к решению задач об интерференции разрывов при помощи обобщенной ударно-волновой структуры и метода распада произвольного разрыва. Показана связь с задачей о распаде произвольного газодинамического разрыва. Приведена обобщенная формула интерференции разрывов, описывающая любые виды ударно-волновых структур. Рассмотрена кратко история изучения маховского отражения ударной волны от стенки как исторически первой задачи, в которой рассматривались ударно-волновые структуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: УДАРНАЯ ВОЛНА, ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАЗРЫВ, УДАРНО-ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА.

1. Ударно-волновые процессы и структуры - история вопроса

Цель - показать на примере основных этапных научных работ, как происходило становление понятия ударно-волновых структур и ударно-волновых процессов.

Ударно-волновыми процессами (УВП) называются процессы преобразования газодинамической системы, имеющей параметры f , в систему с параметрами $\hat{f}$.

$$f \rightarrow \hat{f} \tag{1}$$

Здесь f и $\hat{f}$ – множества газодинамических переменных до и после УВП. Эти множества включают кинематические, термодинамические и теплофизические переменные, характеризующие параметры потока газа:

- кинематические (u – скорость, w – ускорение),
- термодинамические (p – давление, ρ – плотность, T – температура),
- f_0 – соответствующие параметры торможения,
- а также изменение энтропии $\Delta S = C_v \ln \vartheta / \vartheta'$, где $\vartheta = p / \rho^\gamma$ – инвариант Лапласа-Пуассона [1],
- изменение h и h_0 – энтальпии,
- а также теплофизических параметров (теплоемкости c_p и c_v , $\gamma = c_p / c_v$ – показатель адиабаты, вязкости и пр.), которые могут изменяться в ходе УВП.

В настоящее время, согласно В.Н.Ускову, принято разделять УВП на *изоэнтропические волны* и *ударные волны* – волны, приводящие к росту энтропии ($\Delta S' > 0$): $\Delta S = C_v \ln \hat{v} / v$ где $v \equiv p / \rho^\gamma$ – инвариант Лапласа-Пуассона до волны, а $\hat{v}$ – за ней.

Изоэнтропические волны – звуковые (акустические) поля, а также простые волны Римана ($\bar{R}$) в нестационарных движениях газа и волны Прандтля-Майера ($\bar{\omega}$) в сверхзвуковых стационарных плоских потоках. Принято разделять волны разрежения $\bar{R}_r$ и $\bar{\omega}_r$ в которых отношение статических давлений $J_r \equiv \hat{p} / p < 1$ и волны уплотнения (сжатия) $\bar{R}_c$, $\bar{\omega}_c$ и $\bar{D}$, в которых $J_c > 1$.

Ударные волны ($\bar{D}$) относятся к **газодинамическим разрывам** (ГДР), они могут зарождаться внутри исходного потока с известными параметрами f до УВП, либо вноситься в поток извне. Моделью ударных волн ($\bar{D}$) является поверхность математического разрыва первого рода, при переходе через которую газодинамические переменные терпят разрыв $[f] = \hat{f} - f \neq 0$. Частным случаем $\bar{D}$ – волн (ударных волн) являются стоячие ($\bar{D}_0$) в сверхзвуковом исходном потоке (число Маха $M = u/a > 1$ a – скорость звука) ударные волны, когда скорость волны $D = 0$. Такие стоячие волны часто называют **скачками уплотнения** ($\bar{\sigma}$).

Иногда стационарные разрывы $\bar{D}_0$ или скачки уплотнения $\bar{\sigma}$ считают синонимами ударных волн. Это неправильно, поскольку ударные волны движутся по среде, а скачки уплотнения неподвижны в сверхзвуковом потоке. В $\bar{D}$ -волнах изменяется полное теплосодержание потока h_0 , а при прохождении потока через поверхность скачка $\bar{\sigma}$ величина h_0 сохраняет свое значение ($H_0 = h_{01} / h_0 = 1$). Такое же замечание справедливо в отношении бегущих волн Римана и стационарных волн Прандтля-Майера в сверхзвуковых течениях.

Газодинамические разрывы представляют собой некоторую идеализацию области с резким изменением параметров f , заменяя её поверхностями, на которых газодинамические переменные изменяются скачком. Реальная ширина ударной волны, как показал Прандтль [2], соизмерима с длиной (λ) свободного пробега молекул и может быть довольно большой в разреженных газах. В плотных средах она незначительна и модель математического разрыва нулевой протяженности вполне адекватна. Критерием разреженности газа служит число Кнудсена $K_n = \lambda / L$, где λ — средняя длина свободного пробега молекул в газе, L — характерный размер течения (например, длина обтекаемого тела, диаметр трубопровода, диаметр свободной струи).

