

К истории Теории ударных волн

Федотов П.В.

Аннотация. Рассмотрена история создания Теории ударных волн в газах.

Показано, что одной из основных трудностей развития теории, кроме очевидных математических трудностей, является стремление сохранить теорию идеального газа в условиях создания ударных волн. Эти попытки продолжаются до сих пор, хотя самые первые исследования показали, что совместить ударные волны и идеальный газ невозможно. И тем не менее.

Предлагается, вместо безуспешных попыток совместить несовместимое, вернуться к начальным аксиомам теории газов, с целью выработки такой теории газов, в которой теория ударных волн перестанет быть неразрешимой.

Ключевые слова. Идеальный газ, реальный газ, ударная волна, зона разрыва свойств в газах, термодинамические свойства газов.

История открытия ударной адиабаты очень драматична, в чем-то даже детективная, и при этом весьма поучительна, поэтому остановимся на ней подробнее.

Несмотря на то, что в современной научной и учебной литературе принято упоминать в списке первооткрывателей ударных волн три фамилии: Римана, Ренкина и Гюгонио, первым, кто был весьма близок к открытию ударных волн английский священник Самюэль Ирншоу. В статье «О движении жидкости, пока оно выражается уравнением непрерывности» опубликованной в трудах Кембриджского философского общества, 1837 г. [1]. «Подобно Риману, он исходил из рассмотрения волны сжатия конечной ширины, в которой гребень волны перегоняет область низкого давления, приводя к образованию разрыва. Однако, подойдя вплотную к уравнениям, Ирншоу неожиданно делает вывод, что природа не терпит скачков, и говорит нечто невразумительное об отражениях, о том, что природа как-нибудь да избежит возникновения ударной волны, возникновения ударной волны. Мы видим здесь очень наглядный и поучительный пример дурного влияния ошибочной философии на научные исследования» [8, с. 76].

Следующим был Стокс. Который, в работе написанной в 1848 г. «О сложности в теории звука» [6, с. 349 - 356] писал: «Конечно, после момента, когда выражение (А.) становится бесконечным, какое-то движение будет продолжаться, и мы, возможно, захотим узнать, какова природа этого движения. Возможно, наиболее естественным предположением, которое следует сделать для испытания, является то, что образуется поверхность разрыва, проходя через которую происходит резкое изменение плотности и скорости»¹ [6, с. 352].

Далее Стокс рассматривает условия подобного движения и выводит два соотношения – уравнение сохранения массы и уравнение сохранения количества движения, выполнение которых гарантирует сохранение поверхности разрыва волны. Он пишет: «Уравнения (2.), (3.) выполняются, оказывается, что разрывное движение динамически возможно»² [6, с. 354].

Внимательно проанализировав работу Стокса легко увидеть, что Стокс не только вывел математические условия существования ударной волны, но и привел физические аргументы, почему такое движение возможно в реальных газах, но невозможно в рамках модели идеального газа и идеальной жидкости. Тем самым, Стокс предвосхитил работы Ренкина и Гюгонио, которые через много лет, практически повторяли рассуждения Стокса.

Перейдем к работе Римана написанной в 1860 году, а затем вернемся к Стоксу, чтобы прояснить некоторые моменты.

«Риман в своем мемуаре [11, с. 376], составил первые два уравнения, – сохранение вещества и сохранения количества движения, в качестве третьего уравнения принимает уравнение Пуассона, т.е. заранее задает сохранение энтропии в ударной волне³, по аналогии с сохранением энтропии в движениях безударных волн, в которых действие диссипативных сил – вязкости и теплопроводности не рассматриваются. Полученное им соотношение между давлением и плотностью и общая картина движения обладают рядом общих черт с истинной картиной. Однако уравнения Римана приводят к тому, что закон сохранения энергии оказывается невыполненным. Поэтому мы должны признать их ошибочными» [8, с. 74].

Тем не менее, хотя работа Стокса известна, как и работа Римана, но имя Стокса, в отличие от имени Римана, в современной научной и учебной литературе не упоминается среди основоположников теории ударных волн. Причина банальна: Стокс, имевший репутацию скромного и застенчивого человека, отказался от своих идей, не желая полемизировать с В. Томпсоном. Вот что пишет Стокс в 1877 году Релею, в ответ на критику:

«Дорогой лорд Релей.

