ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ МИХЕЛЬСОНА – ЧЕПМЕНА – ЖУГЕ

Е. Б. СМИРНОВ, К. М. ПРОСВИРНИН

Становление теории детонации в XVIII–XIX веках рассматривалось в статье, опубликованной в журнале «Атом», 2007, № 33. Данная статья описывает дальнейшее развитие теории в конце XIX — начале XX веков.

К исходу XIX века был накоплен обширный экспериментальный материал, касающийся взрывных процессов, а также подготовлена теоретическая база, благодаря чему мировое научное сообщество вплотную приблизилось к построению гидродинамической теории детонации.

Экспериментальными исследованиями Бертло и Вьеля, а особенно подробными исследованиями Диксона, с применением фотографического метода, проведенными в 80-х гг. XIX века, была установлена очень слабая зависимость процесса распространения детонации от условий опыта и параметров состояния газовой среды. Оказалось, что выше некоторого диаметра скорость детонации не зависит от диаметра трубы, в которую помещалась газовая смесь, не зависит от способов зажигания смеси, кривизны труб (спиральные трубы, зигзагообразные) и материала стенок трубы. Скорость детонации слабо зависела от физического состояния газовой смеси перед воспламенением (давления и температуры), но зависела от состава смеси. Указанные свойства позволяли рассматривать скорость детонации как физическую константу данной газовой смеси. Величины скоростей распространения детонации или, как этот процесс называли в тот период времени французские исследователи, «взрывной волны» (onde explosive) по своему порядку очень близки к средним скоростям теплового движения молекул в только что сгоревшем и еще разогретом газе. На основании этого Бертло и Вьель предполагали, что во взрывной волне передача тепловой энергии из зоны химической реакции происходит со скоростью молекулярного движения, возникающего в условиях адиабатичности превращения при постоянном давлении. Другими словами, они предположили, что при распространении детонационной волны основную роль играют процессы переноса. Затем появилась работа Г. Б. Диксона, в которой идеи Бертло и Вьеля были скомбинированы с идеей влияния звуковой волны. Но такая теория не давала удовлетворительного совпадения с экспериментом. По некоторым данным именно Г. Б. Диксон вместо понятия «взрывная волна» ввел термин «детонационная волна».

Гарольд Бейли Диксон (1852–1930)

Франсуа Эрнест Малляр (1833–1894)

Наиболее правдоподобные представления о явлении детонации имелись у Малляра и Ле-Шателье, однако свои предположения они не довели до соответствующего конкретного результата. Малляр и Ле-Шателье полагали, что значительное сходство в свойствах между детонацией и явлением распространения звука и сильное повышение давления при детонации позволяют рассматривать детонацию как процесс чрезвычайно быстрого сжатия и последовательного воспламенения газа в результате прохождения интенсивной волны сжатия, так называемой ударной волны, математическая теория которой была создана трудами Римана (1860), Ренкина (1870), Гюгонио (1887–1888) и получила развитие в работах Релея (1910).

Наиболее ясно и подробно эту идею развил в 1890 г. наш соотечественник В. А. Михельсон — профессор Московского сельскохозяйственного

института (теперь сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева). Он впервые попытался применить к явлению детонации готовые результаты теории волн конечной амплитуды. Результаты, полученные Михельсоном в 1890 г., были изложены в его диссертации «О нормальной скорости распространения пламени в гремучих газовых смесях».

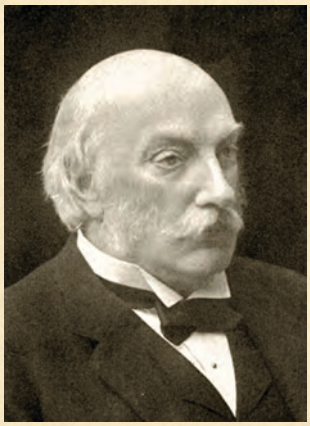
Согласно взглядам Михельсона, детонация отличается от обыкновенных звуковых волн нарушением непрерывности изменения некоторых физических параметров и наличием тепловыделения вследствие интенсивной химической реакции, что в сильной степени увеличивает упругость газа, но не столь значительно изменяет его плотность. В своей работе Михельсон отмечает: «Вероятно, распространение взрывной волны именно и обязано своим возникновением такому чрезвычайно быстрому адиабатическому сжатию последовательных слоев газа между уже воспламенившимся слоем, с одной стороны, и еще не успевшим сдвинуться с места холодным слоем — с другой...