Отличие волн от разрывов заключается в том, что волны имеют конечную ширину и занимают область изменения газодинамических переменных от значений f до $\hat{f}$, заключенную между **передним** и **задним фронтами** волны.

Интенсивность УВП характеризуется отношением статических давлений $J = p_1 / p$ после (p_1) и до (p) УВП. Значения $J_c > 1$ характеризуют уплотнение потока в волнах, а величины $J_r < 1$ — его расширение (разряжение).

Нормальные волны - волны, через которые протекает газ.

Тангенциальные $\bar{\tau}$ и контактные $\bar{K}$ (энтропийные волны) разрывы не пересекаются линиями тока. Через τ и $\bar{K}$ газ не перетекает, эти разрывы разделяют движущиеся потоки газов с различными термодинамическими переменными, за исключением статических давлений. Таким образом, на тангенциальных и контактных разрывах не могут осуществляться УВП. В

тангенциальном разрыве вектор скорости коллинеарен плоскости разрыва, а в контактном ортогонален. Тем не менее, существуют различные формы определения интенсивности контактного и тангенциального разрыва.

В ударно-волновых процессах могут участвовать не только одиночные волны и разрывы, но и их системы и ударно-волновые структуры (УВС).

Под **ударно-волновыми системами** (структурами) понимаются совокупности нескольких волн и разрывов, через которые последовательно проходят линии тока или траектории частиц в установившихся или нестационарных течениях.

Типичным примером являются системы скачков уплотнения (рис.1) в сверхзвуковых воздухозаборниках самолетов [3].

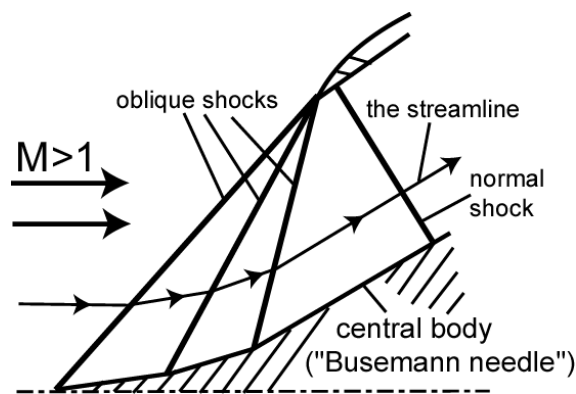


Рис.1. Оптимальная УВС в воздухозаборнике.

Ударно-волновые структуры возникают в результате взаимодействия (пересечения, интерференции) волн или разрывов между собой, с тангенциальными, контактными, свободными или твердыми поверхностями. Различают образование УВС в результате взаимодействия догоняющих или встречных разрывов, распада или ветвления разрывов.

По отношению к точке, в которой образуется УВС, газодинамические разрывы делятся на **приходящие** (R_a) и **исходящие** (R_p). **Причиной** образования ударно-волновых структур являются приходящие в одну точку волны и разрывы. Исходящие волны (разрывы) представляют собой **следствие** взаимодействия приходящих волн (разрывов). У приходящих разрывов проекция вектора скорости на плоскость разрыва направлена к точке интерференции, а у исходящих - от нее (Рисунок 2).

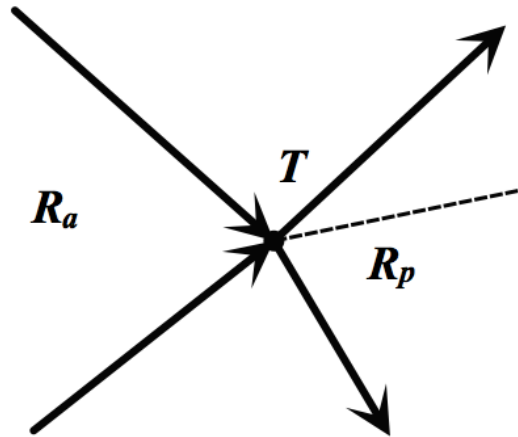


Рисунок 2 - Приходящие R_a и исходящие R_p разрывы.