Спасибо Вам за указанные возражения против странного вида движения, о котором я размышлял в работе, на которую Вы ссылаетесь. Сэр В. Томпсон указал мне то же самое много лет тому назад, и я упомянул бы об этом, предоставься мне случай писать что-либо, относящееся к предмету, или в ином случае, если бы моя работа привлекла внимание. Кажется, однако, что едва ли стоит удостаивать критики

¹ Перев. Авт.

² Перев. Авт.

³ Т.е., Риман ограничивается рамками модели идеального газа (Прим. Авт.)

отрывок из работы, похороненной среди другой научной старины» [15].

Риман же, напротив, несмотря на очевидные несоответствия реальности, остался верен своим идеям, и вошел в историю, в том числе и как один из основоположников теории ударных волн.

Тем, не менее, работа Стокса не пропала втуне, хотя и не принесла Стоксу удовлетворения. Дело в том, что Стокс расширил такое понятие как «непрерывная функция». Этот момент имел огромное значение. Т.к. до работы Стокса было общепринято понимать, термин непрерывная функция, не только как неразрывная функция, но еще и как гладкая функция.

Стокс в своей работе писал: «Под термином «непрерывная функция» здесь я понимаю функцию, значение которой не изменяется сразу, а не (как иногда используется термин) функцию, которая сохраняет одно и то же алгебраическое выражение. Действительно, мне представляется чрезвычайно важным при рассмотрении применения уравнений с частными производными к физическим и даже к геометрическим задачам рассматривать функции, отличные от идеи алгебраического выражения»⁴ [6, с. 352].

Было еще одно важное заявление Стокса, оказавшее несомненное влияние на последующих исследователей. Это рассуждения Стокса о размерах фронта ударной волны: «Но легко будет видеть, что разрывное движение остается возможным, когда мы учитываем изменение температуры из-за конденсации и разрежения, пренебрегая, однако, передачей тепла от одной части жидкости к другой. Действительно, поскольку речь идет о возможности разрыва, это несущественно в зависимости от того, какой закон может увеличивать давление с плотностью.

Конечно, связь тепла с одной частицей жидкости с другой повлияла бы на результат. Но есть другое предположение, **что противоречит фактическому состоянию упругих жидкостей. Неверно, что одна часть упругой жидкости неспособна оказывать какую-либо тангенциальную силу на другую часть, на которой она скользит, хотя изменение скорости от одной части к другой не является резким, но непрерывным**⁵. Вследствие этой тангенциальной силы, аналогичной в некоторых отношениях к трению в случае твердых тел, взаимное давление двух смежных элементов жидкости не является точно нормальным к поверхности разделения и не равно во всех направлениях относительно одной и той же точки. Во многих случаях влияние этого внутреннего трения нечувствительно, в других случаях это очень важно. Его общий эффект - проверить относительное движение частей жидкости. Предположим теперь, что поверхность разрыва почти сформирована, т.е. что в окрестности некоторой поверхности происходит очень быстрое изменение плотности и скорости. Легко показать, что в таком случае быстрая конденсация или разрежение означает быстрое

скользящее движение жидкости; и это быстрое скользящее движение вызовет в действие значительную тангенциальную силу, эффект которой будет заключаться в проверке относительного движения частей жидкости. Поэтому оказывается почти уверенным, что внутреннее трение эффективно предотвратит образование поверхности разрыва и даже сделает движение непрерывным снова, если бы оно было на мгновение прерывистым»⁶ [6, с. 356].

Т.о., Стокс приходит к выводу, что фронт ударной волны имеет не нулевую ширину, т.к. газы имеют внутреннее трение (вязкость) и не нулевую теплопередачу. Стокс отмечает, что это явно противоречит современному ему взглядам⁷, но позволяет перейти от разрыва в плоскости фронта ударной волны и перейти к непрерывной, хотя и негладкой функции в пределах малой области ударной волны. Такое поведение ударной волны признано в современной научной литературе, например в [7, с. 114], [8, с. 63], [10, с. 122].

