

Санкт-Петербургский государственный университет  
Saint-Petersburg State University

# Х Поляховские чтения

Материалы  
международной научной конференции по механике,  
23–27 сентября 2024 г., Санкт-Петербург, Россия

# X Polyakhov's Reading

Proceedings  
of the International Scientific Conference on Mechanics,  
September 23–27, 2024, Saint-Petersburg, Russia

Санкт-Петербург  
2024

УДК 531/534+537+539+51-7+52

ББК 22.2

Д 37

Д 37 X Поляховские чтения : Материалы международной научной конференции по механике, 23–27 сентября 2024 г., Санкт–Петербург, Россия. — СПб.: Издательство ВВМ, 2024. 755 с.

ISBN 978-5-9651-1587-7

В сборник включены материалы докладов, представленных на международную научную конференцию по механике «X Поляховские чтения», которая посвящена 300-летию Санкт-Петербургского университета и 300-летию Российской Академии наук. Материалы содержат информацию о проведенных исследованиях и представляют собой статьи небольшого размера, в которых даётся обобщённое изложение полученных результатов. Обсуждаются современные проблемы теоретической и прикладной механики, динамики естественных и искусственных небесных тел, гидроаэромеханики, физико-химической аэромеханики, механики деформируемого твёрдого тела, устойчивости и стабилизации механических и электромеханических систем, биомеханики, физической механики, применения методов искусственного интеллекта в задачах механики и истории механики.

Под редакцией:

Е.В. Кустовой, А.А. Тихонова, О.В. Куновой, Г.В. Павилайнен, А.В. Орехова.

ISBN 978-5-9651-1587-7

© Авторы, 2024

## Распространение плоской упругопластической волны с учетом разгрузки, связанной с пластическими деформациями

*Иванов В.С., Кац В.М., Морозов В.А.*

*st048035@student.spbu.ru, v.kats@spbu.ru, v.morozov@spbu.ru*

Санкт-Петербургский государственный университет,

199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Аннотация.** Проведен численный расчёт распространения упругопластического импульса механического напряжения при кратковременном импульсном нагружении алюминиевой пластины электронным пучком с учётом разгрузки, связанной с пластическими деформациями. Показано, что при этом происходит быстрое затухание амплитуды упругопластической волны, особенно при распространении коротких импульсов напряжения.

*Ключевые слова:* плоская упругопластическая волна, электронный пучок, пластическая волна разгрузки, кратковременный импульс нагружения.

**Введение.** Исследование динамики высокоскоростного нагружения материалов является одной из сложнейших задач механики. Особенную трудность представляет изучение процессов, происходящих в приповерхностной области твердого тела при воздействии импульсов нагружения в субмикросекундном и наносекундном диапазонах длительности. Это связано с аномальной зависимостью от расстояния основных характеристик ударно-волнового процесса.

При исследовании зависимости между напряжением и деформацией в условиях распространения продольных плоских волн в безграничной среде в статье Д. Вуда [1], пожалуй, впервые, была обнаружена интересная особенность. Оказалось, что снятие нагрузки, вызвавшей упругопластическую деформацию, приводит к появлению вторичных пластических деформаций, т.е. разгрузка связана как с упругими, так и с пластическими деформациями. Эта особенность рассматриваемого в работе Д. Вуда случая существенно отличает его от случая волн в тонких длинных стержнях, где волны разгрузки полностью упруги. Отмеченная особенность более основательно проанализирована в работе [2], в которой рассмотрены основные закономерности упругопластического деформирования твердого тела в одномерных ударных волнах при однооснонапряженном состоянии. Важным, на наш взгляд, является отмеченное в работе [2] замечание, что с наличием упругих предвестников разряжения связано ускоренное (по сравнению с гидродинамическим) затухание упругопластических волн. Данное замечание будет использовано в настоящей работе.

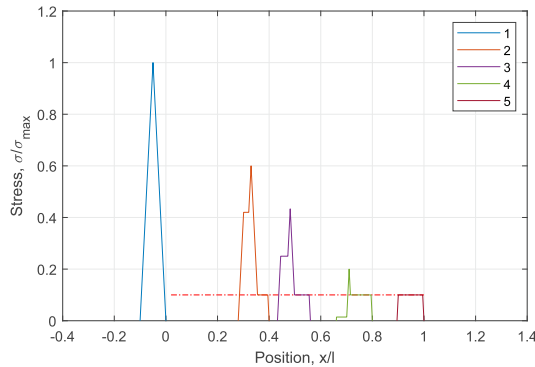
**Распространение импульса напряжения.** Основная цель нашего исследования заключается в численном расчете задачи распространения упругопластической волны напряжения в материале при кратковременном импульсном нагружении алюминиевой пластины электронным пучком и сравнении экспериментальных данных с расчетными. При такой постановке задачи рассматривается распространение волновых возмущений в полупространстве. Существенной особенностью этого случая, отличающего его от случая распространения волн в тонких длинных стержнях, является то, что разгрузка в полуограниченном пространстве идет как упругим, так и пластическим способом [1]. Данное обстоятельство, как будет показано далее, приводит к более быстрому затуханию амплитуды упругопластической волны по сравнению с гидродинамическим затуханием. Особенно это актуально при распространении коротких импульсов напряжения, с которыми мы имеем дело в настоящей работе.