Первые ударно-волновые структуры были описаны Э.Махом [4;1878]. Он экспериментально зафиксировал бегущие ударные волны и возникающие из них УВС. В своей работе он описал два вида отражения ударной волны от наклонной поверхности (Рисунок 3):

- **регулярное отражение**, которое состоит из двух ударных волн: падающей волны, приходящей на твердую поверхность, и отраженной, исходящей из точки падения;
- **нерегулярное отражение**, которое состоит из трех ударных волн — падающей, отраженной и главной — имеющих общую точку; такой вид отражения носит название простого Маховского, а соответствующая конфигурация, если она не содержит других нормальных разрывов, — **тройной конфигурации** (ТК) ударных волн.

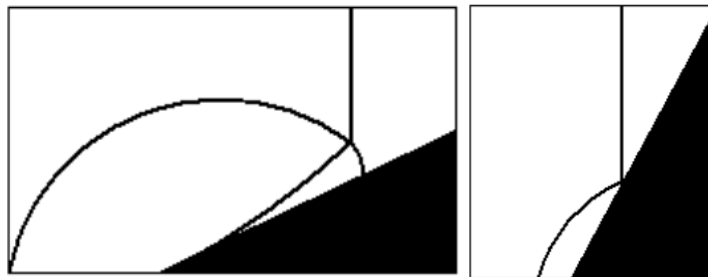


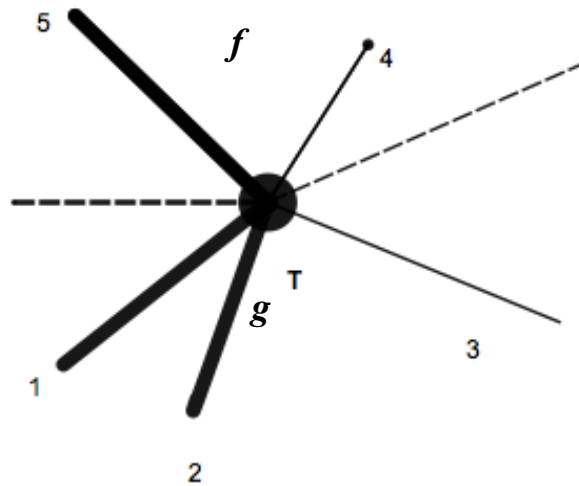
Рисунок 3 - Нерегулярное маховское (слева) и регулярное отражение ударной волны от наклонной стенки в опытах Э.Маха (1878 г).

Выполненный Э.Махом эксперимент заключался в следующем: в двух точках, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, одновременно

проскакивали две искры, порождавшие две сферические ударные волны. Под этими точками помещалась поверхность, покрытая сажей. Ударные волны оставляли отчетливый след точек их пересечения, начинающийся посередине между точками инициализации волн. Далее отрезок на концах разделялся на две симметрично расходящиеся линии. Полученная картина соответствует тому, что на ранней стадии взаимодействия ударные волны отражаются друг от друга так, как будто происходит отражение в регулярном режиме от воображаемой плоскости (Рисунок 3 справа), расположенной посередине между точками инициализации волн. Затем образуется скачок Маха (Рисунок 3 слева). Поскольку на покрытой сажей поверхности оставались лишь траектории точек пересечения волн, Э.Маху потребовалось хорошее пространственное воображение, чтобы реконструировать по этим следам общую картину ударно-волнового взаимодействия. Опыты Э.Маха интересны еще и тем, что положили начало изучению ударно-волновых структур. Долгое время изучение УВС сводилось исключительно к рассмотрению маховского отражения ударной волны от клина.

Теоретическое исследование регулярного отражения и тройной конфигурации ударных волн было впервые выполнено фон Нейманом в 1943 году [5; 1943]. В описании ТК фон Нейман предположил, что из тройной точки исходит тангенциальный разрыв (поверхность скольжения τ), разделяющий потоки за отраженной σ_2 и за главной σ_c ударными волнами.

Существуют разные подходы к исследованию ударно-волновых структур и решению задачи об интерференции ГДР. В.Н.Усковым в 1979 г. был предложен подход на основе *обобщенной УВС* [6]. Обобщенная УВС составлена из всех возможных типов разрывов и волн: трех приходящих (1,2,5 на Рисунок 4), одного главного исходящего (4 на Рисунок 4), одного тангенциального и одного отраженного разрывов (3 на Рисунок 4). Последний, может быть как скачком уплотнения, так и волной разрежения. Данная классификация является неполной, т.к. не включает простые волны. Пропущен и центр центрированной волны сжатия, который также является разрывом.



1-2 приходящие скачки уплотнения одного направления, 3 - отраженный разрыв (скачок или волна), 4 - главный исходящий разрыв, 5 - приходящий встречный скачок уплотнения. - - - тангенциальные разрывы.