Для того, чтобы пламя могло передаваться от одного слоя к другому, необходимо, чтобы уже воспламенившийся слой отдавал прилегающему еще холодному слою достаточно энергии, чтобы довести его до температуры воспламенения... В случае взрывной волны эта энергия передается в виде механической (давления, толчка) и уже только в новом слое мгновенно обращается в тепловую».

Движение волн с конечной амплитудой или ударных волн в инертной среде не происходит с постоянной скоростью. Она с течением времени уменьшается и, наконец, волна становится обычной звуковой волной. Экспериментальные результаты демонстрируют неизменность скорости распространения детонационной волны. Это указывает на то, что в детонационной волне имеются иные условия, которые не содержатся в обычной ударной волне. Очевидно, что эти условия создаются химической реакцией.

То, что акустическая волна произвольной формы сможет распространяться не деформируясь, т. е. стационарно, только в случае линейной связи давления и удельного объема, впервые отметил Ирншоу. В действительности адиабатическая связь давления нелинейна, и в этом заключается причина открытой Пуассоном и Стоксом и исследованной Риманом деформации акустических волн, приводящей к образованию ударных волн. В 1870 г. Ранкин, рассматривая движение волн конечной амплитуды и определяя условия их стационарности, пришел к выводу, что для того, чтобы нарушения непрерывности могли перемещаться в упругой среде не изменяясь, необходима определенная связь между давлением и плотностью.

Георг Фридрих Бернгард Риман (1826–1866)



Джон Уильям Стретт лорд Рэлей (1842–1919)

Пьер Анри Гюгонио (1851–1887)

Эрнст Мах (1838–1916)

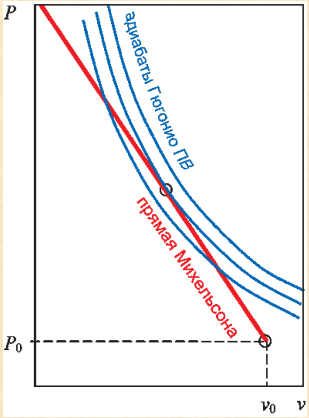
Рассматривая с термодинамической точки зрения детонационную волну, Михельсон в своих рассуждениях опирался на особый характер изменения состояния в волне и оценки конечного состояния при условии заданного стационарного значения скорости волны. В стационарно распространяющемся с одной определенной скоростью процессе, как бы ни протекала химическая реакция, удельный объем и давление вещества должны быть связаны между собой линейно. Данная связь в теории детонации получила название «прямой Михельсона» и была выведена на основе законов сохранения массы и количества движения на фронте ударной волны.

Уравнения Михельсона, указывающего закон изменения состояния в детонационной волне при

данной скорости, недостаточно для определения конечного состояния системы. Поэтому Михельсон в своих рассуждениях ограничивается оценкой температуры в детонационной волне для двух случаев: максимальной температуры и температуры, соответствующей максимуму энтропии. Максимальная температура соответствует точке касания изотермы к прямой Михельсона, а точка касания этой же прямой к адиабате Гюгонио для продуктов взрыва (ПВ) дает температуру, отвечающую максимуму энтропии. Рассматривая систему адиабат Гюгонио, соответствующих различным значениям энтропии, наш соотечественник показывает, что энтропия достигает максимума на прямой Михельсона лишь в точке касания к одной из семейства адиабат Гюгонио. По обе стороны от этой точки вдоль прямой Михельсона пересекающие ее адиабаты характеризуются меньшими значениями энтропии. Точка касания, с термодинамической точки зрения, является наиболее устойчивой, и поэтому состояние системы, отвечающее этой точке, является именно тем, к которому будет стремиться система в процессе самопроизвольного изменения состояния в детонационной волне.