Следующей работой по ударным адиабатам была работа Ренкина 1870 г. [4, с. 277-288]. В этой работе Ренкин исправил «неточность Римана, который не пользовался уравнением энергии, а считал давление и плотность с двух сторон скачка связанным адиабатой Пуассона» [14, с. 73].

Академик Я. Б. Зельдович считал мемуар Ренкина наиболее интересным (из работ основоположников) «с точки зрения физической газодинамики, с точки зрения отчетливого понимания сущности происходящих в ударной волне явлений» [8, с. 74]. Посмотрим, чем же мемуар Ренкина привлек внимание маститого академика. В первую очередь тем, что «У него сформулированы важнейшие принципы автомодельности» [8, с. 74]. И это естественно является неоспоримым достоинством Ренкина, но с другой стороны: «Ренкин рассматривает вещество, хотя и не обладающее вязкостью, но обладающее теплопроводностью» [8, с. 74]. Напомним, что идеальный газ не обладает ни вязкостью, ни теплопроводностью, Ренкин, соответственно, рассматривает некий симбиот, полуидеальный газ. Более того: «Именно, Ренкин особенно подчеркивает, что численно коэффициент теплопроводности вещества может быть сколь угодно мал, но, тем не менее, в ударной волне мы не можем им пренебречь» [8, с. 74]. Другими словами, Ренкин очень пытался сблизить теорию ударных волн и модель идеального газа, но, тем не менее, у него это до конца не получилось. Несмотря на это Зельдович отмечает определенные успехи Ренкина: «Этим кладется основа пренебрегать диссипативными силами, в частности теплопроводностью, там, где величина градиентов определена извне, заранее задана самими уравнениями движения без теплопроводности, и почему нельзя пренебрегать теплопроводностью там, где величина градиента сама по себе не определена» [8, с. 74]. Т.о., Ренкин в своем мемуаре

невозможны, именно потому, что функции свойств должны быть непрерывными, понимая под этим термином, не только непрерывность, но еще и гладкость функции, как это было принято в то время. О чем и говорит Стокс. (Прим. Авт).

⁴ Перевод Авт.

⁵ Выделено нами.

⁶ Перевод Авт.

⁷ В статье Ирншоу «О движении жидкости, пока оно выражается уравнением непрерывности» доказывал, что скачки свойств газов при движении возмущений

реализовал известный принцип: «Если чего-то категорически нельзя, но очень хочется, то немножко можно» (с).

Зельдович называет это *первым приближением* [8, с. 75]. «Качественно для частного случая, когда единственным диссипативным фактором является теплопроводность вещества, эти соотношения совершенно отчетливо выяснены Ренкиным» [8, с. 75].

Примечательно, что говорит Зельдович дальше о мемуаре Ренкина: «Дальнейшее изложение Ренкина страдает излишней сложностью... В комбинации с общими термодинамическими соотношениями Ренкин, правда не без труда, получает систему уравнений, эквивалентную системе уравнений Гюгонио, и выписывает уравнения для идеального газа» [8, с. 75]. Фактически Ренкин, хоть и с трудом, хотя и обходными путями, но получает то, чего он добивался, совместить уравнения ударной адиабаты и модели идеального газа.

Но, ради истины признается, что получилось это у Ренкина не совсем удачно. «Ренкин показал, что установившийся процесс, в котором только силами давления переход в узкой области из одного постоянного состояния в другое, невозможен. Вместо этого он предположил, что в этой области происходит неадиабатичный процесс, подчиненный условию, согласно которому тепло может сообщаться от одной частицы другой, но не приносится извне.

Условие Ренкина согласуется с законом сохранения энергии. Однако Релей (1910) [5] и Гюгонио (1887) [2] ясно указали, на то, что обратимый адиабатический переход в ударной волне нарушает принцип сохранения энергии» [10, 124].

Последним, из признанных основоположников современной теории ударных волн, был капитан артиллерии Гюгонио, совмещавший службу в морской артиллерии с должностью профессора механики и баллистики в артиллерийской школе.