Рисунок 4 - Обобщенная ударно-волновая структура.

2. Расчет ударно-волновых структур

Задача о расчете любой ударно-волновой структуры сводится к определению характеристик исходящих разрывов по известным параметрам течения в областях f и g перед ними. Если в конкретной задаче нулевого порядка отсутствуют некоторые из приходящих разрывов ($\vec{\sigma}_1$, $\vec{\sigma}_2$, или $\vec{\sigma}_5$), то интенсивность такого разрыва следует считать равной нулю.

Расчет взаимодействия произвольных сверхзвуковых потоков f и g , с заданными газодинамическими функциями Φ_i строится на основе выполнения условий динамической совместности на тангенциальном разрыве $\hat{\tau}$, разделяющем исходящие разрывы (УДС- $\hat{\tau}$):

$$\hat{P}_f = \hat{P}_g, \quad \hat{\theta}_f = \hat{\theta}_g \quad (1)$$

Произвольный разрыв, характеризующий различие газодинамических функций в областях f и g , можно определить двумя параметрами.

$$J_0 = P_g / P_f, \quad \beta_0 = \theta_g - \theta_f \quad (2)$$

которые являются известными или заданными величинами. Очевидно, УДС- $\hat{\tau}$ (24) выполняются, если

$$J_g = J_0 / J_f, \quad \beta_g = \beta_f - \beta_0, \quad (3)$$

где β_g и β_f - углы поворота потока на исходящих разрывах. Разности $[\Phi_i^\circ] = \Phi_{if}^\circ - \Phi_{ig}^\circ$ характеризуют различие параметров в областях f и g .

Если $[\Phi_i^\circ] \neq 0$, то возникает газодинамический разрыв нулевого порядка и решение любой из задач об интерференции разрывов сводится к задаче о распаде произвольного стационарного разрыва.

Разрыв нулевого порядка может быть изображен в виде вектора, отложенного из начала координат в точку с координатами $\{\Lambda = \ln J; \beta\}$. Это позволяет первое из уравнений (28) записать как сумму $\Lambda_0 = \Lambda_g + \Lambda_f$, а решение обобщенного уравнения интерференции представить в виде векторов $\bar{r}_f = \bar{r}_0 + \bar{r}_g$ (Рисунок 5).