Симеон-Дени Пуассон (1781–1840)

Владимир Александрович Михельсон (1860–1927)



P-v диаграмма

Оскар Моисеевич Тодес (1911–1989)

Условие постоянства скорости волны, принятое Михельсоном, являлось новым и важным условием, которое в некотором отношении подобно обычно рассматриваемым условиям изменения системы, таким, как изменение при постоянном давлении (изобарическим), при постоянном объеме (изохорическим). Не зная об этом исследовании Михельсона, наши соотечественники О. М. Тодес и С. В. Измайлов в 1934 г. вывели данную связь и назвали изовелой, т. е. отвечающей постоянной скорости, а Я. Б. Зельдович в 1940 г. назвал данную связь «прямой Тодеса», уточнив, однако, в 1944 г., справедливость названия последней «прямой Михельсона». В зарубежной литературе данная связь получила название «линии Релея», вероятно в связи с исследованиями Релеем в 1910 г. структуры фронта ударной волны.

Таким образом, базируясь на представлениях о детонации как об ударной волне с выделением энергии во фронте волны, Михельсон первым получил основную систему детонационных уравнений и выражение для скорости распространения детонации. В дальнейшем он не занимался исследованием этого вопроса.

Диссертация Михельсона осталась, по-видимому, неизвестной за границей. Поэтому, в последующем развитии теории детонации условие постоянства скорости, важное для правильного анализа явления, долгое время не использовалось, что привело к большим затруднениям в решении задачи о выборе того единственного режима процесса, который отвечает эксперименту.

Продолжительное время считалось, что первым, кто указал на важность применения законов ударных волн к проблеме взрыва, был А. Шустер (1893) — профессор физики университета в Манчестере. Кроме этого, считалось, что первая термодинамическая постановка проблемы детонации дана в 1896 г. французским профессором теоретической физики университета Бордо П. М. Дюгемом.

В 1899 г. руководитель одной из лабораторий Оксфордского университета Д. Чепмен развил математическую сторону теории детонации и рассчитал скорость детонации, предполагая, что она минимальная из возможных. Сама зона реакции не рассматривалась, но, как бы ни шла реакция внутри этой зоны, количество поступившего

в зону вещества равно количеству выданных продуктов; энергия вещества, поступающего в зону реакции (содержащего еще не высвобожденную химическую энергию), равна энергии продуктов реакции, покидающих зону реакции, в продуктах химическая энергия переходит в основном в тепловую. Чепмен в своих рассуждениях допустил, что в точке, отвечающей минимальной скорости детонации на адиабате Гюгонио, система должна обладать максимумом энтропии.

В большинстве случаев, со всей точностью, которую можно было бы разумно требовать в тот период времени, измеренная скорость детонации совпадала с минимальной скоростью, возможной вообще на адиабате Гюгонио прореагировавшего вещества. Последнее расценивалось как одно-

Сергей Валентинович Измайлов (1909–1985)

Артур Шустер (1851–1934)

Пьер Морис Дюгем (1761–1916)

Дэвид Леонардо Чепмен (1869–1958)

значное подтверждение справедливости гипотезы Чепмена.

Его работа инициировала вопрос отбора скорости детонации, отвечающий стационарному режиму. Д. Чепмен, за рубежом считающийся автором гидродинамической теории детонации, первый предложил гипотезу о том, что детонации соответствует минимальная скорость, которая на графике в координатах P-v изображается прямой, касающейся кривой Гюгонио в некоторой точке. Опыт оправдал это предположение, однако теоретическое обоснование такого отбора было неубедительным. Оказалось, что точка касания являлась одновременно и точкой касания к адиабате Пуассона, отвечающей изоэнтропическому процессу. При этом взаимном расположении адиабаты Пуассона и адиабаты Гюгонио, в точке касания должен быть минимум энтропии, а не максимум, как думал Чепмен.

В 1905–1906 гг. французский профессор теоретической механики Горного института Сент-Этьенна Э. Жуге независимо от Чепмена, пользуясь законами сохранения и рассматривая энтропию процесса, показал, что последняя достигает минимума в точке на кривой Гюгонио, которая соответствует звуковой скорости продуктов реакции относительно фронта детонационной волны. Эта точка была постулирована им как определяющая скорость детонации и состояние продуктов реакции. Позже условие минимума энтропии было получено Беккером.

