

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОТКРЫТИЯ ЯВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ: К 130-ЛЕТИЮ ТЕОРИИ ДЕТОНАЦИИ В. А. МИХЕЛЬСОНА

1 Введение

В истории науки редко удается провести границу открытия того или иного физического явления, а тем более — возникновение теории, правильно его объясняющей. Явление детонации и его теория не являются исключением. Самые первые научные идеи о детонации были высказаны еще Антуаном Лавуазье в XVIII в. Однако только после инструментальных исследований, позволивших установить *постоянство скорости распространения* детонации, были сделаны успешные шаги по созданию теории, согласующейся с экспериментальными результатами. (Интересный подход к изложению вопросов истории теории детонации представлен в работах современных авторов [1, 2]. Однако при всем нашем уважении к труду коллег хотели бы высказать свое несогласие с некоторыми подходами. Так, в историческом обзоре не дано ни одной ссылки на оригинальные работы тех ученых, идеи и результаты исследований которых излагаются, «троичная схема» развития (индукция → кульминация → сжатие) в приложении к реальным историческим процессам представляется заведомо упрощенной.)

Первенство в разработке основ современной теории детонации следует отдать Владимиру Александровичу Михельсону. Однако работа Михельсона (1890) после ее публикации в России стала известна на Западе через десятилетия, а развитие теории самим Михельсоном в 1920 г. не учитывало результаты исследований в этой области, полученные перед и во время Первой мировой войны. Постараемся восстановить реальную историю.

2 О терминологии второй половины XVII — первой половины XIX веков

Термин «детонация», пришедший в европейские языки из латыни, стал известен в последней четверти XVII в. (см., например, [3]), т. е. за 200 лет до

создания *теории явления*. Под детонацией понимали *гремучий взрыв*, низвергающий гром, полагали, что «*гремучий взрыв* изгоняет сернистые и ртутные части тела» [3]. В словаре начала XVIII в. [4] термин «детонация» упоминается несколько раз, в том числе и при описании опытов Бойля по разложению *селитры* в тигле. Р. Бойль вносил горящий древесный уголь, который удалял летучие компоненты, так, что при дальнейшем *детонации* не происходило; когда же селитряную смесь бросали ложка за ложкой в раскаленный до красна тигель, то каждая порция сопровождалась *детонацией* [4]. По сути, термин *детонация* в XVII–XVIII вв. обозначал сильный звуковой эффект, сопровождающий быстрое горение твердых компонентов, приписываемый быстрому истечению газообразных фракций, эффект, аналогичный взрыву, но при этом *детонация* и *горение* различались. Число детонационноспособных веществ и составов к концу XVIII в. значительно возрастает, это: порох, смеси селитры и солей азотистой кислоты с металлами [5], гремучее золото (*fulminating gold*) [6] и т. п.

Открытие кислорода и водорода, газообразная смесь которых способна взрываться, вызывая при *детонации* страшный шум [7], привело к смещению акцентов в различий понятий *взрыва* и *детонации*. Директор Горной школы (Франция) Б.-Ж. Саж считал: «Эти два явления, которые происходят одновременно, возникают от разных причин. Детонация — это шум, производимый при соединении двух частей горючего газа и одной части кислородного газа» [8]. В то же время Ф. Р. Куро писал о *громкой детонации*, которая возникала при собирании металлического калия железным пестом [9]. К середине XIX в. представление о детонации мало изменилось: «Когда химическое разложение или соединение протекает внезапно и сопровождается пламенем и взрывом, то часто говорят, что это вызвано детонацией» [10]. Согласно [10] детонируют и смесь водорода с кислородом, будучи инициированной электрической искрой, и смесь фосфора с хлоратом калия при ударе молотком.

3 Детонация по Лавуазье

В 1789 г. на французском языке [11], а через год в переводе Р. Керра на английском [12], выходит «Трактат по элементарной химии» А. Лавуазье, в котором дается объяснение явления детонации. Отметим, что в оригинале термин *детонация* встречается более 30 раз только во II томе, а в переводе на английский всего трижды в обоих томах. Лавуазье пишет “L’oxygène *par la détonation* avec le charbon change de nature, & il se convertit en acide carbonique”; английский перевод звучит так: “As oxygen is changed, *by deflagration* with charcoal, into carbonic acid. . .”, так написано потому, что переводчик не различает термины *дефлаграция* и *детонация*. Однако в ряде случаев термин детонация все же им сохраняется: «Именно этот внезапный переход из плотного (конденсированного) состояния в аэроформное (газообразное) называется детонацией, потому что действительно он сопровождается обычно треском и грохотом» [11, р. 203], читаем мы по-французски и по-английски. А. Лавуазье обрисовал картину физического явления, которая может являться отправной точкой для изучения детонации:

«Внезапного и мгновенного разложения и расширения этих газов недостаточно, однако, для объяснения всех явлений детонации; потому что, если бы это была единственная причина, то порох всегда был бы более мощным пропорционально количеству газа, выделяющегося за данное время, что не всегда соответствует эксперименту. У меня была возможность экспериментировать с порохами, которые производили почти вдвое больший эффект по сравнению с обычным порохом, хотя при детонации они выделяли на одну шестую газа меньше. По-видимому, количество теплорода, выделяющегося при детонации, в значительной степени способствует производимому действию, и это может мыслиться по нескольким причинам. Во-первых, поскольку, хотя теплород и способен свободно проникать сквозь поры всех тел, он, однако проникает постепенно за определенное время, следовательно, когда количество его, выделившееся сразу, слишком велико, т. е. намного больше того, если так можно выразиться, чтобы пройти через поры тел, то теплород действует таким же образом, как и обычные упругие жидкости, и опрокидывает все, что препятствует его распространению. Это должно, по крайней мере частично, происходить, когда в пушке поджигают порох; так как, хотя металл проницаем для теплорода, количество его, выделившееся сразу, слишком велико, что оно не находит быстрого выхода сквозь поры металла, теплород давит с усилием во все стороны, и именно это

усилие используется для разгона пули» [11, р. 204–205].

В качестве второй причины детонации Лавуазье указывает на увеличение сил отталкивания между молекулами, вызываемое теплородом, тем самым теплород вызывает расширение газов при воспламенении, пропорциональное температуре. По сути, Лавуазье указывает на адиабатический характер процесса.

4 Исследования Абеля и Нобла

С появлением новых взрывчатых составов в XIX в. работы по исследованию детонации активизировались (1800 г. Edward C. Howard — иницирующие фульминаты ртути и серебра; 1846 г. Christian F. Schönbein — пироксилин (gun-cotton); 1848 г. Ascanio Sobrero — нитроглицерин; 1859–1861 гг. Леон Николаевич Шишков — тринитро- и тетранитрометан; 1863–1867 гг. Alfred Nobel — капсюль-детонатор, динамит и др.). Существенное продвижение в понимании явления детонации связано с исследованиями Ф. Абеля (Frederick A. Abel) и Э. Нобла (Andrew Noble) в 1860–1870-х гг. Появились новые экспериментальные возможности, в частности хроноскоп Э. Нобла, позволявший производить измерения с микросекундным временным разрешением [13]. Исследуя процесс инициирования, Абель пришел к идее, что инициирование нитроглицерина детонирующим зарядом обусловлено, отчасти, *механическим действием детонации*, не зависимым от теплового [14, р. 497].

Рассмотрим хронологию.

В 1869 г. в серии опытов Ф. Абель инициирует пироксилин, насыщенный нитроглицерином. По завершении опытов Абель приходит к заключению, которое можно рассматривать как первый шаг к пониманию механизма детонации: инициирование *вызывается либо механическим действием детонации, т. е. работой, совершенной над частицами вещества, подверженных удару или сотрясению, либо нарушением химического равновесия во взрывчатом веществе, вызванным резким и своеобразным характером сотрясения или мощным колебательным импульсом* [14, р. 501].

В 1873 г. появилась первая краткая статья с результатами по скорости детонации [15]. В сообщении подчеркивалась высокая скорость *распространения* детонации, которая превышала и скорость полета снарядов, и скорость звука, уступая лишь скорости света и электричества. В развернутой публикации результатов работы Ф. Абеля в 1874 г. [16] раздел VII имеет неслучайное название «О скорости детонации или скорости, с которой детонация пе-

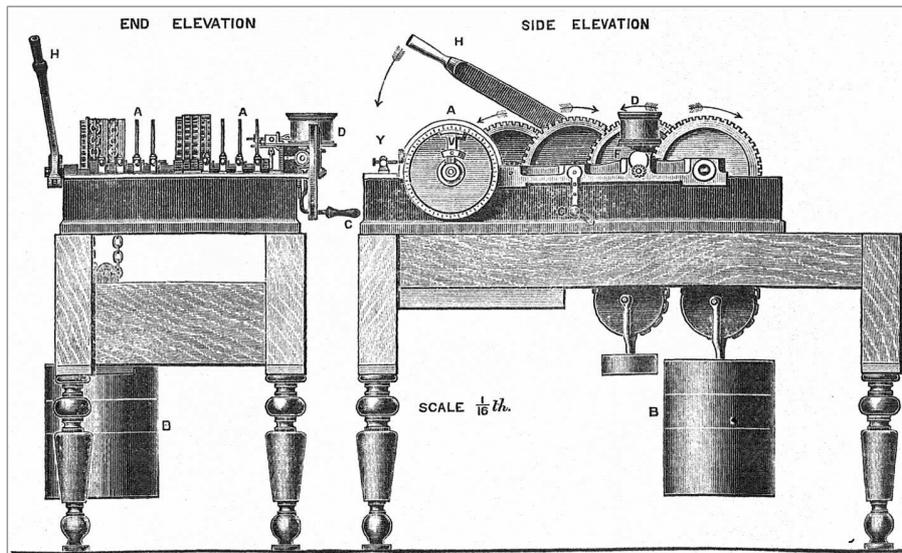


Рис. 1 Хроноскоп Э. Нобля [13]

редается», поскольку оно отражает понимание измеряемой скорости скорее не как характеристики процесса детонации как явления, а как скорости передачи детонации от одного заряда к другому, например пироксилина.

Измерения скорости детонации проводились с помощью хроноскопа Э. Нобля (рис. 1). Время прохождения детонационной волны по заряду или при передаче детонации от одного заряда к другому определялось по отметкам на вращающихся дисках. Отметки возникали при высоковольтном разряде между кондукторами вторичной обмотки индукционной катушки Румкорфа при размыкании первичной. В опытах происходил разрыв продуктами взрыва изолированных шелком медных проволок первичной обмотки, помещенных на различных базах измерений. Хроноскоп состоял из серии тонких дисков AA, приводимых в движение с фиксированной скоростью тяжелым нисходящим грузом В, который перед опытом поднимается рукояткой Н. Точная скорость дисков определялась с помощью секундомера. При настроенной работе прибора случайная погрешность единичного измерения составляла 4–5 миллионных долей секунды.

Для измерения скорости передачи детонации Абель использовал различные постановки опытов. В одной из них цилиндрические шашки пироксилина выстраивались на доске и соприкасались боковыми поверхностями, при этом детонация от заряда к заряду передавалась со средней скоростью $\langle D \rangle = 5,2$ км/с. В другой постановке заряды пироксилина укладывались в ряд так, чтобы торец каждого заряда был плотно прижат к торцу другого. Измерения показали, что на первой базе, длиной 4 фут,

$D = 5,54$ км/с, на последней — $D = 5,78$ км/с, $\langle D \rangle = 5,75$ км/с. Результаты, полученные во второй постановке, мы сегодня бы трактовали как данные по скорости детонации. Из опытов Аделя следовало, что детонация в пироксилине, нитроглицерине и смесях на их основе распространяется с постоянной сверхзвуковой скоростью и увеличивается с ростом плотности зарядов. В 1870-е гг. Абель еще не до конца увязывает механизм распространения детонации и скорость процесса в одну единую картину. Вот как, например, он объясняет низкие скорости передачи детонации между разнесенными зарядами нитроглицерина: передача детонации сильно замедляется стремлением частиц жидкости «ускользнуть» от удара детонации [16, р. 386].

На основе анализа результатов экспериментов Ф. Абель высказывает гипотезу о «синхроническом» механизме детонации. По Аделю, «... сходство характера или синхронизм колебаний, возникающих при взрыве определенных веществ, может способствовать детонации одного из таких веществ путем первоначальной детонации небольшого количества другого вещества, в то время как при отсутствии такого синхронизма необходимы гораздо более мощная начальная детонация или применение гораздо большей силы для детонации исследуемого вещества» [16]. Впервые на русском языке результаты Аделя и их анализ были изложены И. М. Чельцовым в [17].

Обобщающие лекции Э. Нобля 1890-х гг. [13] показывают, как изменились представления за 20–25 лет, прошедшие после первых совместных исследований с Ф. Аделем. По Ноблю, в конце XIX в. существовал широкий спектр мнений, что такое настоящая детонация [13, р. 531]. Чтобы отличить

явление детонации от других (быстрое горение, взрыв), Нобл анализирует, например, *максимальные давления*, которые измеряются при подрыве заряда (кордит, пироксилин) в оболочке, помещенной, в свою очередь, во взрывную камеру: давления измеряются и в оболочке перед ее разрывом, и в камере. При этом он делает вывод, что достигаемое в таких условиях *высокое давление* не является исключительным признаком детонации [13, р. 469–470]. Другим возможным признаком Нобл называет *высокие температуры*, вызванные быстрым сгоранием, о которых судит косвенно, а также *сильный дробящий эффект*, в результате которого оболочка заряда разлетается на мелкие осколки [13, р. 474]. Нобл ставит вопрос: *различаются ли продукты взрыва при горении и детонации* одного и того же вещества, но акцентирует внимание лишь на том, что в случае инициирования детонации датчики и взрывная камера сильно разрушаются [13, р. 533]. Описывая разные случаи детонации зарядов, Нобл употребляет важный для дальнейшего понимания явления термин “imperfect detonation”, т. е. неполноценная, незавершенная детонация, в другом месте он пишет: “detonation was not perfect” [13, р. 532]. Таким образом, работы Абея и Нобла углубили представления о явлении детонации, прежде всего за счет *инструментальных исследований*, а также за счет более четкого представления о ее внешних проявлениях. В отличие от первых работ Ф. Абея, говоря о скорости детонации, Нобл использует глагол “to travel”, перемещаться, одинаково применяя его к движению пластины, пули, газа и *детонации*.

5 Работы Бергло и Вьеля

Работы Э. Ф. Малляра и Г.-Н. Ле Шателье, а также М. Бергло и П. Вьеля **1880-х гг.** по газовой детонации хорошо известны в том смысле, что практически любое введение в современную теорию детонации в своем историческом экскурсе начинается с упоминания этих работ (см., например, [18]). Остановимся на общих представлениях о механизме детонации по Бергло [19].

Во-первых, Бергло предлагает рассматривать протекание реакции во взрывчатом веществе с трех сторон: ее *природы*, *длительности* и *распространения*.

Во-вторых, он полагает, что при достаточно быстрой реакции выделяющееся количество теплоты не успевает рассеяться за счет излучения и теплопроводности, а может, практически полностью, передаваться продуктам реакции, приводя к резкому повышению давления.

В-третьих, Бергло различает скорость протекания реакции на молекулярном уровне и скорость ее распространения — по веществу. Для газовых смесей Бергло в рамках атомно-молекулярной гипотезы и модели идеального газа выстраивает теорию, согласно которой скорость детонации определяется скоростью движения молекул. Впоследствии это оказалась неверным, но тем не менее для смеси водорода с кислородом были получены близкие значения расчета и эксперимента [19, с. 103].

В-четвертых, работы Бергло и Вьеля позволили сделать существенный шаг в понимании механизма детонации конденсированных веществ. По Бергло, детонация происходит в условиях, когда взрывчатое вещество практически в своем первоначальном объеме развивает максимальные температуру и давление, и, соответственно, максимальную скорость реакции при ударном воздействии. Детонация вызывается очень быстрым ударом (*shock*); газы, образующиеся в месте ударного воздействия, не имеют времени, чтобы сместиться куда-либо, быстро расширяясь, они производят ударное воздействие на последующие слои и передают им энергию в виде количества теплоты, что в свою очередь приводит к подъему температуры до точки, когда новый взрыв способен произвести ударное воздействие, и таким образом по веществу воздействие распространяется с некоторой регулярностью — взрывная волна (*explosive wave*) [19, с. 55]. Послойное (шаг за шагом) горение и детонация рассматриваются Бергло как два предельных случая химического реагирования взрывчатого вещества. Бергло описывает вышеприведенную картину в терминах, если говорить по-английски, *shock* и *explosive wave*, но он не использует еще слов ни *shock wave*, ни *detonation wave*, однако уже Г. Б. Диксон (Harold B. Dixon) в 1902 г. поставит между терминами *explosive wave* и *detonation wave* знак равенства (“...the rate of the “detonation-wave” (l’onde explosive)...” [20]), и к тому, чтобы говорить о *детонационной волне*, были уже веские основания.