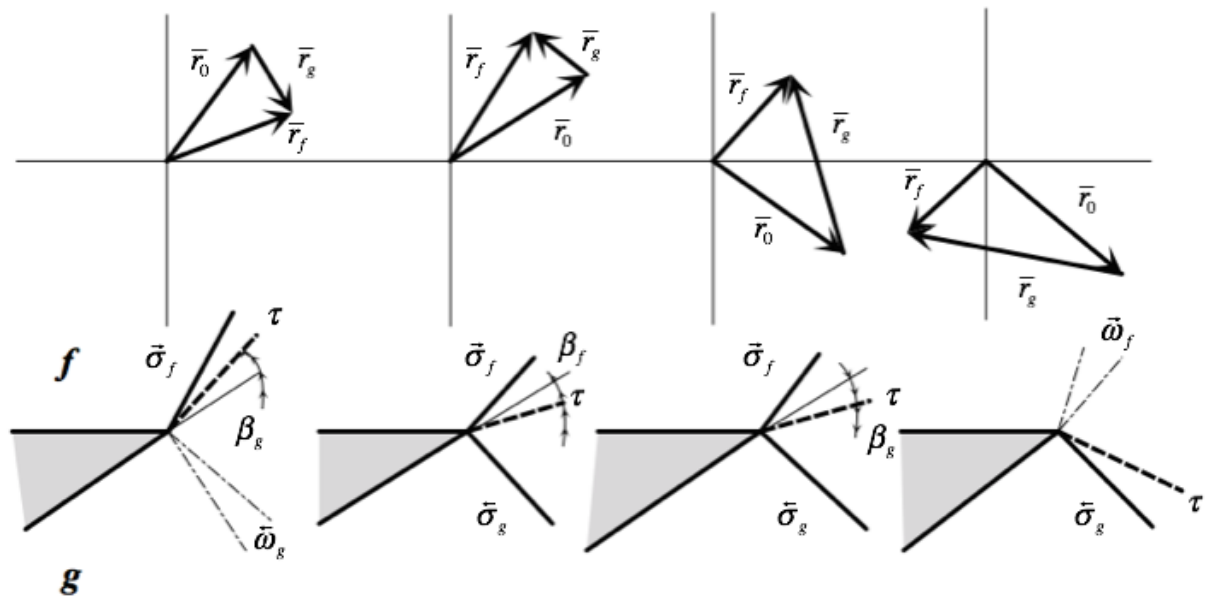


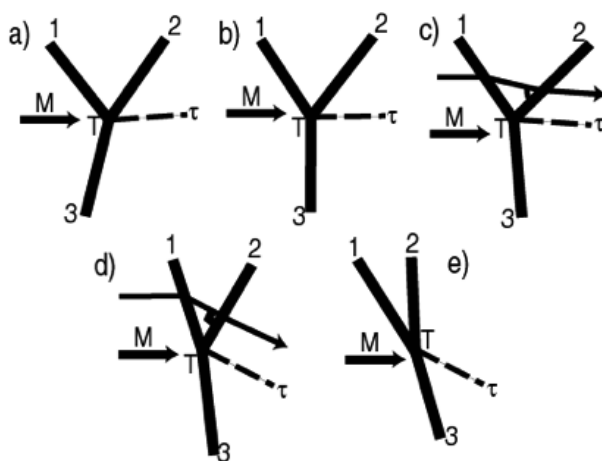
Рисунок 5 - Схемы распада произвольного стационарного разрыва.

Задача о распаде произвольного разрыва играет важную роль в современной газовой динамике, позволяет выполнять классификацию УВС и решать конкретные задачи, например, при анализе течения в окрестности кромки сопла [7; 1987], [8; 1999] и во многих других практически важных случаях.

Изложенный выше подход позволил В.Н.Ускову с помощью схемы обобщенной УВС и метода анализа распада произвольного разрыва последовательно решить задачи:

- регулярного отражения скачка и ударной волны от стенки;
- интерференции встречных и догоняющих скачков;
- рефракции скачка уплотнения на тангенциальном разрыве;
- рефракции одномерной ударной волны на контактном разрыве;
- нерегулярного отражения скачка от стенки, оси и плоскости симметрии.

Кроме того, с использованием общего уравнения интерференции и обобщенной УВС, схем распада произвольного разрыва, приведенных на Рисунок 4 [9], им была решена задача о расчете параметров тройных конфигураций стационарных скачков уплотнения [10; 1976], введено разделение ТК на конфигурации трех основных типов: ТК-1, ТК-2, ТК-3 [11]; и двух переходных (см. Рисунок 6).



a) ТК-1, b) ТК-1/2, c) ТК-2, d) ТК-2/3, e) ТК-3.

Рисунок 6 - Тройные конфигурации ударных волн.

В результате исследования общего уравнения интерференции были определены области существования ТК различных типов [12], а также УВС, содержащих догоняющие скачки уплотнения одного направления [13; 1987].

И наконец, в 1990 г. совместно с А.Л.Старых было выполнено комплексное исследование областей существования различных решений общего уравнения интерференции ГДР [14; 1990], а методика расчета параметров тройных конфигураций была доведена до пакета прикладных программ [15; 1988].

Задача о расчете любой ударно-волновой структуры сводится к определению характеристик исходящих разрывов по известным параметрам течения в областях f и g перед ними (рис.4).

Формула интерференции в общем виде может быть записана как

$$\sum R_a(k) \rightarrow \sum R_p(k). \quad (4)$$

Если в конкретной задаче нулевого порядка отсутствуют некоторые из приходящих разрывов ($\vec{\sigma}_1$, $\vec{\sigma}_2$, или $\vec{\sigma}_5$), то интенсивность такого разрыва следует считать равной нулю. Например, взаимодействие догоняющих скачков уплотнения (разрывов одного направления) можно представить в виде

$$\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2 \rightarrow \vec{r}_3 + \hat{\tau} + \vec{\sigma}_4. \quad (5)$$

Тангенциальный разрыв разделяет два потока, прошедших через разрывы 1 и 2 (догоняющие приходящие скачки уплотнения) и отраженный 3.

Для встречных скачков уплотнения имеем

$$\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_5 \rightarrow \vec{\sigma}_3 + \hat{\tau} + \vec{\sigma}_4. \quad (6)$$

Учитывая направление движения взаимодействующих волн (спутные ($\vec{W}$) и встречные ($\vec{W}$) по отношению к исходному потоку), получаем два класса задач об их взаимодействии: приходящие волны одного ($\vec{W} + \vec{W}$ или $\vec{W} + \vec{W}$) или различных ($\vec{W} + \vec{W}$) направлений. Как при интерференции, так и при рефракции волн встречаются оба класса задач. Очевидно, что волны разных направлений пересекаются всегда, а возможность взаимодействия волн одного направления нуждается в дополнительном анализе.