При этом следует отметить, что сравнивались состояния не вдоль прямой Михельсона, как собственно это делал сам Владимир Александрович, а на кривой Гюгонио. Каждая из точек этой кривой соответствует разным скоростям, т. е. разным прямым Михельсона и, следовательно, разным явлениям, разным процессам. А значит, нет противоречия в том, что в одной точке достигается максимум вдоль прямой Михельсона и минимум вдоль адиабаты Гюгонио.

Соответствующий режим распространения детонации в изложении Жуге отличается тем замечательным свойством, что скорость распространения звука в продуктах сгорания в точности равна скорости распространения детонации относительно продуктов сгорания. Эквивалентность гипотез Чепмена и Жуге была строго доказана в 1907 г. французом, профессором Горного института в Сент-Этьенне Л. Крюссаром.

Позже, в подробных теоретических исследованиях Жуге и Крюссара, выбор точки в координатах P-v, определяющей скорость детонации, обоснован в значительно большей степени. Они показали чисто аналитически, что все волны, за исключением волны, отвечающей касанию прямой постоянной скорости к адиабате Гюгонио, должны перемещаться с ускорением (положительным

или отрицательным). Для состояний, лежащих выше точки касания прямой Михельсона к адиабате Гюгонио, волна разрежения, движущаяся со скоростью звука в продуктах взрыва, догоняет фронт детонации и ослабляет его. Ускорение отсутствует только в точке касания. Физически это связано с тем, что в этой точке скорость распространения ударной волны по отношению к среде, движущейся за фронтом, равна скорости распространения звуковой волны. Таким образом удалось доказать невозможность построения стационарного режима детонации для состояний, отвечающих верхним пересечениям прямой Михельсона и адиабаты Гюгонио.

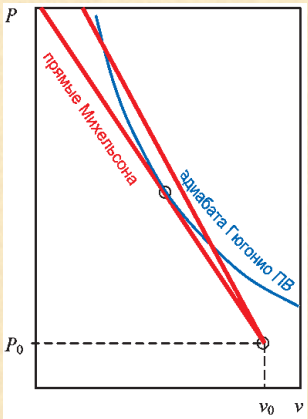
Однако многочисленные попытки исключить при помощи гидродинамических или термодинамических аргументов состояния, отвечающие нижним пересечениям прямой Михельсона и динамической адиабаты, оказывались неубедительными и ошибочными. Важнейшей задачей гидродинамической теории детонации оставалась задача строгого обоснования единственно возможного режима распространения детонации, отвечающего минимальной скорости.

Необоснованность единственно возможного с точки зрения гидродинамической теории детонации режима распространения детонации, или, другими словами, необоснованность условия Чепмена – Жуге, побуждала исследователей к построению альтернативных теорий распространения детонации.

Уместно в этой связи упомянуть о попытке построить теорию детонации с позиций чисто химических. Такая попытка была сделана Б. Льюисом, который предположил, что детонация есть процесс быстрой передачи реакции от слоя к слою газа посредством активных центров, которые выбрасываются из зоны горения и движутся со средней поступательной скоростью молекул, отвечающей температуре зоны горения. Соответственно этому, скорость детонации отождествлялась со скоростью движения тех или иных молекул, атомов или радикалов в продуктах реакции. Сторонники данной теории так и не смогли прийти к единому мнению, какая именно — средняя или среднеквадратическая, или еще какая-нибудь скорость молекул должна войти в расчет. К тому же, как показали расчеты, теория недостаточно хорошо согласовывалась с экспериментом. Льюис указывал на желательность слияния его «цепной теории скорости детонации» с гидродинамической теорией Михельсона – Чепмена – Жуге. Последователи гидродинамической теории детонации придерживались мнения, что она вряд ли что-нибудь выиграет от такого слияния.

