

05;12

©1995 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТОЙ НИКЕЛЕВОЙ ГУБКИ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ

С.Д.Гилев

Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН.

630090, Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 31 мая 1994 г.)

Впервые исследованы электрические свойства высокопористого вещества в условиях ударного сжатия и последующей разгрузки. Электросопротивление никелевой губки ($\rho_0 = 190-570 \text{ Кг/м}^3$) увеличивается в 20-40 раз за время ударного сжатия образца. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются моделью скачкообразного изменения проводимости за ударным фронтом. При многократном сжатии и последующей разгрузке сопротивление испытывает сложные изменения, которые связаны с сильной пространственной неоднородностью свойств ударно сжатого материала, неравномерностью нагрева металлического каркаса губки и находящегося в порах газа.

Исследования пористых материалов в ударной волне (УВ) стимулированы интересными и многообразными физическими явлениями в обширной области фазовой диаграммы между твердым телом и идеальным газом, в которую приводит ударное сжатие веществ пониженной плотности [1-3]. Максимальные концентрации тепловой энергии достигаются в высокопористых образцах, что позволяет изучать в лабораторных условиях эффекты, не реализуемые сжатием сплошных веществ. При использовании промышленных порошков металлов доступная для изучения область пористостей ограничена сверху значением $n \approx 5$ ($n = \rho_{00}/\rho_0$, ρ_{00} — плотность сплошного вещества, ρ_0 — начальная плотность пористого вещества). Применение специально созданных сред в виде отрезков тонкой фольги позволяет увеличить пористость n до значений около пятидесяти [3]. К настоящему времени для исследования ударно сжатого состояния пористых веществ использовались методы регистрации гидродинамических параметров волны [1-3], оптических и термодинамических свойств [4]. Отсутствуют экспериментальные данные об электрических свойствах высокопористых веществ в УВ. Электросопротивление, электропроводность являются важнейшими электрофизическими характеристиками вещества, отражающими его физическое состояние, поэтому регистрация

этих параметров для образцов сверхмалой плотности может дать ценную информацию о поведении вещества в области высоких давлений и температур.

В настоящей работе сообщаются результаты экспериментального исследования электрических свойств высокопористой никелевой губки в условиях ударного нагружения и последующей разгрузки.

Образцы

Исследовались образцы высокопористой никелевой губки, изготовленные в БРНПО "Порошковая металлургия" (г. Минск) (рис. 1). Губка получена путем электролитического осаждения металла на непроводящую основу, после чего последняя уничтожалась химическим путем. Таким способом в контролируемых условиях могут быть получены губки с пористостями до $m \approx 100$. Образец представляет собой ажурную конструкцию из металлических перемычек, связанных между собой, размер ячейки определяется матрицей, на которую проводится осаждение. Так как ячейки губки являются открытыми, то газ может легко проходить по объему губки. Перемычки, образующие ячейку, внутри являются полыми, толщина их стенки зависит от режима осаждения и может варьироваться. Характерные размеры губки: размер ячейки 0,8 мм, поперечный размер перемычки 100–200 мкм, толщина стенки ~ 5 мкм. Образцы вырезались электроискровым способом, типичные размеры составляли $50 \times 20 \times 5$ мм. Средняя плотность образцов варьировалась от 190 до 570 Кг/м^3 (коэффициент пористости $m = 16\text{--}47$). Средняя проводимость губки, вычисленная по сопротивлению образца и его геометрическим размерам, составляла $10^4\text{--}2 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Оценка электропроводности металлического каркаса дала величину, в несколько раз меньшую справочного значения электропроводности никеля. Охлаждение образца от температуры 270 до 77 К привело к увеличению проводимости всего на 24% вместо ожидаемого значения около 500%. Такие результаты связаны, видимо, с большим сопротивлением между микрочернами никеля, образующимися в процессе электролитического осаждения из раствора.

Постановка экспериментов

Исследуемые образцы размещались между диэлектрическими пластинами в обойме из гетинакса или пенопласта. Ток вводился через торцы образца, электроды для регистрации напряжения подключались к образцу в его центральной части со стороны противоположной, входящей в образец УВ. Измерительная ячейка для регистрации электрических переходов в УВ описана в [5]. В ряде опытов фиксировалось напряжение непосредственно на токоподводах, подключенных к торцам образца. Измерения проводились в режиме постоянного тока (ток около 20 А). Нагружение образца производилось контактным способом от генератора плоской волны с характерным временем спада давления 5 мкс.

На рис. 2 показана характерная осциллограмма, полученная в опытах с никелевой губкой. Здесь A означает момент входа УВ в образец, B — расчетное время выхода волны на диэлектрическую стенку. При распространении УВ по губке напряжение на образце существенно возрастает, что свидетельствует о переходе образца в состояние с большим сопротивлением.

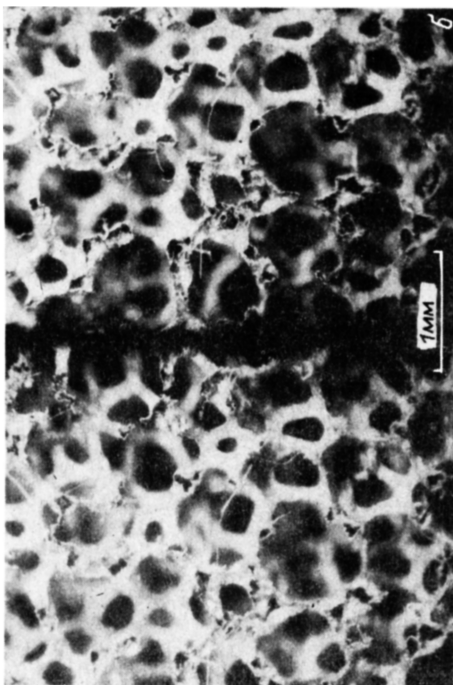
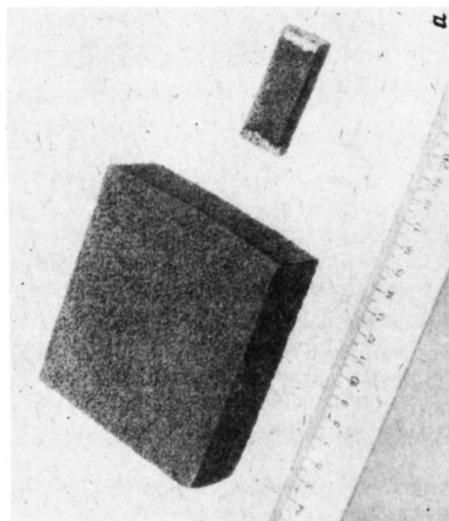


Рис. 1. Никелевая губка.
а — средний план, б — микрофото.

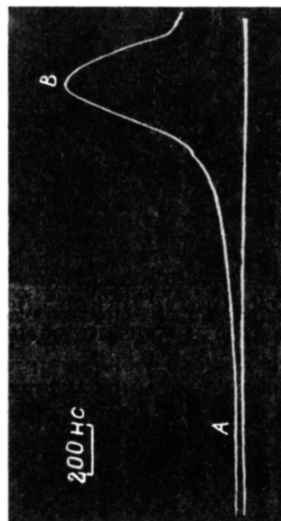


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма (опыт 448).

Результаты экспериментов

Результаты экспериментов с никелевой губкой сведены в таблицу. Здесь представлена информация о начальной средней электропроводности образца, материале диэлектрической стенки, расчетных параметрах УВ в образце (давление P_p , скорость волны D_p), экспериментальном значении скорости волны D_e (определялась от момента вхождения УВ в образец до максимума напряжения), максимальной перестройке напряжения V_{\max}/V_0 . Расчетные параметры P_p , D_p находились по уравнению состояния Оха [6], использовалась связь между волновой скоростью D и массовой U : для $\rho_0 = 190 \text{ Кг/м}^3$ $D = -0.007 + 1.03U$, для $\rho_0 = 270 \text{ Кг/м}^3$ $D = -0.006 + 1.05U$, для $\rho_0 = 570 \text{ Кг/м}^3$ $D = -0.003 + 1.07U$ (D и U выражены в Км/с).

Анализ полученных экспериментальных данных показывает следующее.

1) Расчетные и экспериментальные значения скорости ударных волн близки.

2) На фазе однократного сжатия образца поведение сигнала в разных сериях качественно подобно. Изменение напряжения на образце зависит от его пористости и составляет 20–40 раз. Так как ток постоянен, то это означает, что сопротивление образца увеличивается в соответствующее число раз.

3) Разброс перестройки напряжения для экспериментов, проведенных в одинаковых условиях, составляет около 20%, что, видимо, связано с различием свойств исследованных образцов, в первую очередь плотности (в силу особенностей изготовления губки плотность образцов может немного варьироваться). Обусловленный этим, разброс результатов больше, чем влияние интенсивности УВ (опыты 451 и 462 благополучно “вписались” в основной массив данных первой серии).

4) Сравнение результатов опыта 448, проведенного при температуре жидкого азота, с опытами 447, 455, 456, 457 показывает, что увеличение начальной проводимости образца приводит к возрастанию коэффициента перестройки напряжения. При этом конечное сопротивление образца в конце сжатия осталось примерно таким же, как в основной группе опытов. Такое поведение связано с тем, что электрические свойства губки определяются термодинамическим состоянием в УВ, которое в силу высоких температур, свойственных ударно сжатому высокопористому веществу, слабо зависит от начальной температуры.

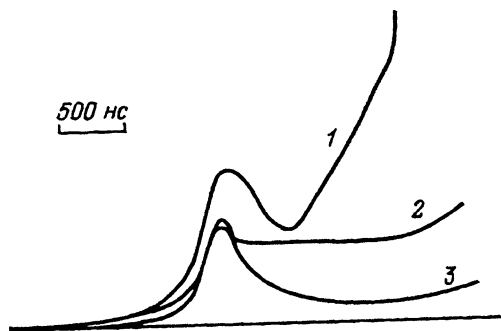


Рис. 3. Поведение сигнала после выхода УВ из образца зависит от условий на границе и пористости губки.

1 — $\rho_0 = 190$ (жесткая стенка, опыт 455); 2 — 190 (мягкая стенка, опыт 458); 3 — 570 Кг/м³ (опыт 446). Масштабы по напряжению для кривых различны.

ρ_0 , Кг/м ³	Номер опыта	σ_1 , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	Стенка	P_p , ГПа	D_p , км/с	D_e , км/с	$\frac{V_{\max}}{V_0}$	
190	451	$1.3 \cdot 10^4$	Гетинакс	2.2	3.44	3.45	21	
	447	$1.3 \cdot 10^4$	»	3.2	4.15	4.2	21	
	455	$1.1 \cdot 10^4$	»	3.2	4.15	4.0	20	
	456	$1.3 \cdot 10^4$	»	3.2	4.15	4.2	24	
	457	$1.2 \cdot 10^4$	»	3.2	4.15	4.1	17	
	458	$1.1 \cdot 10^4$	Пенопласт	3.2	4.15	4.0	29	
	448 *	$1.6 \cdot 10^4$	Гетинакс	3.2	4.15	4.2	28	
	462**	$1.3 \cdot 10^4$	»	4.6	4.7	4.6	19 ± 2	
	270	449	$2.6 \cdot 10^4$	»	4.3	4.07	4.0	17
		453	$2.6 \cdot 10^4$	»	4.3	4.07	3.8	16
570	446	$2.0 \cdot 10^5$	»	7.4	3.73	3.7	37	
	472	$2.0 \cdot 10^5$	»	7.4	3.73	4.1	45	

$T_0 = 77 \text{ K}$

** Возможно влияние проводимости продуктов детонации заряда взрывчатого вещества.

5) Характер изменения напряжения после прохождения УВ образца и выхода на диэлектрическую стенку зависит от пористости образца, соотношения между ударными импедансами губки и стенки. Если стенка жесткая (гетинакс для первой серии). то напряжение на образце уменьшается (рис. 3, кривая 1), достигая значений, всего в 4-6 раз больших начального. При замене стенки на более мягкую, близкую к губке по ударным свойствам (пенопласт, $\rho_0 = 110 \text{ Кг/м}^3$) величина "провала" на осциллограмме значительно уменьшается, а далее для низкоплотных образцов наблюдается дальнейший рост сигнала (кривая 2). Для наиболее плотных из использовавшихся образцов ($\rho_0 = 570 \text{ Кг/м}^3$) стадия роста сигнала в однократной УВ сменяется плато (кривая 3), наличие которого свидетельствует о выработке нового стационарного состояния ударно сжатого образца.

В качестве наиболее вероятного механизма изменения электрических свойств губки в УВ можно выделить местные разрывы и деформацию проводящих перемычек за счет движения диэлектрического экрана, отделяющего образец от заряда взрывчатого вещества, и вследствие воздействия на следующие слои вещества микроструй, образующихся из-за крайне неоднородной структуры губки, при этом в объеме образца может оставаться множество проводящих областей.

Уменьшение напряжения после выхода УВ на жесткую стенку, зарегистрированное в опытах первых двух серий, свидетельствует о появлении достаточно хорошей проводимости, которая может быть объяснена следующим образом. На фазе однократного сжатия вещество губки представляет собой совокупность локально проводящих областей. При выходе волны на стенку происходит дальнейшее уплотнение образца, отдельные проводящие области налетают на стенку (и друг на друга), чем обеспечивается хороший электрический контакт.

В случае выхода УВ на мягкую стенку граница раздела губка-стенка ускоряется в волне разрежения, объем губки увеличивается, проводящие области удаляются друг от друга, напряжение на электродах должно оставаться постоянным или возрастать. Такое поведение качественно согласуется с наблюдаемым сигналом (рис. 3, кривая 2). Некоторое уменьшение напряжения может быть объяснено только на микроуровне рассмотрением последовательности соударений со стенкой отдельных металлических перемычек и проводящих областей.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что поведение высокопористой никелевой губки является весьма сложным и не может быть исчерпывающим образом объяснено в рамках динамики однородной сплошной среды. Строго говоря, электрический отклик губки должен описываться на микроуровне с позиций механики и электродинамики гетерогенных сред. Само понятие "ударная волна" для такой среды является достаточно дискуссионным. Физически ясно, что говорить об ударной волне в такой ситуации можно лишь в том случае, если размер области с веществом существенно превышает все характерные размеры, связанные с микроструктурой образца. Такая волна может быть описана макроскопическими параметрами: давление, плотность, массовая скорость и т.д., хотя и с некоторыми особенностями, вытекающими из дискретной структуры вещества [3]. Анализ распространения возмущений может быть выполнен на основе усредненного подхода, предполагающего равномерное "размазывание" массы по всему объему образца. Полученная на этом пути информация

может рассматриваться как первое и естественное приближение к описанию сложного поведения вещества. Важно лишь при этом помнить о границах применимости такого приближения.

Опираясь на усредненный подход, проанализируем электрический отклик образца на воздействие УВ. Оценка времени перераспределения тока для элементарной ячейки губки приводит к величине $\tau \sim 2 \cdot 10^{-9}$ с. Поскольку характерное время прохождения УВ ячейки составляет $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ с и на два порядка превышает τ , то электромагнитное состояние образца при воздействии на него УВ является равновесным. Воспользуемся электротехнической моделью и представим образец в виде двух параллельно соединенных сопротивлений, соответствующих несжатой и сжатой УВ областям. Предположим, что электропроводность вещества изменяется за фронтом волны мгновенно от значения σ_1 до σ_2 и в дальнейшем остается постоянной. Тогда проводимость сжатого вещества может быть найдена следующим образом:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{V_0}{V} - 1 + \frac{t}{T} \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{U}{D}\right) \frac{t}{T}$$

Здесь V_0 — начальное напряжение на образце, V — текущее напряжение, T — время прохождения волной образца, U — массовая скорость за фронтом волны.

На рис. 4 показаны экспериментальная осциллограмма и результат ее обработки в переменных $(V_0/V - 1, t)$. Как следует из (1), представление экспериментальных данных в таких переменных должно приводить к прямой линии, тангенс угла которой к оси абсцисс определяет величину проводимости веществ в УВ. Из рис. 4 видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую линию. Систематические отклонения экспериментальных данных наблюдаются в конце сжатия образца. Таким образом, модель скачкообразного изменения проводимости за ударным фронтом в целом согласуется с опытными данными.

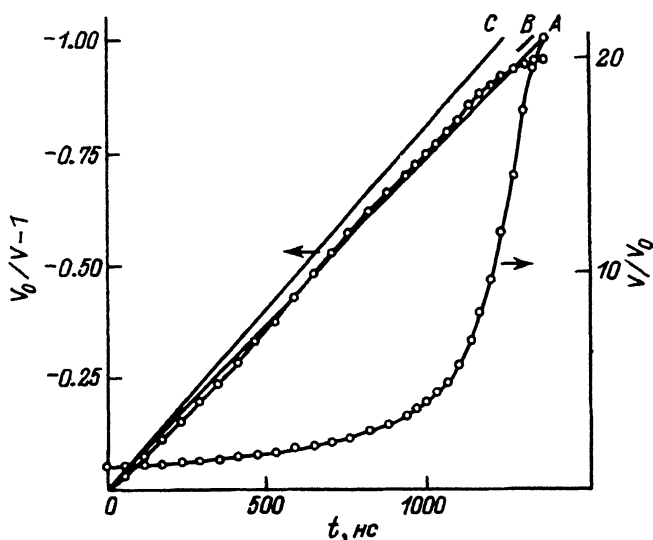


Рис. 4. Экспериментальная осциллограмма (опыт 451) и результат ее представления в переменных $(V_0/V - 1, t)$.

Внимательный анализ экспериментальных зависимостей $V(t)$ позволяет сформулировать ряд утверждений. При обработке данных в переменных $(V_0/V - 1, t)$ получаем прямую линию, наклон которой связан с величиной электропроводности сжатого вещества. Существует предельная прямая, соответствующая полной потере проводимости вещества за ударным фронтом. Такая прямая соединяет точки $(0,0)$ и $(-1, T)$. Экспериментальные точки могут располагаться только ниже предельной прямой. Такой прямой может быть, например, прямая, соединяющая точки O и B (не показана на рисунке во избежание загромождения). Следовательно, выход УВ на стенку происходит раньше, чем напряжение на образце $V(t)$ достигает максимума. Далее, можно указать временной интервал, в котором УВ приходит на стенку. Верхняя граница этого интервала задается точкой B , а нижняя находится посредством предельного перехода и нулю начальной плотности образца. Тогда УВ, генерируемая в диэлектрическом экране зарядом взрывчатого вещества, выходит на свободную поверхность. Предполагая удвоение массовой скорости при выходе волны на свободную поверхность, найдем максимальное значение скорости ударной волны. Предельная прямая, соответствующая нулевой плотности образца, обозначена OC на рис. 4. Таким образом, момент прихода УВ на диэлектрическую стенку лежит в интервале абсцисс точек B и C . Различие скорости волны, соответствующее этим точкам, составляет около 6%, что примерно равно точности экспериментального определения скорости волны. Вместе с тем, как ясно из рис. 4, небольшая погрешность в определении скорости волны приводит к большой неопределенности в нахождении проводимости сжатого вещества (если OB — предельная линия, то экспериментальные точки соответствуют практически полной потере проводимости за фронтом, если OC — предельная линия, то данные соответствуют увеличению сопротивления образца в конце сжатия в 18 раз). Таким образом, вследствие, с одной стороны, недостаточной точности определения скорости ударной волны, а с другой, большой перестройки сопротивления значение проводимости губчатых образцов может быть найдено лишь на фазе выхода УВ на стенку и в более поздние моменты, когда вещество испытывает многократное сжатие.

В ударной волне каркас губки деформируется, однако так как значения давления навелики, то сжимаемостью самого материала каркаса можно пренебречь. Полагая, что проводимость в сжатом состоянии обусловлена в основном высоконагретыми областями перемычек, а газ мало сказывается на интегральном эффекте проводимости, можно ожидать, что проводимость металлического каркаса губка (проводимость собственно никеля) уменьшается в 20–40 раз. Новое значение проводимости никеля соответствует состоянию с высокими термодинамическими параметрами. Средняя же проводимость губки зависит от сжатия образца, изменяется менее резко и может даже возрасти при сжатии. Численное значение этой интегральной характеристики сильно зависит от вида уравнения ударной адиабаты. Использование уравнения состояния Оха приводит к значениям перестройки средней проводимости $\sigma_2/\sigma_1 \approx 1.3$ – 1.4 для опытов первых двух серий, $\sigma_2/\sigma_1 \approx 0.4$ для третьей серии.

В проведенных опытах характер изменения напряжения при однократном сжатии одинаков для образцов различной плотности. В волне

разрежения, однако, поведение сигналов различается (кривые 2 и 3 на рис. 3): для плотной губки ($\rho_0 = 570 \text{ Кг/м}^3$) сохраняется стационарный уровень, для наиболее пористых образцов ($\rho_0 = 190 \text{ Кг/м}^3$) сигнал возрастает с характерным временем $\sim 1.7 \text{ мкс}$, при этом перестройка сопротивления достигала ≈ 70 . Наблюдаемый характер сигналов может быть связан с термодинамической неравновесностью материала каркаса и газа в порах. Время установления теплового равновесия материала губки составляет $t_* \sim \rho C a^2 / \lambda$, где ρ — плотность, C — теплоемкость, a — толщина стенки проводящего каркаса, λ — коэффициент теплопроводности. Такая оценка в случае губки $\rho_0 = 190 \text{ Кг/м}^3$ дает $t_* \sim 2 \text{ мкс}$, что близко к наблюдаемому времени роста сигнала. Поскольку t_* превышает время ударного сжатия образца, то состояние губки за ударным фронтом является существенно неравновесным.

Обсуждение и перспективы

В проведенных экспериментах зафиксировано ударное изменение сопротивления высокопористого образца в 20–40 раз. Перестройка сопротивления образца происходит в основном в конце сжатия образца (изменение сопротивления в ϵ раз сосредоточено в интервале времени 150–200 нс). Эффект резкого изменения электрических свойств образца может быть использован в ряде приложений экспериментальной техники ударных волн [7,8].

В настоящей работе мы ограничились описательным подходом для характеристики электрического отклика образца и не обсуждали детально природу состояния высокопористого вещества за ударным фронтом. Последнее требует как развития модельного описания высоконагретого, высокоэнтропийного состояния вещества в широкой области изменения определяющих параметров, так и постановки новых экспериментальных методик, ориентированных на изучение поведения вещества при разгрузке. Поскольку, как показали результаты опытов, ударно сжатое вещество является существенно гетерогенным, то в нем имеется сильная неравновесность металлического каркаса и газа в порах. В таком веществе происходят процессы установления термодинамического равновесия в каркасе губки, активное перемешивание и процессы расширения высоконагретого материала по объему образца. Эти эффекты должны проявляться на фазе расширения вещества в волне разрежения и их исследование представляет значительный интерес с точки зрения физических свойств вещества в околокритической области фазовой диаграммы.

В заключение автор выражает благодарность В.К.Шелегу за предоставленную возможность исследования высокопористых образцов, Е.И.Биченкову и А.М.Трубачеву за плодотворные обсуждения материалов работы.

Исследования, описанные в этой работе, были поддержаны грантом № 94-02-04022 Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Аврорин Е.Н., Водолаго Б.К., Симоненко В.А. др. // УФН. 1993. Т. 163. № 5. С. 1-34.
 - [2] Трунин Р.Ф., Симаков Г.В. // ЖЭТФ. 1993. Т. 103. Вып. 6. С. 2180-2188.
 - [3] Хвостов Ю.Б. // ДАН СССР. 1987. Т. 294. № 2. С. 302-306.
 - [4] Fortov V.E., Neshman A.V., Filimonov A.S. Shock Compression of Condensed Matter. Proc. Conf. / Ed. S.C.Schmidt, R.C.Dick, G.J.Forber, D.G.Tasker. Elsevier Science Publishers, 1992. P. 745-748.
 - [5] Гилев С.Д. // ФГВ. 1994. Т. 30. № 2. С. 71-76.
 - [6] Oh K.Y., Persson P.A. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 10. P. 3852-3856.
 - [7] Гилев С.Д., Трубачев А.М. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 15. С. 914-917.
 - [8] Биченков Е.И., Гилев С.Д., Трубачев А.М. // ПМТФ. 1989. № 2. С. 132-145.
-