В мемуаре «О распространении движения в телах особенно в идеальном газе»⁸, ставшим классическим, Гюгонио вывел уравнение ударной адиабаты, которую сейчас называют адиабатой Гюгонио, реже – адиабатой Ренкина-Гюгонио. Вывод этого важного уравнения, сделанный в свое время Гюгонио, в настоящее время приводится практически во всех учебниках по газовой динамике. Главное достижение Гюгонио состояло в том, что он учел все недоработки предшественников и полностью отказался от попыток совместить условия идеального газа (отсутствии теплопроводности и вязкости) в разрыве, в качестве компромисса сохранив условие идеальности вне разрыва. «Действительно, Гюгонио показал, что при отсутствии вязкости и теплопроводности (вне разрыва) из сохранения энергии следует сохранение энтропии в непрерывном течении и изменение её в разрыве. Из сохранения энергии он вывел также и третье условие на разрыве в обычной форме, которой следует отдать предпочтение по сравнению с фор-

мой, полученной Ренкиным, хотя в случае идеального газа три условия Ренкина равносильны условиям Гюгонио» [10, 124].

Неизвестно сколь бы еще продолжались бы теоретические споры о существовании ударных волн, по крайней мере, основанием для признания мемуара Гюгонио, послужило не то, что выводы Гюгонио были безупречны. А то, что в том же 1887 г. в трудах Кайзеровской Академии наук была опубликована статья Эрнста Маха «Фотографическая фиксация процесса, инициированного снарядом в воздухе» [3, с. 764].

В этой статье Мах поставил точку в многолетних спорах теоретиков о существовании ударных волн в газах. С таким аргументом никто не спорил. Тем не менее, попытки продолжались. «Любопытно, что даже в издании 1925 г. известной книги «Дифференциальные уравнения в частных производных математической физики», составленной Вебером по лекциям Римана, после того как весь вопрос был полностью выяснен, Вебер попрежнему выражает странные сомнения – не могут ли при учете турбулентности все же иметь место уравнения Римана» [8, 74].

Выше уже сказано, что принципиальное отличие работы Римана от других исследователей в том, что Риман пытался совместить теорию ударных волн и модель идеального газа, в явном виде, приняв в качестве третьего уравнения – уравнение Пуассона. В этом ключе становится понятными те сомнения Вебера, которые Зельдович назвал странными.

Попробуем разобраться, почему споры о существовании ударных волн длились так долго, и даже после того, как Мах экспериментально доказал существование ударных волн, находились ученые, которые все-таки пытались совместить несовместимое.

Дело в том, что основные возражения против ударных волн состояли в том, что существование ударных волн и теория идеального газа несовместимы.

«В предыдущем изложении мы подчеркнули те случаи, когда классическая газовая динамика, оперирующая представлением о непрерывном распределении давления и пользующаяся дифференциальными уравнениями для описания явлений, но не рассматривающая ни вязкости, ни теплопроводности, наталкивалась на те или иные трудности» [8, с. 62].

«Итак, невозможно, чтобы течение при всех обстоятельствах оставалось непрерывным, изэнтропическим и управляемым только силами давления⁹. Замечательно, что такая, казалось бы, весьма вероятная гипотеза о возможном механизме, управляющем течением, отвергается по чисто математическим причинам» [10, с. 116].

«Все перечисленные случаи отчетливо показывают, необходимость нахождения еще каких-то других видов решения газовой динамики, не вытекающих непосредственно из уравнений газовой динамики идеальных газов (здесь – идеальных в смысле отсутствия вязкости и теплопроводности)» [8, с. 62].

⁸ Hugoniot H. Sur la propagation du mouvement dans les corps et spécialement dans les gas parfaits // J. L'Ecole polytechnique, 57, 1887; 58, 1889.

⁹ Курсив Курант Р., Фридрихс К.

Из вышеизложенного ясно видно, что совместить идеальный газ и ударные волны невозможно в принципе, но беда в том, что другой теории газа не существовало.

О том, что для идеального газа ударных волн существовать не может, понимал еще Стокс. «Странные результаты, по которым я пришел, кажутся довольно выводимыми из двух уже упомянутых гипотез. Из этого следует, что рассматриваемое прерывистое движение никогда не может иметь место, поскольку мы всё время реконструировали идеальную упругую жидкость, которая не существует в природе.»¹⁰ [6, с. 356].