Жак Шарль Эмиль Жуге (1871–1943)

Жюль Луи Крюссар (1876–1959)



P-v диаграмма

Ричард Беккер (1887–1955)

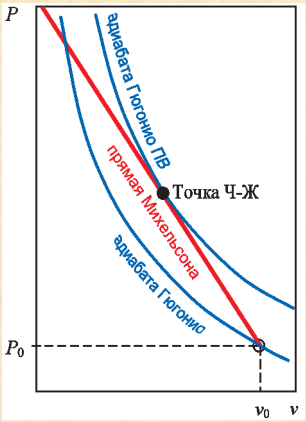
Курьеза ради, можно упомянуть о «резонансной теории детонации», согласно которой квантово-механический резонанс между состояниями среды до и после прохода детонационной волны, мистическим образом способствует протеканию химической реакции. По сути, данные взгляды были неудачным развитием «синхронической теории детонации», предложенной Ф. А. Абелем в 1861 г.

Против поджигания ударной волной выступал также немецкий исследователь Р. Беккер — первоначально биолог по образованию. Он защитил кандидатскую, а впоследствии и докторскую по зоологии. Воодушевленный лекциями, прочитанными А. Зоммерфельдом, он увлекся физикой, занимался изучением взрывчатых веществ, а в 1922 г. защитил докторскую диссертацию под руководством М. Планка. По аналогии с теорией

ударной волны Р. Беккер полагал, что в переносе реакции от слоя к слою играет роль теплопроводность. При этом Беккер, не исследуя более подробно вопрос, указывает на пример распространения ударной волны, в которой рост энтропии происходит в последнем счете за счет диссипативных процессов, прежде всего теплопроводности во фронте. «Теплопроводностная теория детонации» не подвергалась обоснованной критике вплоть до 1940 г., когда Я. Б. Зельдович строго показал необоснованность данной теории и, более того, попытался выяснить внутренние причины ошибки Беккера.

Несмотря на широкий выбор теорий, объясняющих природу распространения детонации, подавляющее большинство исследователей были

Вальтер Герман Нернст (1864–1941)



P-v диаграмма

сторонниками гидродинамической теории. При этом внешняя аналогия теории детонации и теории ударной волны сыграла злую шутку со сторонниками гидродинамической теории. В ударной волне, как известно, изменение состояния происходит на длине свободного пробега молекул в газе. Аналогия детонации и ударной волны наталкивала исследователей на мысль, что фронт детонации столь же резок, как и фронт ударной волны. В пользу «мгновенной реакции» высказывался Жуге. Можно думать, хотя это явно не формулировалось, что подавляющее большинство сторонников гидродинамической теории предполагали практически мгновенное химическое превращение после адиабатического сжатия в ударной волне.

Несмотря на это, работы, подтверждающие гидродинамическую теорию детонации, продолжали появляться. Так, например, исследование вопроса возникновения ударной волны при сжатии газа поршнем позволило Жуге в 1904 г. и Дюгему в 1906 г. доказать, что волны, появляющиеся в газе при движении поршня с ускорением, догоняют друг друга (кумулируются) и образуют мощную ударную волну.

Позже, в 1920-х гг., рассматривая пересжатую детонационную волну, Г. Нернст и Р. Вендлант подчеркнули аналогию с простой ударной волной без химической реакции, которая также догоняется и ослабляется волнами разрежения сзади. Напротив, детонационная волна, для которой выполняется условие Чепмена – Жуге, подобна звуковой волне и обращается в звуковую волну при тепловом эффекте реакции, стремящемуся к нулю.

Так, в начале XX века были сформулированы основные положения гидродинамической теории детонации. Полученное Михельсоном, Чепменом и Жуге решение, несмотря на его теоретическую необоснованность, давало хорошее совпадение с экспериментальными результатами. Большое количество измерений скорости детонации, произведенных различными авторами, давали величины, неизменно совпадающие с расчетами по теории Михельсона – Чепмена – Жуге (МЧЖ). Однако теория МЧЖ не объясняла ряда явлений и, самое главное, пределов распространения детонации.

Яков Борисович Зельдович (1914–1987)

В 1940 г. Я. Б. Зельдович отметит: «Вплоть до последнего времени гидродинамическая теория скорости детонации, прекрасно подтвержденная на опыте, создавала иллюзию успокоенности, не побуждала к поискам механизма химических реакций, к исследованию условий на фронте детонационной волны».

СМИРНОВ Евгений Борисович – научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИТФ

ПРОСВИРНИН Кирилл Михайлович – младший научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИТФ