

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
2. Соколов А. В. Основы взрывобезопасного аппаратурного оформления стадии нитрования. Отчет филиала ВНИИХФИ. 1986.
3. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. и др. ФГВ, 1987, 23, 6, 9.
4. Ермолаев Б. С., Новожилов Б. В. и др. ФГВ, 1985, 21, 5, 3.
5. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды.— М.: Физматгиз, 1960.
6. Ермолаев Б. С., Посвянский В. С. и др. ФГВ, 1983, 19, 4, 52.
7. Краснов Ю. К., Маргулис В. М. и др. ФГВ, 1970, 6, 3, 290.
8. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха.— М.: Наука, 1975.

г. Москва

Поступила в редакцию 4/XII 1989

УДК 622.235

А. П. Воронин, В. Н. Капинос, С. А. Крнев, В. Н. Минеев

О ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДОВ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВВ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследованиям процессов, сопровождающих взрывы твердых ВВ (главным образом газодинамических процессов), посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ. В то же время явления, связанные с возникновением электромагнитных возмущений при взрывах твердых ВВ, изучены слабо.

Генерация электромагнитного поля взрывами, по-видимому, впервые описана в [1] и в дальнейшем изучалась экспериментально и теоретически в работах [1—16]. При исследовании распространения ударных волн (УВ) в твердых телах для получения ударных импульсов использовались взрывы небольших количеств ВВ [1], при этом зарегистрированы электрические помехи, для изучения которых поставлены дополнительные эксперименты по изучению электромагнитных возмущений взрыва.

В качестве приемных использовались штыревые антенны длиной $l_a = 10$ см. Заряды из азида свинца, триодистоводородного азота и других ВВ подрывались на металлических и диэлектрических плитах. Во всех опытах наблюдался электрический импульс длительностью несколько микросекунд с максимумом, возникающим через 50 мкс после взрыва ВВ. Автор считает, что наиболее вероятное объяснение эффекта состоит в следующем. При взрыве образуется ионизированный слой воздуха за фронтом УВ, в котором из-за различной подвижности электронов и ионов разделяются заряды, что приводит к образованию некоторого эффективного электрического диполя. При увеличении радиуса фронта УВ и последующей рекомбинации зарядов изменяется электрический момент диполя и появляется поле во внешней области взрыва.

В [2] обнаружено и исследовано коротковолновое радиоизлучение, возникающее при взрывах ВВ в воздухе. Оно регистрировалось на частотах 3300, 190, 90, 14, 6 МГц и на видеочастотах < 1 МГц. Измерения на всех частотах (кроме 3300 МГц) проводились антеннами с $l_a = 50 \div 160$ см. На частоте 3300 МГц применялась рупорная антенна. Антенны располагались на расстоянии 10—200 см от взрыва. В качестве ВВ использовали азид свинца массой от 0,1 до 0,4 г, который размещали на деревянном основании на высоте 30 см от бетонного пола. Максимальное значение амплитуды радиоизлучения на расстоянии ~ 40 см от

© 1990 Воронин А. П., Капинос В. Н., Крнев С. А., Минеев В. И.

взрыва не превышало 100 мкВ. На частотах выше 90 МГц радиоизлучение вообще не наблюдалось.

Общий характер и направленность исследований в [2], по-видимому, в какой-то мере определялись научными интересами автора, лежащими в области радиоастрономии, стремившегося найти некоторую аналогию между механизмами образования коротковолнового радиоизлучения взрыва и спорадического радиоизлучения Солнца. Предлагаемый автором механизм генерации радиоизлучения взрыва, связанный с процессом ускорения или замедления некоторых групп электронов в ионизированном слое воздуха на фронте УВ, предопределил характер интерпретации наблюдаемых экспериментальных фактов. Поэтому для некоторых явлений не могло быть дано даже в принципе качественного объяснения. В частности, в рамках предложенной модели исключалась возможность связи величины задержки радиоизлучения взрыва относительно начала детонации ВВ с параметрами термодинамического состояния газа за фронтом УВ. Такая связь установлена в [10] и использована для оценки в определенные моменты времени состояния ионизации газа за фронтом УВ взрыва.