Затухание импульса в данном случае осуществляется таким образом, что упругая часть волны разгрузки (имеющая скорость  $c_0$ ) «догоняет» пластическую часть волны первичного нагружения (двигающуюся с меньшей скоростью  $c_1$ ). Это приводит к затуханию волн, ускоренному по сравнению с гидродинамическим режимом распространения волны.

**Расчёт параметров распространения импульса.** Расчет проводится для относительных параметров задачи. Исходный импульс напряжения выбирается в виде равнобедренного треугольника с шириной на половине амплитуды, равной длительности экспериментального импульса, составляющей 70 нс. Амплитуда импульса составляет 280 МПа, и в относительных параметрах берется за единицу. Толщины образцов, на которых проводились измерения напряжений, и их расчет составляли: 1,8 мм; 2,5 мм; 3,5 мм; 4,3 мм. Амплитуда упругого предвестника при распространении волны считалась постоянной, скорость упругих волн в алюминии  $c_0 = 6.26 \cdot 10^3$  м/с.

В качестве оптимизируемых параметров для обеспечения корреляции расчетных и экспериментальных данных применялись: скорость распространения пластических деформаций, длительность импульса, соотношение амплитуды упругого предвестника и амплитуды волны. В результате расчета они составили: скорость распространения пластических деформаций  $c_1 = 5.95 \cdot 10^3$  м/с, длительность импульса сохранилась равной 70 нс, соотношение амплитуды упругого предвестника и амплитуды волны 1/10.

На рис. 1 приведена картина изменения расчетного профиля упругопластической волны и его амплитуды на выбранных толщинах образцов.



**Рис. 1.** Картина изменения расчетного профиля упругопластической волны и его амплитуды на выбранных толщинах образцов (1 — исходный импульс, 2 — импульс в сечении 1,8 мм, 3 — импульс в сечении 2,5 мм, 4 — импульс в сечении 3,5 мм, 5 — импульс в сечении 4,3 мм, пунктирной линией обозначен уровень упругого предвестника).

В таблицу 1 сведены амплитуды напряжений на различных толщинах образцов.

**Таблица 1.** Сравнение результатов расчета и эксперимента.

Толщина образцов, мм	Амплитуда напряжения (эксперимент), МПа	Относительная амплитуда напряжения (эксперимент)	Относительная амплитуда напряжения (расчет)
0	280	1	1
1,8	170	0,61	0,6
2,5	90	0,32	0,43
3,5	60	0,21	0,2
4,3	30	0,11	0,1

**Заключение.** Проведенный численный расчёт распространения кратковременного импульса механического напряжения показал быстрое затухание на достаточно малом, 4,3 мм, расстоянии от зоны приложения нагружения по сравнению с хорошо известным гидродинамическим затуханием.

Полученный результат может найти практическое применение при проектировании конструкций, работающих в условиях кратковременных динамических воздействий.

## Литература

- [1] Wood D. On Longitudinal Plane Waves of Elastic-Plastic Strain in Solids // J. Appl. Mech. 1952. Vol. 19. Iss. 4. P. 521-525. doi: 10.1115/1.4010552.
- [2] Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.

## О периодических орбитах заряженных частиц в суперпозиции поля магнитного диполя и однородного магнитного поля, коллинеарного магнитному моменту диполя

*Колесников Е.К.*,<sup>1</sup> *Клюшников Г.Н.*<sup>1,2</sup>  
*e.kolesnikov@spbu.ru, g.klyushnikov@spbu.ru*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,

199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9,

<sup>2</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ

«Курчатовский институт»,

188300, Российская Федерация, Ленинградская обл., Гатчина, мкр. Орлова роща, 1

**Аннотация.** Известны основные типы периодических орбит заряженных частиц, движущихся в дипольном магнитном поле. В то же время условия, гарантирующие существование периодических орбит, выполняются для достаточно широкого класса магнитных полей. В настоящей работе рассмотрены периодические орбиты в одной из простейших аппроксимаций геомагнитного поля — суперпозиции поля магнитного диполя и однородного магнитного поля с магнитным моментом диполя, коллинеарным индукции однородного поля. Приведены результаты численного поиска периодических орбит в суперпозиционном поле по специальному алгоритму.

**Ключевые слова:** адиабатические инварианты, заряженные частицы, геомагнитное поле, уравнения движения, периодические орбиты, КАМ-теория, теорема Мозера, сечение Пуанкаре, гамильтониан.

**Введение.** В большинстве случаев обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), используемые для описания физических и механических процессов, не имеют аналитического решения, поэтому нельзя сделать никакие выводы о множестве решений системы уравнений в целом и о поведении её отдельных решений на бесконечно больших временах. Когда известны периодические решения либо решения, асимптотически стремящиеся к периодическим, исследование поведения динамической системы значительно упрощается. Периодические решения существуют во многих задачах небесной механики и динамики материальной точки.

Классификация периодических решений определяется соответствием решений ОДУ точкам двумерной плоскости. Такое соответствие может быть легко