3. Классификация газодинамических разрывов (процессов)

Порядок газодинамического разрыва (ГДР). ГДР в сверхзвуковых течениях бывают нулевого порядка Φ_0 : центр волны разрежения/сжатия, скачок уплотнения и поверхность скольжения, на которых терпят разрыв газодинамические параметры течения (давление P , полное давление P_0 , скорость u , угол наклона вектора скорости ϑ) и первого порядка, называемые также слабыми разрывами (разрывные характеристики, слабые тангенциальные разрывы) Φ_i , на которых терпят разрыв первые производные газодинамических переменных. Можно определить особенности (разрывы) Φ_i пространства газодинамических переменных любого порядка.

Классификация по термодинамическому принципу. Важным термодинамическим отличием простых волн и разрывов является поведение энтропии в потоках, проходящих через них. Основным параметром таких волн является отношение статических давлений (интенсивность разрыва) $J = \hat{p}/p$ за волной и до волны. Отношение плотностей $E = \hat{\rho}/\rho$ связывается с интенсивностью волны через изоэнтропу (инвариант) Лапласа-Пуассона ($\vartheta = const$), то есть

$$\vartheta / \vartheta = JE' = 1 \quad (7)$$

или через ударную адиабату Ренкина-Гюгонио

$$E = \frac{1 + \varepsilon J}{J + \varepsilon}. \quad (8)$$

Первый случай определяет изоэнтропические акустически (звуковые), волны типа Римана ($\bar{R}$) или Прандтля-Майера ($\bar{\omega}$). Второй - ударные неизоэнтропические волны ($\bar{D}$).

Волны разрежения и уплотнения (сжатия). Волны делятся на волны разрежения ($J \leq 1$) и уплотнения ($J > 1$). К последним относятся изоэнтропические волны сжатия ($\bar{\omega}_c$ и $\bar{R}_c$) и ударные ($\bar{D}$) волны.

Волны сильные и слабые. Если значения интенсивности $J \neq 1$, то волна называется сильной. В вырожденной волне ($J = 1$) сами газодинамические переменные не изменяются, но на таком слабом разрыве могут изменяться производные этих переменных. Слабыми разрывами (разрывными характеристиками) являются передние и задние фронты изоэнтропических волн и вырождающиеся в них сильные разрывы ($J \rightarrow 1$). На слабых разрывах могут изменяться не только первые производные (f'), но и производные более высокого порядка. Все возможные типы волн и разрывов сведены в таблицу ниже.

Табюлица 1 - Классификация волн и разрывов

	$\Delta S = 0$			$\Delta S \neq 0$		
	$J < 1$	$J = 1$	$J > 1$	$J < 1$	$J = 1$	$J > 1$
$\Delta h_0 = 0$	$\bar{\omega}_r$	ν	$\bar{\omega}_c$	-	-	$\bar{\sigma}$
$\Delta h_0 \neq 0$	$\bar{R}_r$	-	$\bar{R}_c$	-	$\bar{\tau}, \bar{K}$	$\bar{D}$

Классификация по кинематическому принципу. По кинематическому принципу волны и ГДР делятся на *стационарные* и *нестационарные*. К первым относятся образующиеся в сверхзвуковых потоках волны типа Прандтля-Майера ($\bar{\omega}$) и скачки уплотнения (σ) (стоячие ударные волны). Фронты стационарных волн (передний и задний у $\bar{\omega}$ волн) и поверхность скачка неподвижны в сверхзвуковых потоках газа, которые проходят через них.

У бегущих волн Римана и в ударных волнах фронты перемещаются в пространстве и во времени.

Классификация по направлению движения фронта волны. Направления движения одномерных волн по исходному потоку газа можно характеризовать показателем ($\chi = \pm 1$) направления движения фронта.

При $\chi = +1$ фронты движутся в направлении движения исходного потока, и волны называются *спутными*. Скорости фронтов изоэнтропных волн относительно частиц потока являются звуковыми и имеют скорость распространения $u + a$ (a - скорость звука). Фронт прямой ударной волны имеет скорость $D > a$ и обгоняет частицы исходного потока.

Значения $\chi = -1$ соответствуют встречным волнам, фронты которых движутся навстречу исходному потоку. Поскольку передние фронты простых волн относительно частиц газа движутся со скоростью звука, то в сверхзвуковом исходном потоке ($u > a$) они встречают частицы потока, но сносятся вниз по нему. Такие волны называются *дрейфующими (сносимыми)*.

Таким образом, по направлению движения волны относительно потока можно разделить на: *спутные, сонаправленные потоку, и встречные волны*. Встречные простые волны, распространяющиеся по сверхзвуковому потоку, являются дрейфующими.

Если скорость распространения ударной волны меньше скорости набегающего на нее сверхзвукового потока, то такая волна будет также дрейфующей (сносимой).

Частным случаем дрейфующей ударной волны является прямой скачок уплотнения, который называется также стоячей ударной волной. С точки зрения размерности, время t является такой же координатой, как и пространственные координаты. В этом смысле одномерная нестационарная центрированная волна

Римана полностью эквивалентна плоской стационарной волне Прандтля - Майера. Косой скачок уплотнения эквивалентен бегущей одномерной D -волне. Криволинейный скачок уплотнения эквивалентен D -волне, движущейся с ускорением.

Классификация видов интерференции по газодинамическому признаку. По газодинамическим признакам волны могут быть разделены на два рода: изоэнтропические волны и разрывы. Тогда можно выделить три типа взаимодействия волн:

1. пересечение газодинамических разрывов, к которым относятся ударные волны ($\bar{D}$ - волны) и контактные разрывы, между собой;
2. взаимодействие изоэнтропных волн Римана ($\bar{R}$ - волны) между собой;
3. взаимодействие изоэнтропных волн с газодинамическими разрывами.

Кроме того, волны и разрывы могут взаимодействовать с твердыми поверхностями.

Энтропийные волны (контактные разрывы) между собой пересекаться не могут, поэтому к первому типу относятся взаимодействия ударных волн между собой или с контактными разрывами. Процесс взаимодействия $\bar{D}$ или $\bar{R}$ - волны с контактным разрывом называется *рефракцией*, и его причину можно обозначить как сумму приходящих волн: $\bar{D} + \bar{K}$ или $\bar{R} + \bar{K}$. Данный процесс сопровождается преломлением и отражением волн на контактном разрыве. Рефракция $\bar{D} + \bar{K}$ относится к взаимодействию газодинамических разрывов, а рефракция $\bar{R} + \bar{K}$ - к смешанному типу. Остальные случаи взаимодействия волн называются *интерференцией* ($\bar{D} + \bar{D}$, $\bar{R} + \bar{R}$, $\bar{D} + \bar{R}$).

4. Результаты анализа формулы интерференции

Приведенная выше классификация демонстрирует тот факт, что многообразие возникающих задач расчета различных УВС и УВП настоятельно требует унификации методики расчета. Предложенная В.Н.Усковым унифицированная методика, основанная на понятии обобщенной УВС, позволила сформулировать

простую обобщенную формулу интерференции разрывов, справедливую для всех типов взаимодействий,

Все возможные формулы взаимодействия приведены в таблице 2 ниже.

Таблица 2 - Формулы интерференции разрывов

№	Формула Интерференции	Характеристики приходящих разрывов								Искомые интенсивности	Примечания
		$\vec{\sigma}_1$		$\vec{\sigma}_2$		$\vec{\sigma}_5$		τ			
		J_1	χ_1	J_2	χ_2	J_5	χ_5	J_τ	χ_τ		
1	$\vec{\sigma}_1 + W \Rightarrow \begin{cases} \vec{\sigma}_3 \\ \vec{\sigma}_4 + \hat{t}_{3-4} + \vec{\sigma}_3 \end{cases}$	J_1	$+I$	I	0	I	0	I	0	J_3	ТК – 2
		J_1	$+I$	I	0	I	0	I	0	J_3, J_4	
		J_1	$+I$	I	0	I	0	I	0	J_3, J_4	
2	$\vec{\sigma}_1 + \tau \Rightarrow \begin{cases} \vec{\sigma}_4 + \hat{t}_{3-4} + \vec{\sigma}_3 \\ \vec{\sigma}_4 + \hat{t}_{3-4} + \vec{\omega}_3 \end{cases}$	J_1	$+I$	I	0	I	0	J_τ	–	J_3, J_4	
		J_1	$+I$	I	0	I	0	J_τ	–	J_3, J_4	
		J_1	$+I$	I	0	I	0	J_τ	–	J_3, J_4	
3	$\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_2 \Rightarrow \begin{cases} \vec{\sigma}_4 + \hat{t}_{2-4} \\ \vec{\sigma}_4 + \hat{t}_{3-4} + \vec{\sigma}_3 \\ \vec{\sigma}_4 + \hat{t}_{3-4} + \vec{\omega}_3 \end{cases}$	J_1	$+I$	–	$+I$	I	0	I	0	J_2, J_4	ТК – 3
		J_1	$+I$	J_2	$+I$	I	0	I	0	J_3, J_4	
		J_1	$+I$	J_2	$+I$	I	0	I	0	J_3, J_4	
4	$\vec{\sigma}_1 + \vec{\sigma}_5 \Rightarrow \begin{cases} \vec{\sigma}_3 + \hat{t}_{3-5} \\ \vec{\sigma}_3 + \hat{t}_{3-4} + \vec{\sigma}_4 \end{cases}$	J_1	$+I$	I	0	–	$-I$	I	0	J_3, J_5	ТК – I
		J_1	$+I$	I	0	J_5	$-I$	I	0	J_3, J_4	
		J_1	$+I$	I	0	J_5	$-I$	I	0	J_3, J_4	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная здесь классификация является наиболее общей. Она содержит в себе формулы, следующие из обобщенной УВС. Рассмотрены различные классификационные признаки: термодинамические, кинематические, нестационарность, направление разрыва, приходящие и исходящие разрывы, обобщенная УВС, конкретная конфигурация которой определяется параметрами приходящих разрывов и УДС на исходящем из точки интерференции тангенциальном разрыве. С другой стороны, выполнение УДС на тангенциальном разрыве за УВС является необходимым, но не достаточным условием существования ударно-волновой структуры. Для существования УВС должны выполняться условия её структурной устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 - Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5-е, переработанное, Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", М., 1978, 736 с.
- 2 - Дейч М.Е. Техническая газодинамика. Изд. 3-е, перераб. М., "Энергия", 1974, 592 с.
- 3 - Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, 336с.
- 4 Mach, E. Uber den verlauf von funkenwellen in der ebene und im raume. Sitzungsbr. Akad. Wiss. Wien, Bd. 78. - 1878. - S. 819–838.
- 5 Neumann, J. Oblique reflection of shocks. In: Collected Works, Pergamon, Vol. 6, 1943.
- 6 Усков, В.Н. Интерференция газодинамических и тангенциальных разрывов. Изв. АН СССР, МЖГ. - 1979. - № 4, С. 191-197.
- 7 Усков, В.Н. “Анализ Ударно-Волновых Структур В Неравномерном Стационарном Потокe.” Кн. “Фундаментальные проблемы физики ударных волн”. Т.2: - 1987. - С.166–169.
- 8 Усков, В.Н., Кожемякин, А.О., Омельченко, А. В. Наклонное Взаимодействие Сверхзвуковых Потокoв. Изв. РАН МЖГ. -1999. - № 5. - С. 123–131.
- 9 Усков, В.Н., Чернышов, М. В. Теоретический Анализ Аэродинамических Коэффициентов Многоугольных Профилей В Сверхзвуковом Потокe. Механика и процессы управления: Труды XXXI Уральского семинара. -2001.- С. 187–191.
- 10 Усков, В.Н., Шахова, О. А. К Расчету Тройной Конфигурации Ударных Волн/ сб. “Гидроаэромеханика и теория упругости”. – Днепропетровск: ДГУ.-1976- № 21 7 - С. 13–18.
- 11 Усков, В.Н., Чернышов, М. В. Тройные Конфигурации Стационарных Ударных Волн/ Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции. Технические средства противодействия терроризму и оружие нелетального действия. Том 1. -2009. - С. 420–435.
- 12 Усков, В.Н., Чернышов, М. В. Теоретический Анализ Особенности Тройных Конфигураций Скачков Уплотнения/ Сб. статей// Под. ред. В.Н. Ускова. - 2002. - С. 75–99.
- 13 Усков В.Н., Росляков Г.С., Старых А. Л. 1987. “Интерференция Стационарных Скачков Уплотнения Одного Направления.” Изв. АН СССР. МЖГ. № 4:С.143–152.

14 Усков В.Н., Старых А. Л. 1990. “Анализ Областей Существования Решений Уравнений Интерференции Стационарных Газодинамических Разрывов.” Сб. “Нестационарные течения газов с ударными волнами”. С. 359–372.

15 Усков В.Н., Адрианов А. Л. 1988. “Комплекс Подпрограмм Для Моделирования Двумерных Стационарных Сверхзвуковых Течений С Выделением Разрывов На Несогласованной Сетке”. Сб. “Комплексы программ математической физики и архитектура ЭВМ”. С. 3–7.