Первая теория, расширяющая модель идеального газа была кинетически-потенциальная модель Ван-дер-Ваальса, опубликованная в 1873 г. В этой модели Ван-дер-Ваальс ввел потенциальное взаимодействие между частицами газа, т.о., в газе Ван-дер-Ваальса появляется механизм вязкости. Но механизма теплопроводности, в модели Ван-дер-Ваальса не имеется. Также в модели Ван-дер-Ваальса не имеется механизма изменения энтропии при изменении давления, хотя такая возможность имеется. Но, даже это явилось главной проблемой, проблема в том, что теория Ван-дер-Ваальса, хотя и носит название «теория реальных газов», тем не менее, теория Ван-дер-Ваальса имеет ряд расхождений с реальными газами [13, с. 230], [12, с. 107]¹¹ и др. И это также не доставляло популярности теории Ван-дер-Ваальса.

Несмотря на эти недостатки в 1910 г. Ван-дер-Ваальс получил нобелевскую премию за работы в области теории газов, именно потому, что его теория была более приближена к реальной теории газов, чем теория идеального газа.

Не известно что послужило причиной, но теория Ван-дер-Ваальса не применяется в теории ударных волн, хотя некоторые примеры говорят, что это скорее недостаток, чем достоинство.

«С процессом схождения ударной волны к центру имеет целый ряд общих черт процесс захлопывания пузырьков в жидкости (в воде). В реальной жидкости часто образуются маленькие пузырьки, заполненные паром жидкости и нерастворенными газами. Явление образования пузырьков носит название кавитации.

Задачу о движении жидкости при захлопывании пузырька в идеальной жидкости решал Рэлей. Жидкость считалась идеальной (невязкой и несжимаемой)» [9, с. 628].

Результаты решения задачи Рэля для невязкой и несжимаемой жидкости оказались неудовлетворительными. «Скорость границы (пузырька) стремится к бесконечности. В пределе $R \rightarrow 0$ потенциальная энергия стремится к нулю, и вся энергия E , которая теперь является кинетической, концентрируется в точке начала координат. Плотность энергии в ней бесконечна. В отличие от скорости, давление в момент фокусировки бесконечно и на любом конечном

радиусе (с давлением в модели несжимаемой жидкости не связана с энергия). Это свидетельствует о несовершенстве модели несжимаемой жидкости» [9, с. 630].

В конце статьи Рэлей пишет «и казалось бы, что на этот вывод не сильно влияет пренебрежение сжимаемостью перед ударом.

А в работе «Сверхзвуковое течение и ударные волны» Куранта Р., Фридрихса К. прямо писали «Следовательно, для математического описания движения, произведенного движущимся вперед поршнем, и для многих других движений мы должны отказаться от сделанных ранее физических предположений или, вернее, дополнить их (на что мы указывали в § 48)¹².

Следовательно, для того чтобы прийти к правильной теории, мы должны отказаться от описания физической картины явления с помощью наших слишком упрощенных первоначальных предположений и, принимая во внимание физические факты, которыми мы при составлении исходных дифференциальных уравнений пренебрегли, получить более тесное приближение к действительности» [10, с.121].

Следующий ход событий можно проследить, в «Теории звука», § 279, но, кажется, чтобы построить удовлетворительную теорию, сжимаемость должна учитываться на более ранней стадии» [5, с. 98].

Пример таких теорий, учитывающих сжимаемость газов на этапе первоначальных постулатов построения теории, была выдвинутая Ван-дер-Ваальсом теория реальных газов

Тем не менее, несмотря на некоторые успехи зарождающейся теории реальных газов, попытки совершить невозможное, совместить несовместимое и сохранить теорию идеального газа в ударных волнах. Причем теми же авторами, которые до этого ясно высказались, что это невозможно. Имеются в виду Курант Р., Фридрихс К., цитата которых приведена выше, дальше пишут: «Одна возможность видна непосредственно. Мы можем пытаться получить необходимое обобщение прямо из дифференциальных уравнений движения. В § 24 гл. II мы видели, что эти дифференциальные уравнения допускают разрывы первой и высших производных¹³ u и p по характеристикам в плоскости (x, t) . Эти «звуковые разрывы»¹⁴ являются естественным обобщением дифференциальных уравнений; они могут, например, возникнуть в задаче о начальных значениях при переходе к пределу от начальных значений с непрерывными производными к начальным значениям с местным скачком производной. В случае линейных дифференциальных уравнений тот же тип предельного перехода приводит к «звуковому распространению» разрывов даже самих искомых функций. Но для нелинейных дифференциальных уравнений нельзя вывести такого звукового распространения разрывов u и p путем предельного перехода от непрерывного решения» [10, с.122].

¹⁰ Перев. Авт.

11 Трофимова Т. И. Курс физики М.: Высш. шк., 1990. 478 с.

¹² Имеется в виду модель идеального газа (Прим. Авт.).

¹³ Именно об этом и говорил Стокс в своей статье (Прим. Авт.).

¹⁴ По обычной терминологии «слабые разрывы»

Т.е., предлагается от уравнений с непрерывными производными перейти к уравнениям с разрывами производных, изменяющими свои значения скачком. Но тогда трудно сказать, а останется ли после этого, той самой теорией идеального газа, которая известна до сих пор, как самая простая, за счет максимального упрощения начальных предположений. Но, кажется важнее не то, что предлагается внести некоторые изменения в теорию идеального газа, а то, что вводимые изменения предлагается делать не в виде физических постулатов, а исючительно в виде внедрения чисто математических ухищрений. Т.е., чисто формально предположить, что уравнения допускающие разрывы и скачки свойств, не вдаваясь в физические подробности.

«Мы предполагали до сих пор, что силы, действующие в газе, обусловлены только изменениями давления $p = p(\rho, S)$, а не трением, и что энтропия частицы остается неизменной. Эти предположения оправдываются только тогда, когда градиенты температуры и скорости малы. В противном случае математическое описание физического поведения системы должно учитывать необратимые термодинамические процессы, вызываемые трением и теплопроводностью, которые присутствуют всегда, если скорость и температура непостоянны. Такая теория была бы связана с почти непреодолимыми математическими осложнениями, если бы не одно счастливое обстоятельство: действительные явления всегда таковы, что необратимые процессы в газах происходят только в узких зонах, где градиенты скорости и температуры очень велики, в то время как вне этих переходных зон течение подчиняется установленным выше законам обратимых адиабатических процессов, т.е. известным нам дифференциальным уравнениям. Поэтому эмпирические факты подсказывают дальнейшую математическую идеализацию, которая и будет основой нашего анализа.

Необратимые процессы будут описываться резкими разрывами, происходящими на определенных поверхностях в жидкости. Такие разрывы с бесконечными градиентами некоторых величин заменяют в математической идеализации узкие зоны с заметной необратимостью.

В действительности на таких поверхностях происходят очень большие скачки скорости и температуры, поэтому предположение о разрывности, хотя и является идеализацией, гораздо лучше согласуется с фактами, чем можно было бы ожидать» [10, с.122].

Опять заметим, что авторы постоянно сводят проблемы физической теории газов к математическим способам решения проблемы. Т.е., вместо изменения физических аксиом для модели газа предлагается математические нововведения.

И далее: «Конечно, мы требуем, чтобы три закона сохранения – энергии, массы и импульса – выполнялись и в этих необратимых процессах. Вне разрыва единственной действующей силой является, по нашим предположениям, градиент давления, и единственный выигрыш или потеря в энергии происходит за счет работы этих сил давления. Поэтому в областях

непрерывного течения справедливы наши основные уравнения» [10, с.123].

Вот только авторы забыли упомянуть, что «основные уравнения» – это уравнения идеального газа, и прекращают они свое действие не только в узких пределах разрывных волн, но и в широких пределах спокойного течения при низких и высоких температурах, при сильном разряжении и сильном сжатии.

«Как мы помним из § 8, постоянство удельной энтропии для каждой частицы газа, т.е. обратимость, следует для непрерывных процессов из закона сохранения энергии. Для разрывных процессов, подчиненных тем же законам сохранения, это уже не имеет места. Термодинамическое условия, выражающее необратимый характер процесс, состоит в том, что энтропия не должна уменьшаться в разрывном процессе, и это условие, налагаемое на энтропию, должно быть добавлено к законам сохранения» [10, с.123].