6 Работы Диксона

Работы Диксона [20–23] интересны не только его собственными результатами и обзором предшествующих работ, а также тем, что они дали мощный импульс к созданию теории *детонации*. Отметим, прежде всего, что в **1880-е гг.** для анализа процессов горения и детонации в газах был *применен фотографический метод* в работах самого Диксона, а также Э. Ф. Малляра и Г.-Н. Ле Шателье — во Франции, А. А. фон Эттингена и Р. А. фон Гернета — в России. По Диксону, фотографии, сде-

ланные ими в 1888 г., показывают прохождение волн, резко отраженных назад и вперед от концов трубки и постепенно уменьшающихся по интенсивности и скорости. Эти видимые волны, согласно Эттингену и Гернету, представляют собой не картину самого процесса сгорания, а волны сжатия, проходящие через продукты сгорания после завершения взрыва [20]. Фотографический метод на протяжении последующих лет стал важным инструментом исследования детонационных волн и верификации теоретических представлений. Идея, высказанная Диксоном в 1893 г. и подтвержденная экспериментально [21], о том, что скорость детонации соотносится со скоростью звука в горящем газе [20] подвинула Д. Л. Чепмена к созданию теории в 1899 г. К 1890-м гг. в области детонации твердых, жидких и газообразных взрывчатых составов было определенно установлено, что это явление обладает своими отличительными чертами: высокими развиваемыми давлением и температурой, *постоянной скоростью распространения*, которая выше скорости звука во взрывчатом составе. Разрабатываемая теория детонации должна была, в частности, объяснить постоянство скорости и ее величину.

7 Теория детонации и ее развитие в работах Михельсона

Диссертация В. А. Михельсона (1890), ее содержание и значение подробно рассмотрены в статье Н. Мансона [24], в которой выводы основных уравнений Михельсона даны в современных обозначениях. Уточним несколько аспектов, опираясь на научную биографию В. А. Михельсона [25, 26].

По словам самого Михельсона, идея диссертации возникла у него в 1883–1884 гг. на практике в лаборатории В. В. Марковникова, позже в 1885 г. задачи исследования обсуждались с А. Г. Столетовым [27, с. XIII–XIV]. В начале работы вопрос о взрывной волне, тем более о теории детонации, не стоял. С осени 1887 г. Михельсон работал в Берлине в лаборатории Г. Гельмгольца, которого сменил А. Кундт (рис. 2).

Основной массив экспериментальных данных был получен В. А. Михельсоном в Берлине, результаты были направлены в *Annalen der Physik* в декабре 1888 г. Название этой работы (1889), доложенной В. А. Михельсоном на заседании Берлинского физического общества 8 февраля 1889 г. и опубликованной в виде краткого реферата «О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей» [28], можно перевести аналогично названию диссертации: «О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей» [29]. В том же году он уезжает в Париж на Всемирную выставку (май–октябрь 1889 г.), откуда по состоянию здоровья возвращается в Россию. В феврале 1890 г. диссертация представлена к защите на степень магистра. В журнальной публикации в выводах указываются четыре пункта, а в диссертации (1890) — семь. Для настоящей статьи важен первый пункт, который появился в диссертации:

«Взрывная волна и пламя Бунзена представляют два крайних и типичных способа воспламенения взрывчатых газов. (Это переключается с идеями Бертло — авт.) Первая соответствует почти адиабатному сжатию газов до температуры воспламенения, второе — чисто теплопроводному распространению реакции» [30, с. 91]. Работа Михельсона опиралась не

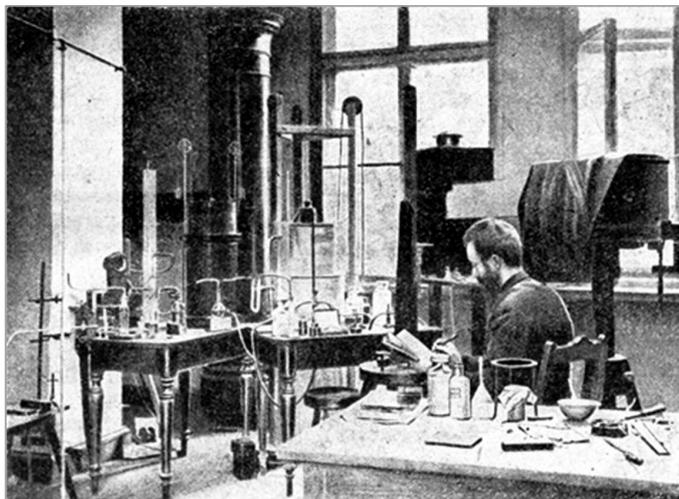


Рис. 2 В. А. Михельсон в лаборатории Г. фон Гельмгольца [27]

только на его собственные экспериментальные данные, но и на результаты работ зарубежных (Вьель, Бертоло, Ле Шателье, Ренкин, Гюгонио) и отечественных ученых (Эттинген, Гернет [31]); работы Гюгонио и Эттингена были опубликованы уже во время пребывания Михельсона в Берлине.

Соотношение, полученное Михельсоном для состояний до и после фронта взрывной волны с учетом удельной теплоты сгорания вещества (у Михельсона теплота умножена на механический эквивалент) и его комментарий даны ниже:

$$p_2 = \frac{1}{\gamma + 1} \left(m^2 v_1 + p_1 \pm (m^4 v_1^2 - 2m^2 (Q(\gamma^2 - 1) + v_1 p_1 \gamma) + p_1^2 (\gamma^2 + \gamma + 1))^{1/2} \right).$$

«Так как теплота сгорания Q в большинстве взрывчатых смесей очень значительна, то это уравнение показывает, что для p_2 получаются действительные значения лишь при очень больших значениях «массовой скорости» m . Взрывная волна постоянного типа с малою скоростью распространения немыслима. Неравенство, показывающее, что подкоренное количество должно быть положительно, *дает нам низший предел возможной скорости постоянной взрывной волны.* (Мансон полагает, что Михельсон выделил «существование особой, имеющей минимальную скорость детонационной волны», представляется, что Михельсон не делает в 1890 г. упор на особенность минимальной скорости.) Два знака в уравнении соответствуют: положительный — действительно наблюдаемой сгущенной волне, отрицательный — волне разреженной, мыслимой только в том случае, если бы посредством внезапного разрежения мог возбуждаться химический процесс, поглощающий теплоту и тем поддерживающей разрежение» [30, с. 42].

Не защитившись, **весной 1890 г.** по состоянию здоровья Михельсон уезжает в Швейцарию, где работает над другими вопросами физики. По возвращению в Россию в **сентябре 1894 г.** на защиту выносятся восемнадцать положений, семь из которых приведены в варианте 1890 г., к ним добавлены еще два:

8. Достижимые в сгораемом слое взрывной волны максимальные давления значительно выше, чем получаемые из опыта «эффективные» давления. Эти максимальные, скоро проходящие давления могут быть приблизительно вычислены на основании данной в настоящей работе теории взрывной волны.
9. При взрывах в закрытых сосудах возникают более или менее сильные колебания газообразных

продуктов взрыва, соответствующие основному и высшим гармоническим тонам употребляемого сосуда [27, с. 161].

Остальные девять положений касались теории излучения, вектор интересов Михельсона как ученого изменился уже к защите диссертации. Согласно [26], в 1890-е гг. текст диссертации публикуется трижды.

В 1920 г. В. А. Михельсон получает предложение включить его диссертацию, наряду с работами Малляра, Ле Шателье, Бергло и др., в общий сборник, для предполагаемого издания он начинает переработку диссертации, однако в виду того, что издание не состоялось, работа осталась незаконченной: были переработаны две главы, в том числе и материал, касающийся теории взрывной волны. Сравнение двух вариантов: варианта 1890-х гг. и варианта, отредактированного В. А. Михельсоном в 1920 г. (опубликовано в **1930 г.** [27]) дано в [24]. Анализ новой редакции диссертации представлен Л. Н. Хитриным в [32, с. 262–270] в 1957 г., когда работа В. А. Михельсона носила уже исторический и учебный характер, при этом Хитрин не анализировал различия вариантов работы 1890 и 1920 гг. Предполагаем, что переработка главы, посвященной взрывной волне, была предпринята в связи с *экспериментальной* частью работы Диксона [21] 1893 г. и ее теоретической части, включая комментарий Шустера, которые касались термодинамического подхода; данные этой работы неоднократно упоминаются и анализируются Михельсоном [27, с. 118–124]. По-видимому, это работа была известна В. А. Михельсону еще при защите диссертации, но ее анализ не был включен в текст, написанный в 1890 г. Последняя публикация В. А. Михельсона в журнале Русского физико-химического общества (август 1894 г.), всецело относящаяся к материалу его диссертации, но в части измерения скоростей горения, — это ответ на обзор Е. Бути, напечатанный в 1893 г. в “Wiedemann’s Annalen der Physik und chemie”. Изложим в нескольких пунктах идеи Михельсона, касающиеся теории взрывной волны в редакции 1920 г.

1. Прямая AB , изображаемая уравнением Ренкина $p + m^2 v = p_1 + m^2 v_1 = k$, где p — давление, m — массовая скорость, v — удельный объем, пересекает ряд изотерм и касается одной из них ($T_3 = T_{\max}$), соответствующей максимальной температуре во взрывной волне при выполнении условий Ренкина (рис. 3).
2. В первом приближении, применяя уравнение состояния идеального газа, можно вывести вы-

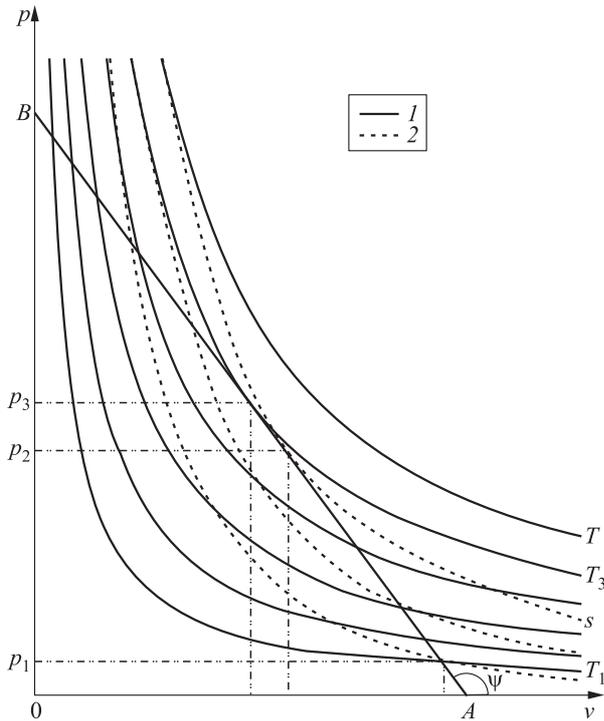


Рис. 3 Изотермы и адиабаты Пуассона при детонации, по Михельсону ($\operatorname{tg} \psi = -m^2$): 1 — изотермы; 2 — адиабаты

ражения для температуры и давления во взрывной волне, которые связаны с ее скоростью c :

$$T_{\max} = T_3 = \frac{c_2}{3R}; \quad p_3 = \frac{mc}{2},$$

где R — газовая постоянная.

- Полученные выражения для температуры и давления согласуются с *условием* Ренкина–Римана, но не указывают, достижимы ли они во взрывной волне. Ответ на этот вопрос содержится в возможности совместимости условия с достижением максимума энтропии, геометрически — это точка касания прямой AB адиабаты Пуассона.
- Температура T_2 , соответствующая максимуму энтропии на прямой Ренкина, близка к значению T_3 :

$$T_2 = \frac{\gamma}{(\gamma + 1)^2} \frac{k^2}{m^2 R},$$

где $\gamma = c_p/c_v$.

- Используемый подход при решении поставленной выше задачи, в рамках которого оперируют энтропией одного идеального газа, является первым грубым приближением. Полученные

выражения для T_3 и T_2 являются максимальными, пересечение прямой AB с линией равновесной реакции может привести к таким же значениям либо к более низким. Изэнтропические линии реагирующего газа в предположении одинакового числа молекул реагентов и продуктов для реагирующей смеси суть не обычные адиабаты Пуассона, а некоторые промежуточные линии между изотермами и адиабатами однородного газа.

В XIX в. различали *передачу детонации* от слоя к слою, которая происходила быстро, но с конечной скоростью, и *собственно детонационное превращение*, которое происходит мгновенно. Остановимся на понимании «мгновенности», по Михельсону (1890).

«...самое сгорание происходит уже чрезвычайно быстро, в сильно взрывчатых смесях почти мгновенно. (...) В случае взрывной волны эта энергия передается в виде механической (давления, толчка) и уже только в новом слое мгновенно обращается в тепловую» [30, с. 23]. «... весьма вероятно, что выше приведенное число /величина давления авт./ значительно преувеличено, так как в изложенной нами теории взрывной волны сгорание предположено полным и мгновенным, т. е. вовсе не сопровождаемым диссоциацией» [30, с. 42].

По Михельсону, мгновенность есть некоторое предположение рассматриваемой модели. Проводя анализ для конкретных газовых смесей (1920), Михельсон делает следующие замечание:

«...теплота Q , выделяемая в головной части волны, т. е. в том слое, в котором происходит быстрое возрастание давления по закону Ренкина, составляет от 1/3 до 1/2 полной теплоты сгорания. (...) Из этого однако никоим образом нельзя заключить, что действительно 1/3 или даже 1/2 смеси уже сгорает в указанном головном слое (...), в указанном головном слое во всяком случае не происходит полного сгорания смеси. Происходит ли в нем вообще сгорание хотя бы малой части смеси, это пока остается под вопросом» [27, с. 124–125].

Можно в приведенных словах увидеть дальнейшее развитие представлений В. А. Михельсона о детонации по сравнению с 1890 г., в какой-то мере и предвосхищение идей Я. Б. Зельдовича. Теория взрывной волны в редакции 1920 г. видится сегодня более цельной, чем в первом варианте диссертации.

Взрывная волна рассматривается Михельсоном как изэнтропическая, хотя можно думать, что выделенный нами п. 5, содержание которого вынесено Михельсоном в примечания, говорит о понимании им более сложного, с точки зрения термодинамики, характера взрывной волны. Существенно примеча-

ние, которое сделал Л. Н. Хитрин: в точке Жуге прямая Ренкина касательна и к адиабате Пуассона и к адиабате Гюгонио, для состояний, лежащих на адиабате Гюгонио продуктов, — энтропия в этой точке минимальна, для состояний, удовлетворяющих уравнению Ренкина, лежащих на этой прямой, постоянная скорость процесса детонации, — энтропия, как и предполагал Михельсон, в этой точке — максимальна [32, с. 270–273].

Вопрос, почему теория, предложенная В. А. Михельсоном, оказалась малоизвестной в России и за рубежом и какое она оказала влияние на дальнейшее развитие теории, остается открытым. Профильные статьи БСЭ I издания не упоминают работ В. А. Михельсона. Л. Н. Хитрин в статье «Детонация» для Физического словаря [33] не только ни слова не пишет о Михельсоне, но и в ней выстраивается традиционная последовательность авторов, первых исследователей детонации: Бергло, Вьель, Ле Шателье, Маллард, Диксон, Чепмен, Гюгонио, Жуге. В «Технической энциклопедии» имя В. А. Михельсона также не упоминается ни в статье о детонации, ни в статье о взрывах, в то же время на диссертацию есть ссылка в статье «Зажигание». В. С. Кулебакин дает качественную картину распространения взрывной волны, соответствующую работе Михельсона [34, ст. 192].

Ограниченное влияние работ Михельсона на развитие теории детонации в России следует, скорее, отнести к факторам субъективным. В 1930-е гг. явлениями горения и детонации интенсивно и плодотворно занимались сотрудники Ленинградского НИИ химической физики. А. С. Соколик скупом упоминает о работе Михельсона, он относит ее к 1889 г. [35, с. 50]. Судя по публикациям Я. Б. Зельдовича, работа Михельсона не была известна ни О. М. Тодесу в 1934 г., когда им было получено уравнение, представленное Михельсоном как уравнение Ренкина [36, с. 175], ни самому Зельдовичу в 1940 г. (см. [37, с. 333–334]). Имя Михельсона появилось в монографии Я. Б. Зельдовича «Теория горения и детонации газов» в 1944 г. [36, с. 147], также оно упоминалось в примечаниях к статье в ЖЭТФ 1942 г. [38, с. 172]; ссылки давались на издание 1930 г. В воспоминаниях О. М. Тодеса, относящихся, по-видимому, к 1931–1932 гг., можно увидеть влияние работы В. А. Михельсона в редакции 1920 г. [39, с. 16–17]. Сегодня и в России, и на Западе историческая роль Михельсона восстановлена (см., например, [40, с. 6]).

8 Работа Чепмена

Классическая работа Д. Л. Чепмена (1899) [41] в некотором смысле является продолжением рабо-

ты Диксона (1893) [21], она отталкивается от полученных Диксоном результатов и была представлена самим Диксоном для публикации в журнале. Если кратко охарактеризовать основные идеи работы Чепмена *своими словами*, то их можно сформулировать следующим образом:

- наличие устойчивой скорости детонации — экспериментальный факт;
- эта скорость должна быть минимально возможной;
- условие минимально возможной скорости сопрягается с максимумом энтропии;
- устойчивый режим определяется тем, что возмущения за фронтом не влияют на его распространение.

Важно, как сам Чепмен формулировал эти идеи:

1. При возбуждении взрыва его характер и скорость постоянно изменяются, пока он не станет волной постоянного типа с постоянной скоростью. (...) это та устойчивая волна, которая обладает минимальной скоростью; поскольку, как только она превратилась в постоянную волну с равномерной скоростью, не может быть обнаружено никакой причины для ее превращения в другую постоянную волну, имеющую большую равномерную скорость и большее максимальное давление.
2. (...) при этих условиях энтропия взорвавшегося газа является максимальной.
3. (...) Фактически скорость волны была бы такой же, если бы за ней следовал слой взорванного газа с одинаковой плотностью и скоростью, и на нее не влияло бы любое последующее возмущение, которое должно происходить за взрывной волной. (...) Это, очевидно, должно быть, если любое возмущение за волной может двигаться только со скоростью, меньшей скорости самой волны.

Развивая последний пункт, в рамках уравнения состояния идеального газа Чепмен получает два выражения для скорости, которые в современных обозначениях можно представить следующим образом:

$$c + u = \sqrt{\frac{2RQ_p}{\mu} \frac{C_p^2 + C_v^2}{C_v^2(C_p + C_v)}};$$

$$D = \sqrt{\frac{2RQ_p}{\mu} \frac{(C_p + C_v)^2}{C_v^2(C_p + C_v)}}.$$

После этого Чепмен заключает: «Последнее выражение явно больше, чем первое. Поэтому слой

однородного газа за волной будет постепенно увеличиваться по мере распространения взрыва» [41, р. 99].

9 Заключение

Значение работы В. А. Михельсона для теории детонации в середине 1890-х гг. было очень точно указано в отзыве на диссертацию (1894) великого русского физика А. Г. Столетова, который, в частности, писал (*выделение текста — авторов*):

«Что касается процесса взрывной волны, который не был предметом собственных экспериментальных работ нашего автора, г. Михельсон в главе II предлагает **эскиз теории этого явления**, приняв, на основании опытов Бертелло, скорость волны за постоянную и видоизменяя, в чем следует, теорию звуковых толчков Ранкина. Здесь автору представляется случай указать на неправильность некоторых взглядов Бертелло (р. 37, 38), а с другой стороны — получить выводы, находящие подтверждение в опытах этого исследователя (р. 43, 44)» [42, с. 3].

«Работа Ранкина о термодинамической теории сильных волн, по-видимому ускользнула от внимания Шустера. **Теория Михельсона**, являясь развитием и применением к новому случаю взглядов Ранкина, **остаётся**, таким образом, **самою полною из предложенных до сего времени теорий взрывной волны**» [42, с. 7].

Работа Чепмена (1899) не замыкает классическую теорию детонации, она не содержит графической интерпретации отбора скорости, экстремум энтропии носит иной характер, чем в признанной классической теории Чепмена–Жуге и других работах. Согласно Н. Мансону [24], разработка классической теории детонации завершается к 1917 г. работами Жуге и Крюссара. Дальнейшее развитие теории детонации в условиях Первой мировой войны и Революции несколько затормозилось, по крайней мере в России, и возобновилось только к 1920 г. Обмен научными данными был ограничен. В России в 1920-е гг. известность работ Чепмена и Жуге была гораздо меньшей, чем в остальном мире. М. Я. Сухаревский в 1922 г. [43] излагает основы лишь двух теорий детонации: Абеля и Бертелло, а работа Михельсона в 1920 г. по теории детонации имела характер исследования, не зависимо от развития теории на Западе.

В исторической ретроспективе некоторые идеи и положения, рассмотренные Михельсоном, были высказаны раньше, чем они появились в трудах ученых Зельдовича, Неймана и Деринга, с именами которых связана формулировка классической теории детонации. Вместе с тем, следует отметить,

что Михельсону так и не удалось преодолеть ограничения, свойственные подходу к детонации как объекту термодинамики и газодинамических соотношений на скачке. Представление о минимуме энтропии не позволило сформулировать физически обоснованное правило отбора скорости детонации. Анализ исторических аспектов создания В. А. Михельсоном *теории детонации* в целом показывает, что внешняя изоляция научной деятельности и разрушение научных традиций тормозят и препятствуют развитию науки.

Литература

1. Смирнов Е. Б., Просвиринов К. М. Становление теории детонации // Атом, 2007. Т. 33. С. 4–11.
2. Смирнов Е. Б., Просвиринов К. М. Теория детонации Михельсона–Чепмена–Жуге // Атом, 2010. Т. 46. С. 32–37.
3. Phillips E. The new world of words or a general English dictionary. — 4th ed. — London: Obadiah Blagrove, 1678.
4. Harris J. Lexicon technicum or an universal English dictionary of arts and science. — London: Dan. Brown, Tim. Goodwin, John Walthoe, Tho. Newborough, John Nicholson, Dan. Midwinter, and Francis Coggan, 1708.
5. Higgins B. Actual fire and detonation produced by the contact of tin-foil, with the salt composed of copper and the nitrous acid // Philos. Tr., 1773. Vol. 63. P. 137–141.
6. Johnson S. A dictionary of English language. — 3rd ed. — Dublin: W. G. Jones, 1768.
7. De la Rive Ch.-G. Memoire sur les tubes harmonieux a gas hydrogene // J. Physique Chimie Histoire Naturelle Arts, 1802. Vol. LV. P. 165–173.
8. Sage B. G. Theory of the detonation and explosion of gunpowder // Belfast Monthly Mag., 1809. Vol. III. No. 12. P. 209.
9. Curraudau F. R. Observations on the nature of the new properties of Alkaline Metals // Belfast Monthly Mag., 1809. Vol. III. No. 2. P. 210–212.
10. Brande W. T. A dictionary of science, literature and art. — London: Longman, Brown, Green, and Longmans, 1842. 1423 p.
11. De Lavoisier A.-L. Traité élémentaire de chimie. — Paris: Chez Cuchet, 1789. Vol. 2. 326 p.
12. De Lavoisier A.-L. Elements of chemistry. — Edinburgh: William Creech, 1790. 511 p.
13. Noble A. Artillery and explosives. Essays and lectures written and delivered at various times. — London: John Murray, 1906. 548 p.
14. Abel F. A. Contributions to the history of explosive agents // Philos. T. R. Soc. Lond., 1869. No. 159. P. 489–516.
15. The rapidity of detonation // Nature, 1873. Vol. 8. Iss. 208. P. 534.

16. *Abel F. A.* Contributions to the history of explosive agents. Second Memoir // *Philos. T. R. Soc. Lond.*, 1874. Vol. 164. P. 337–395.
17. *Чельцов И. М.* Взрывчатые вещества // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. — СПб., 1892. Т. 6(11). С. 76–206.
18. *Dremin A. N.* Toward detonation theory. — New York, NY, USA: Springer-Verlag Inc., 1999. 165 p.
19. *Berthelot M., Hake C. N., Macnab W.* Explosives and their power. — London: J. Murray, 1892. 563 p.
20. *Dixon H. B.* On the movements of the flame in the explosion (Abstract) // *P. R. Soc. London*, 1902. Vol. 70. P. 471–483.
21. *Dixon H. B.* The rate of explosion in gases // *Philos. T. Roy. Soc. A*, 1893. Vol. 184. P. 97–188.
22. *Dixon H. B.* On the movements of the flame in the explosion // *Philos. T. Roy. Soc. A*, 1903. Vol. 200. P. 315–352.
23. *Dixon H. B.* On the explosion of pure electrolytic gas // *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, 1907. Vol. 79(529). P. 234–235.
24. *Мансон Н.* Заметки о теории детонационной волны В. А. Михельсона // *Хим. физика*, 1992. Т. 11. № 2. С. 246–257.
25. *Баутин В. М.* Памяти Владимира Александровича Михельсона // *Известия ТСХА*, 2010. № 5. С. 161–173.
26. Владимир Александрович Михельсон // Выдающиеся ученые (выпускники, профессора) Петровской (Тимирязевской) академии, Российского государственного аграрного университета — МСХА имени К. А. Тимирязева: Мат-лы к биобиблиографии. — М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2010. 51 с.
27. *Михельсон В. А.* Собрание сочинений. — М.: Новый агроном, 1930. Т. 1. 430 с.
28. *Michelson W.* Ueber die Normale Endzündungsgeschwindigkeit Explosiver Gasgemische // *Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin. Sitzung vom 8. 1889. Nr. 3. S. 13–14.*
29. *Michelson W.* Ueber die Normale Endzündungsgeschwindigkeit Explosiver Gasgemische // *Ann. Physik Chemie*, 1889. Band 269. Wied. Ann. 37. No. 5. S. 1–24.
30. *Михельсон В. А.* О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей // *Ученые записки Императорского университета физ.-мат.*, 1893. Вып. 10. С. 1–92.
31. *Von Oettingen A., von Gernet A.* Ueber Knallgasexplosion // *Ann. Physik Chemie*, 1888. Band 269. Wied. Ann. 33. No. 1. S. 586–609.
32. *Хитрин Л. Н.* Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во Московск. ун-та, 1957. 452 с.
33. *Физический словарь.* Т. II. — М.: ОНТИ НКТП СССР, 1937. 864 с.
34. *Кулебакин В.* Зажигание // *Техническая энциклопедия* / Гл. ред. К. Л. Мартенс. — М.: Советская энциклопедия, 1929. Т. 8. С. 190–192.
35. *Соколик А.* Горение и детонация в газах. — М.-Л.: ГТТИ, 1934. 154 с.
36. *Зельдович Я. Б.* Теория горения и детонации газов. — М.-Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1944. 72 с.
37. *Зельдович Я. Б.* К теории распространения детонации в газообразных системах // *ЖЭТФ*, 1940. Т. 10. Вып. 5. С. 542–568.
38. *Зельдович Я. Б.* О распределении давления и скорости в продуктах детонационного взрыва, в частности при сферическом распространении детонационной волны // *ЖЭТФ*, 1942. Т. 12. Вып. 9. С. 389–406.
39. *Тодес О. М.* Талант бил в нем ключом // *Знакомый незнакомый Зельдович.* — М.: Наука, 1993. С. 15–22.
40. *Lee J. H. S.* The detonation phenomenon. — New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2008. 388 p.
41. *Chapman D. L.* On the rate of explosion in gases // *Phil. Mag.*, 1899. Vol. 47. P. 90–104.
42. *Столетов А. Г.* Отзыв о диссертации В. А. Михельсона «О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей» (М., 1890), представленной для получения степени магистра физики, — с замечаниями о других трудах того же автора // *Ученые записки Императорского московского университета, отдел физико-математический*, 1899. Вып. 14. С. 1–14.
43. *Сухаревский М. Я.* Взрывчатые вещества и взрывные работы. — М.: ГТИ, 1923. Т. 1. 912 с.

А. Ю. Долгобородов, М. А. Бражников