Значительное место уделяется вопросам электромагнитного излучения при детонации ВВ в [3], где исследовались электромагнитные поля, возникающие при подрывах цилиндрических зарядов массой 800—1200 г на различных расстояниях от поверхности Земли. Взрывы производили во внешнем электрическом поле и без него. В [3] впервые излагаются результаты качественных измерений некоторых зависимостей амплитуды электрического импульса от параметров взрыва. Напряженность электрического импульса взрыва характеризуется величиной ЭДС, наведенной импульсом поля в штыревой антенне. Отмечается, что величина последнего изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от центра взрыва и линейно в зависимости от массы заряда [3]. Особо подчеркивается, что при подрывах зарядов огнепроводным шнуром на поверхности Земли и на высоте >240 см электрический импульс не наблюдается совсем, а если наблюдается, то только при подрыве ВВ электрическим способом. Проведены специальные эксперименты со взрывами в искусственно созданном электрическом поле под металлическим заземленным куполом.

Предполагается, что электрический импульс возникает при разряде, происходящем в момент заземления поляризованной во внешнем поле (электрическом поле Земли) проводящей области взрыва. Возникновение импульса в отсутствие внешнего электрического поля объясняется наведением в антенне ЭДС при разлете заряженных твердых частиц продуктов взрыва. Заряжаться частицы могут в результате электрокинетических процессов при движении частиц воздуха. Генерация импульса поля при электрическом способе подрыва ВВ объясняется тем, что проводящая область взрыва, связанная с Землей подрывными проводами, образует систему, эквивалентную некоторому эффективному диполю. Механизм возникновения электромагнитных возмущений при взрывах твердых ВВ, предложенный в [3], определил направление и характер исследований в этой области.

Авторы [4] изучали зависимость электрического импульса и коротковолнового радиоизлучения взрыва от количества и способа внесения инертных примесей (гипса, двууглекислого натрия) в заряды ВВ. Отмечается, что амплитуда электрических импульсов поля прямо пропорциональна массе инертных примесей, вводимых в ВВ. Наблюдалось коротковолновое радиоизлучение взрыва в интервале частот $f = 400 \div 500$ МГц в виде последовательности кратковременных хаотических всплесков. Увеличение мощности взрыва приводило к росту (при неизменной амплитуде) числа всплесков. Специфические условия проведения опытов (подрыв зарядов на поверхности металлической плиты) и отсутствие установочных данных (способ подрыва, метод регистрации) не позволяют про-

вести анализ и оценку степени достоверности полученных в [4] экспериментальных данных.

Результаты работы [5] в известной мере дополняют исследования, проведенные в [3]. В [5] помимо общих сведений о влиянии способа подрыва и формы заряда на характеристики регистрируемого сигнала приведена найденная экспериментально зависимость момента времени t_{\max} , соответствующего максимуму электрического импульса, от массы заряда m : $t_{\max}/m^{1/3} = 0,7 \pm 0,05$ (t_{\max} — в миллисекундах; m — в килограммах). Некоторые экспериментальные данные [5] находятся в противоречии с результатами [3].

В [6] предпринята попытка теоретического описания механизма образования электрического импульса, основная идея которого высказана в [1, 3]. Однако предположения, лежащие в основе теоретических оценок, в частности о характере газодинамического расширения продуктов взрыва и о процессе образования отрицательных ионов после выхода детонационной волны на поверхность заряда, не подкреплены экспериментальными измерениями газодинамических параметров взрыва, коррелированных с измерениями электромагнитных импульсов взрыва. В [6] предложен метод описания механизма возбуждения взрывом импульса поля взрыва при помощи электрических процессов в эквивалентной электрической схеме, параметры которой моделируют разлет заряженных продуктов взрыва и индукцию зарядов на регистрирующей антенне. Подобная схематизация ограничивает возможности описания электродинамических эффектов взрыва частным случаем возбуждения электрических сигналов в антенне при взрывах зарядов ВВ, инициируемых электродетонатором.

В [7] рассматриваются вопросы, очень важные в практике взрывных работ, связанных с процессом неполной детонации зарядов в цилиндрических оболочках. Экспериментально установлено, что в зарядах ВВ, заключенных в металлическую оболочку с зазором между ВВ и стенками оболочки, чаще всего наблюдается неполная детонация, сопровождающаяся разбрасыванием невзорвавшейся части ВВ. Известен факт электрической поляризации вещества за фронтом УВ [16]. Это явление возникает при ударном сжатии ВВ, в том числе при его детонации. Поляризация ВВ за фронтом УВ обусловлена ориентацией молекул ВВ в поле инерционных сил УВ. Состояние ударной поляризации — термодинамически неравновесное состояние, которое разрушается с характерным временем тепловой разориентации молекулярных диполей τ .

Электрическая поляризация вещества сопровождается появлением электрических и магнитных полей, а также электромагнитного излучения в пространстве, окружающем поляризационную область. Если полный дипольный момент P со временем изменяется, то система излучает электромагнитные волны длиной $\lambda = c\tau$, где c — скорость света. На расстояниях R от поляризованной области, удовлетворяющих условию $L \ll R \ll \lambda$ (L — характерный размер поляризованной области), в так называемой ближней зоне существует лишь электромагнитное поле, напряженность электрической E и магнитной H компонент которого по порядку величины можно оценить как

$$E \approx \frac{P}{4\pi\epsilon_0 R^3}, \quad H \approx \frac{P}{4\pi\tau R^2}.$$

Для ТНТ поверхностная плотность зарядов $p \approx 10^{-5}$ К/м², $\tau \approx 10^{-8}$ с и, положив для оценок скорость детонации $D \approx 10^4$ м/с, $L = D\tau \approx 10^{-4}$ м, $P = pl^2L$ (l — характерный размер диполя порядка диаметра образца), $l \approx 10^{-2}$ м, находим на расстоянии $R = 100l$: $E = 10^{-3}$ В/м, $H = 10^{-6}$ А/м, $\lambda = 3$ м. Эти значения E и H на несколько порядков ниже регистрируемых в экспериментах величин электрической и магнитной компонент, а времена τ на несколько порядков меньше регистрируемой длительности импульсов.

Представляет интерес задача оценки термодинамического состояния области, охваченной взрывом, по характеристикам сопровождаемых его импульсов электрического поля. Она рассматривалась в работах [8—14]. В [8, 9] приведены результаты исследования влияния различных физических факторов на процесс генерации электрического импульса взрыва, а также взаимодействия УВ взрыва с внешним электрическим полем.

Анализ экспериментальных результатов работы [5] указал на возможную корреляцию амплитудно-временных характеристик электрического импульса взрыва с газодинамическими явлениями взрыва, длительность которых составляет величину порядка нескольких миллисекунд при взрывах зарядов с массой в несколько сотен граммов. Установлено существенное влияние подводящих проводов при электрическом способе подрыва, поэтому все эксперименты [5] проводились только с подрывом при помощи огнепроводного шнура. Движение фронта УВ взрыва регистрировалось системой пьезодатчиков. Обнаружено, что при подрывах зарядов без внешнего поля регистрируемые импульсы характеризуются относительно устойчивой формой с четко выраженными экстремумами и временем задержки импульса.

Анализ результатов показал, что сферическая область взрыва ведет себя как идеально проводящее тело в течение указанного выше промежутка времени и создает поле $E(t^0)$ на малых расстояниях над поверхностью Земли (которую для данных частот можно считать идеально проводящей):

$$E(t^0) = 2E_0 \frac{r^3(t^0)}{R^3}, \quad 0 \leq t^0 \leq t_0^0 = 0,4 \cdot 10^{-3},$$

где R — расстояние до центра взрыва, м; r — радиус проводящей сферы, находящейся между фронтом УВ и продуктами взрыва, м; E_0 — вертикальная составляющая электрического поля Земли, В/м; $t^0 = t/m^{1/3}$, с/кг^{1/3}; $t_0^0 = t_0/m^{1/3}$, с/кг^{1/3}; t_0 — время задержки, с. При такой интерпретации экспериментальных данных отсутствие импульса поля в начальный момент времени не может быть объяснено экранировкой излучения проводящим слоем (для $f \sim 10^3$ Гц при $r = 2r_0$ толщина скин-слоя $1/\chi \approx 15$ см, а при $r = 10r_0$ $1/\chi \approx 1,3$ м, r_0 — радиус заряда).

В работе [10] исследовалось коротковолновое (КВ) радиоизлучение взрыва в диапазоне от 1,5 до 90 МГц. Прием и выделение отдельных частотных составляющих излучения осуществлялись приемниками П5-1 и Р-250М с полосой пропускания 100 и 14 кГц соответственно. Установлено, что момент времени появления КВ-излучения t_0 (мкс) зависит от частоты и массы m (кг) зарядов ВВ следующим образом: $t_0 = (39,5 \lg f - 100)m^{1/3}$.

Обнаруженным экспериментальным фактам удается дать удовлетворительное качественное и количественное объяснение, если предположить, что КВ-излучение генерируется продуктами взрыва и некоторое время экранируется пониженой толщиной слоя воздуха за фронтом УВ. Условие ослабления радиоволн в пределах толщины слоя в e раз можно записать в виде:

$$\int_0^{\Delta} \chi dr \approx 1, \quad \chi = 2\pi f \sqrt{\frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \mu_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi \epsilon f} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}^{1/2},$$

$$\sigma = \frac{12,65 \cdot 10^{-18} \sqrt{T} N_e}{p - 1,39 \cdot 10^{-23} T N_e} \quad [19];$$

χ — коэффициент поглощения (м⁻¹); Δ , σ — толщина поглощаемого слоя (м) и его проводимость (Ом⁻¹ · м⁻¹); ϵ_0 , μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума; T , p — температура (К) и давление (Па) воздуха за фронтом УВ; N_e — концентрация электронов (м⁻³). Коэффициент поглощения в некоторый момент t_0 зависит от распределения тер-

динамических параметров в слое в этот момент времени. Поэтому предположив, что концентрация электронов в слое может быть определена по формуле Саха, можно путем численного интегрирования соотношения для ослабления КВ-излучения найти значение эффективного потенциала ионизации компонента, вносящего основной вклад в ионизацию воздуха за фронтом УВ.

Обобщая разнородные, а иногда противоречивые данные приведенных в обзоре работ, можно отметить, что большинство опубликованных работ, за исключением [8—14], содержат общие сведения описательного характера о результатах экспериментов. В [1—7] не только не рассматриваются, но даже и не ставятся методические вопросы регистрации измерения импульсных полей большой длительности. Регистрация импульсов поля не коррелируется с измерениями газодинамических параметров взрыва. Механизмы генерации электрического поля, предложенные в разных работах, не согласуются между собой.

Одной из причин возникновения квазистатического электрического импульса взрыва, альтернативной изложенным в приведенных выше работах, может быть механизм, связанный с взаимодействием расширяющейся проводящей области взрыва с постоянным электрическим полем Земли, что приводит к достаточно ясной физической интерпретации и простой количественной оценке.

При расширении в постоянном электрическом поле Земли ионизированной области взрыва, расположенной между фронтом УВ и контактной поверхностью продуктов детонации (ПД), наводятся поляризованные заряды. Их поля компенсируют в проводящей области внешнее поле Земли, а вне этой области образуют квазистатическое поле, эквивалентное полю дипольного излучателя с некоторым дипольным моментом

$$E(t) \approx \frac{P(t)}{4\pi\epsilon_0 R^3}.$$

При условии, что время релаксации поляризованных зарядов $\tau_E \sim \epsilon_0/\sigma$ гораздо меньше характерного времени изменения размеров проводящей области взрыва, электрический дипольный момент представляется в виде

$$P(t) \approx 4\pi\epsilon_0 E_0 r^3(t),$$

в ближней зоне взрыва возникает поле

$$E_*(t) = E_0 \frac{r^3(t)}{R^3}.$$

Радиус проводящей области взрыва $r(t)$ приближенно можно положить равным радиусу контактной поверхности ПД, к которой прилежит слой воздуха за фронтом УВ, имеющий наиболее высокую температуру. Этот слой можно считать проводящим до тех пор, пока радиус поверхности $r_k \leq 20r_0$. Следовательно, амплитуда напряженности электрического поля, возникающего при возмущении взрывом электрического поля Земли при плотности ВВ $\rho_0 \approx 2000 \text{ кг/м}^3$ и $E_0 \approx 100 \text{ В/м}$, $E_*(t) \leq 80 \cdot m/R^3$. Регистрируемая максимальная величина напряженности электрического поля при $t_{\max}^0 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ с/кг}^{1/3}$, $E(t_{\max}^0) = 1,74 \cdot 10^4 \cdot \frac{m}{R^3}$ на два порядка больше импульса поля, связанного с

механизмом поляризации проводящей области взрыва в электрическом поле Земли, что исключает этот механизм в качестве возможного объяснения возникновения электрического импульса взрыва.

В работах [11, 12] сделан вывод о дипольном характере поля и определенной структуре источника поля. Эти особенности находят удовлетворительное объяснение при условии, что источники регистрируемого поля локализованы за слоем воздуха, прогретого на фронте УВ. При этом предполагалось, что источниками поля являются твердые заряженные частицы ПД, некомпенсированный заряд которых пропорционален массе некоторого поверхностного слоя заряда ВВ.

Амплитуды вычислялись для заданного расстояния по эмпирической обобщенной зависимости [12] в характерные моменты времени

$$t^0 = \frac{t_1}{m_1^{1/3}} = \frac{t_2}{m_2^{1/3}}.$$

Известно, что в ближней зоне дипольного излучателя это отношение амплитуд равно отношению электрических дипольных моментов, которые в свою очередь полностью определяются некоторыми эффективными величинами линейного размера и заряда диполя. Эффективный линейный размер дипольного момента не может превышать радиуса фронта УВ, безразмерная величина которого для взрывов различной массы: $R(t^0) = r/r_0$.

Результирующий эффективный заряд дипольного момента равен произведению плотности заряженных частиц (поверхностной ρ_s или объемной ρ_v), характерного объема V или поверхности s и отношения заряда частицы к ее массе q/m_q . Следовательно, при постоянных величинах заряда и массы частиц отношение амплитуд импульсов поля

$$\frac{E(t^0, m_1)}{E(t^0, m_2)} = \frac{\rho_1 \left(\frac{m_1^{1/3}}{m_2^{1/3}} \right)^n}{\rho_2 \left(\frac{m_1^{1/3}}{m_2^{1/3}} \right)^n},$$

где $n = 4$ и 3 относятся к объемному и поверхностному распределению источников поля; $n = 3$ соответствует экспериментальным данным при условии, что плотность источников поля в процессе расширения ПД остается постоянной. Это накладывает большее ограничение, чем в [11], на возможность выбора механизма генерации электрического импульса взрыва из числа альтернативных. Экспериментальным данным не противоречит также утверждение о том, что источниками импульса поля взрыва являются элементарные диполи, возникающие при движении их в ионизированном слое воздуха за фронтом УВ. Известно, что твердые частицы ПД, покоящиеся в ионизированной среде, приобретают отрицательный заряд, компенсированный облаком положительного пространственного заряда с размером, равным дебаевскому радиусу экранирования [17]. При движении заряженной частицы относительно среды в результате «деформации» облака с компенсированным зарядом возникает электрический элементарный дипольный момент. Результирующий дипольный момент отмечается при упорядоченной ориентации элементарных диполей в процессе асимметричного разлета ПД. Так как при взрыве выполняется приближенное условие автомодельности для газодинамических и термодинамических параметров

$$v(t^0, m_1) = v(t^0, m_2), \quad \tau(t^0, m_1) = \tau(t^0, m_2),$$

то при $q/m_q = \text{const}$ отношение результирующих дипольных моментов имеет вид

$$\frac{P(t^0, m_1)}{P(t^0, m_2)} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\rho_{V1}}{\rho_{V2}} \left(\frac{m_1^{1/3}}{m_2^{1/3}} \right)^3.$$

Оба механизма генерации поля предполагают либо начальное неоднородное распределение источников поля зарядов или диполей (при детонации заряда ВВ), либо его возникновение в процессе расширения ПД. В противном случае при симметричном распределении источников поля в области сферического взрыва отличное от нуля поле (по характеру мультидипольное) возможно только в области, линейные размеры которой сравнимы с размерами области, занятой источниками поля.

Обобщая результаты рассмотренных работ, можно сделать следующие выводы.

1. Физическая природа электромагнитных импульсов взрыва независимо от рассмотренных механизмов их генерации обусловлена несимметричным распределением источников поля при взрыве.

2. Длительность электромагнитных импульсов непосредственно связана с длительностью существования проводящей области за фронтом УВ.

3. Возникновение и существование электромагнитных импульсов возможно при распространении ДВ по заряду ВВ (механизм ударной поляризации), после выхода ДВ на поверхность заряда ВВ в процессе расширения ПД (на этой стадии электромагнитные импульсы коррелируются с газодинамическими характеристиками взрыва, что косвенно подтверждает предложенный механизм генерации электромагнитных импульсов, связанный с пульсациями продуктов взрыва), в процессе релаксации некомпенсированных электрических зарядов на контактной поверхности ПД.

4. Отсутствие электрического импульса в течение времени, соответствующего начальной стадии расширения ПД и удовлетворяющего условиям автомодельности, не может, как это сделано в [14], быть объяснено экранировкой прогретым слоем воздуха за фронтом УВ, так как для характерных частот процесса $\omega \approx \frac{d}{dt} \ln \frac{r}{r_0} \approx 10^2 - 10^3$ Гц и ниже коэффициент ослабления радиоволн, зависящий от толщины скин-слоя проводящей области, много меньше единицы.

5. Представляется целесообразным проведение дополнительных экспериментов, в частности в разреженном воздухе в условиях, исключающих влияние отдельных факторов, например УВ на генерацию электромагнитных импульсов, а также изучение электромагнитных импульсов при проведении взрывов ВВ с инертными примесями и в различных оболочках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolsky H. Nature, 1954, 173, 4393.
2. Takakura T. Publ. Astronomical Soc. Japan, 1955, 7, 210.
3. Cook M. A. The Science of High Explosives.— N. Y.: Reinhold, 1958.
4. Anderson W. H., Long C. L. Appl. Phys., 1965, 36, 4.
5. Горшунов Л. М., Кононенко Г. П., Сиротинин Е. И. ЖЭТФ, 1967, 53, 3(9).
6. Герценштейн М. Е., Сиротинин Е. И. ПМТФ, 1970, 2.
7. Печковский В. И., Кальчик Г. С. ФГВ, 1970, 6, 1.
8. Боронин А. П., Вельмин В. А., Медведев Ю. А. и др. ПМТФ, 1968, 6.
9. Боронин А. П., Медведев Ю. А., Степанов Б. М. Письма ЖЭТФ, 1968, 8, 4.
10. Боронин А. П., Медведев Ю. А., Степанов Б. М. Докл. АН СССР, 1970, 192, 1.
11. Боронин А. П., Медведев Ю. А., Степанов Б. М. Докл. АН СССР, 1972, 206, 3.
12. Боронин А. П., Медведев Ю. А., Степанов Б. М. ФГВ, 1973, 9, 4.
13. Капинос В. И., Михайлов М. В., Степанов Б. М. Новые вопросы прикладной электродинамики.— М.: Наука, 1976.
14. Медведев Ю. А., Степанов Б. М. Метрология быстропротекающих процессов.— М.: ВНИИФТРИ, 1977.
15. Адушкин В. В., Соловьев С. П. Физика земли, 1989, 3.
16. Минеев В. И., Иванов А. Г. УФН, 1976, 1.
17. Курдгеландзе Д. Ф. Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур.— М.: Изд-во АН СССР, 1962.
18. Френкель Я. И. Собрание избранных трудов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958.— Т. II.
19. Бонд Дж., Уотсон К., Уэлч Дж. Физическая теория газовой динамики.— М.: Мир, 1968.

г. Москва

Поступила в редакцию 10/VII 1989,
после доработки — 18/XII 1989