Получается довольно странная ситуация, если процесс непрерывный, то из закона сохранения энергии следует, что энтропия должна сохранять свое значение. А если процесс прерывный, т.е. испытывает скачок градиента свойств, то из того же закона сохранения численного значения энтропии совсем не следует. Какой-то двусмысленный закон сохранения получается, хотя разговор идет об одном из самых фундаментальных законов Природы – законе сохранения энергии.

В действительности, этот кажущийся парадокс разрешается совсем легко. Закон неубывания энтропии для самопроизвольных процессов, действует всегда, но, при н.у., когда свойства газов, с достаточной точностью могут быть описаны приближенными законами идеального газа, энтропия изменяется настолько незначительно, что без внесения фатальной ошибки, её можно считать постоянной. В учебниках по газовой динамике прекрасно показано, что законы идеального газа – это пример упрощения законов реальных газов, в случаях, когда можно пренебречь некоторыми отклонениями в виду из малости.

Конечно, Ван дер Ваальс строил свою теорию для газов вводя всего два дополнения, по сравнению с теорией идеального газа, а именно конечные размеры атомов газа и потенциальное взаимодействие при столкновениях. Но его идеи о необходимости связи внутренней энергии не только с кинетической энергией частиц газа, но и с потенциальной¹⁵ заслуживает пристального внимания. Хотя, и явно недостаточны для построения полноценной теории ударных волн, о чем явно говорят дальнейшие исследования обсуждаемого вопроса.

«Хотя это, конечно, не очевидно, но можно с уверенностью считать, что течение с такой разрывностью полностью определяется тремя законами сохранения и условием для энтропии. Исходные дифференциальные уравнения, справедливые в области непрерывного течения, вместе с условиями, выражающими законы сохранения, и с условием для энтро-

¹⁵ Именно поэтому, мы называем теорию Ван дер Ваальса кинетически-потенциальной (Прим. Авт.).

пии на поверхности разрыва достаточны для определения течения без подробного описания необратимого процесса на разрыве. [10, с. 123].

Видим явные попытки уйти от проблемы, вместо ее решения. То, что в областях непрерывного течения основные уравнения идеального газа работают, хотя и с некоторыми ограничениями, но все-таки работают. То в области ударной волны, как показывают остальные исследования одного условия энтропии явно недостаточно. Что подтверждается дальнейшими словами: «Чтобы разъяснить это положение, мы рассмотрим в § 63 зависимость необратимых процессов от вязкости и теплопроводности, принимая во внимание конечную протяженность зон разрыва. [10, с. 123].

Т.е. явно указывается, что кроме энтропии, необходимо еще усчитывать вязкость и теплопроводность газа. Т.е., свойств, не учитываемых в теории идеального газа.

А также авторы труда принимают гипотезу конечной величине области разрыва. Но если говорится о «конечной величине», то скорее стоит применять не слова «зона разрыва», более логично применять слова «зона быстрого перехода от начальных к конечным значениям параметров».

О роли других параметров читаем у Зельдовича: «Чем меньше коэффициент теплопроводности, тем больших градиентов мы можем ожидать в ударной волне, так что произведение градиента температуры на коэффициент теплопроводности (равное количеству тепла, переносимого теплопроводностью в единицу времени) может оставаться конечным при стремлении самого коэффициента к нулю» [8, с. 74].

А также. «Если мы будем считать это первым приближением, поскольку в построении волны разрежения не учитывались теплопроводность и вязкость, и мы захотим в следующем приближении учесть действие теплопроводности и вязкости на поля температуры и скорости, найденные в первом приближении, то увидим, что чрезвычайно скоро все градиенты окажутся настолько малыми, что теплопроводность и вязкость практически совершенно не будут влиять на результат. Не то в ударной волне. Если за первое приближение мы захотели бы принять бесконечно крутой разрыв, который получается при равных нулю теплопроводности и вязкости, то в следующем приближении вводя теплопроводность и вязкость, мы получили бы бесконечные потоки тепла, бесконечно большое возрастание энтропии. В случае

ударной волны, где уравнения движения без теплопроводности и вязкости не дают никакого определенного значения ширины волны, величина градиентов и связанная с ней ширина волны могут быть получены только из рассмотрения диссипативных сил, и при этом ширина оказывается как раз такой, чтобы дать требуемое уравнениями сохранения возрастания энтропии. При этом, обратно, если в волне разряжения при конечной, соизмеримой с размерами системы ширине мы могли пренебречь действием диссипативных сил, то в ударной волне, для того, чтобы диссипативные силы давали конечное возрастание энтропии, необходимо, чтобы ширина ударной волны была весьма мала по сравнению с размерами системы» [10, с. 75].

Т.е., в отличие от ламинарного течения в ударной волне такие параметры, как энтропия, вязкость и теплопроводность играют намного большую роль. А для реальных газов зависимости этих параметров более сложные, чем для идеального газа. Именно поэтому все попытки совместить теорию идеального газа и теорию ударных волн терпят одно поражение за другим.

Решение задачи Рэлея при дополнительных условиях занимались другие ученые. С учетом сжимаемости, но без учета вязкости задачу решал Хантер, с учетом вязкости в несжимаемой жидкости занимался Е.И. Забабахин [9, с. 631]. Решением задачи Рэлея с учетом и сжимаемости, и вязкости, по видимому не занимался никто¹⁶, в связи с большими математическими трудностями

Не великая удача применения теории Ван-дер-Ваальса говорит не о том, что путь был неправильный, а о том, что продвижения по выбранному пути недостаточны. Ведь ясно же видно, что в попытке спасти реноме уравнений идеального газа исследователям приходится сдавать позиции и вводить постулаты несовместимые с основами теории. Или ограничивать сферу применения теории областями простого течения, тщательно обходя самую интересную зону, непосредственной ударной волны.

Именно поэтому, представляется наиболее перспективным путь, вернуться к основам теории газов с целью пересмотра начальных аксиом. Ни в коем случае не с целью простого потрясения основ, а с целью разработки таких основ, чтобы решение проблемы ударных волн могла бы перестать быть неразрешимой загадкой.

Литература:

1. S. Earnshaw. On the fluid motion so far as it is expressed by the equation of continuity // Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Vols. 6 - 8, 1837 - 1846.
2. Hugoniot H. Sur la propagation du mouvement dans les corps. Et specialement dans les gas parfaits // J. L'Ecole polytechnique, 57, 1887; 58, 1889.
3. E. Mach und P. Salcher. Photographische Fixirung der durch Prrojectile in der Luft eingeleiteten Vorgänge // Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, V. 99, Wien, 1887. 1123 s.
4. Rankine W.J.M. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Vol. 160, Part II, 1870

¹⁶ Мы не можем утверждать это с полной ответственностью, т.к. не в состоянии проверить все публика-

ции по интересующей теме, тем не менее, все попытки найти подобные публикации, окончились неудачей (Прим. Авт.)

5. Rayleigh J. Aerial plane waves of finite amplitude. Proceedings of the Royal Society of London. 84. 247 – 284, 1910, Scientific Papers, V. Cambridge, 573-610, 1912
6. G. G. Stokes. On a difficulty in the Theory of Sound // Phil. Mag. 3. 33. 1848.
7. Абрамович Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1. М.: Наука. 1991. – 600 с.
8. Зельдович Я. Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М.: АН СССР, 1946. 186 с.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966 – 687 с.
10. Курант Р., Фридрихс К. Сверхзвуковое течение и ударные волны. 1950. 427 с.
11. Риман Б. Распространение плоских волн конечной амплитуды // Риман. Б. Сочинения. М.: ОГИЗ. 1948. 543 с.
12. Трофимова Т. И. Курс физики М.: Высш. шк., 1990. 478 с.-
13. Фриш, Тиморева Курс общей физики. Т. 1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. М.: Гос. Изд. Физ-мат литературы. 1962. – 467 с.
14. Черный Г.Г. Газовая динамика М.: Наука. 1988 – 424 с.
15. Черный Г.Г. К истории развития представления о разрывных движениях газов и жидкостей // АМГД, 2003, № 2.