

# Связь времен

М. В. ЖЕРНОКЛЕТОВ

Основные направления организованной весной 1947 г. в КБ-11 лаборатории № 4 под руководством 34-летнего кандидата наук Льва Владимировича Альтшулера заключались в проведении исследований на моделях различных схем изделий, разработке динамических методов исследования свойств веществ при ударно-волновом нагружении, получении данных по ударному сжатию и построении на их основе уравнений состояния конструкционных материалов, включая активные металлы. Со дня образования этой лаборатории ведет отсчет современный 4-й отдел газодинамик. При переводе отдела Альтшулера в разные структуры КБ-11 отделу меняли номера. Ядро отдела, сформировавшееся к пятидесяти первому году образования С. Б. Кормер, К. К. Крупников, Д. М. Тарасов, В. Н. Леденев, а позже – А. А. Баканова, М. И. Бражник, В. Н. Зубарев, М. Н. Павловский, Р. Ф. Трунин. Атмосфера, как вспоминал Лев Владимирович, была очень дружная. Периодически по вечерам у него собирались инженеры и лаборанты.

В 1971 г. отделу Р. Ф. Трунина, сменившего к тому времени на посту начальника – Л. В. Альтшулера, – уехавшего в Москву, был присвоен номер 0304.

В 1967 г. в честь двадцатилетия отдела был организован торжественный вечер в «генеральской столовой», на котором присутствовали на-

учный руководитель Ю. Б. Харитон и главный конструктор Е. А. Негин. К юбилейным датам обычно подводят итоги работы и отмечают достигнутые успехи. Перечень исследований, выполненных сотрудниками отдела только за этот период весьма внушителен. Совместно с теоретиками были предложены к разработке более совершенные по сравнению с первой атомной бомбой образцы ядерных зарядов, успешно испытанные в 1951 и 1953 гг. Разработаны устройства, методы и приборное оснащение для газодинамических исследований, внедрены электроконтактная, оптическая, рентгеновская и электромагнитная методики. Получены данные по ударному сжатию многих металлов, при этом потолок давлений для тяжелых металлов достиг 18 Мбар. На основании этих данных построены полуэмпирические уравнения состояния. Начаты исследования уравнений состояния ядерно-активных металлов методом невзрывных цепных реакций. Обоснован и практически реализован метод определения энерговыделения ядерных зарядов при их подземных испытаниях – метод ГШ. Кроме того, подземные испытания явились инструментом для исследования ударной сжимаемости различных материалов при терапаскальных давлениях.

Основные результаты исследований свойств веществ при высоких давлениях и температурах за тот период, открывшие новое направление в



*Л. В. Альтшулер с сотрудниками отдела. Сентябрь 1969 г.*

физике высоких плотностей энергии, представлены в обзоре Л. В. Альтшулера «Применение ударных волн в физике высоких давлений» в журнале УФН (1965. Т. 85. С. 197). Эта статья является одной из наиболее ярких в научном наследии Л. В. Альтшулера и вызывает интерес у специалистов и в настоящее время. Она была высоко оценена зарубежными учеными. Уже к этому времени в нашей стране фактически была создана школа исследований экстремальных состояний вещества динамическими методами.

В 1969 г. Лев Владимирович уехал в Москву, но общение сотрудников с ним не прерывалось, встречались на конференциях, бывали у него дома, обсуждали новые экспериментальные данные и публиковали совместные статьи. Мне довелось проработать непосредственно под руководством Льва Владимировича всего два с половиной года, но тем не менее запомнились его чрезвычайная требовательность к доскональному анализу экспериментальных результатов и нетерпимость к халтуре в науке.

Ударная адиабата вещества определяет на фазовой плоскости лишь одну кривую. Для получения сведений о свойствах вещества вне этой кривой потребовались другие методы. В отделе развивались методы исследования изэнтроп расширения веществ после их ударно-волнового нагружения, квазиизэнтропических режимов сжатия газов, ударного сжатия пористых веществ и др. Об этих направлениях исследований существует достаточно много публикаций, в том числе в журнале «Атом» (М. В. Жерноклетов, А. Л. Михайлов 2006, № 32), мемуарах Р. Ф. Трунина. Поэтому я остановлюсь на направлениях работ, которые проводились в отделе в последние 10–15 лет.

**Радиоволновая интерферометрия.** По инициативе и при поддержке А. Л. Михайлова около 10 лет назад в ИФВ начала интенсивно развиваться микроволновая (или радиоволновая) доплеровская интерферометрия. В нашем отделе ее активно внедряют В. М. Бельский и молодой специалист-выпускник радиофизического факультета ННГУ Е. Н. Богданов.

Радиоволновой метод основан на эффекте Доплера, который заключается в изменении частоты электромагнитного излучения, отраженного от движущегося объекта.

Преимущества применения интерферометра миллиметрового диапазона в исследованиях газодинамических процессов заключаются в отсутствии влияния измерительной аппаратуры на исследуемый процесс; простоте сопряжения

с другими измерительными технологиями; непрерывности измерения параметров движения исследуемого объекта; возможности исследования непрозрачных в оптическом диапазоне сред; высокой точности измерения перемещений и скоростей исследуемых объектов, движущихся с медленно меняющейся скоростью (относительная погрешность до  $10^{-4}$ ); широкие диапазоны изменения скоростей (от  $10^{-4}$  до  $10^4$  м/с) и перемещений (от  $10^{-3}$  до 10 м).

Радиоволновой метод нашел широкое применение в исследованиях детонационных свойств взрывчатых веществ и продуктов взрыва; процессов инициирования взрывчатых веществ; метательной способности взрывчатых веществ; динамической сжимаемости радиопрозрачных материалов; динамики конструкций при воздействии различных нагрузок и т. п.

Несомненное достоинство радиоволнового метода заключается в его способности в ряде случаев заменить сразу несколько традиционных измерительных методик.

**Фазовые переходы.** Изучению фазовых превращений в ударных волнах во ВНИИЭФ уделялось и уделяется значительное внимание. Объектами исследований явились многие элементы периодической системы, галогениды щелочных металлов, минералы, горные породы и многие другие вещества.

С начала 2000-х гг. в отделе активно ведутся работы (А. Е. Ковалев, М. Г. Новиков) по определению диапазонов плавления на ударных адиабатах церия, олова, титана, урана и тантала с помощью измерений скоростей звука в ударно-сжатых состояниях и регистрации фазовых переходов в металлах и органических веществах манганиновыми и ПВДФ-датчиками давления. Использование при измерении скоростей звука оптического метода с применением индикаторных жидкостей позволило существенно улучшить чувствительность метода за счет сильной зависимости интенсивности теплового излучения, вызванного сжатием вещества в ударной волне, от амплитуды давления. По результатам измерений упругих и объемных скоростей звука определены давления, при которых уран, церий и олово начинают плавиться на ударных адиабатах.

Достигнут значительный прогресс в исследованиях волновых структур ударно-



Отколы в образцах церия

сжатых веществ за счет разработки и внедрения динамического датчика давления на основе полимерного сегнетоэлектрика поливинилиденфторида (ПВДФ-датчик). Основной вклад в разработку датчиков плоской и торцевой конструкций внесли В. А. Борисенко, В. Г. Симанков и В. А. Брагунец. С использованием этого датчика в цери, имеющего сложную и не до конца изученную фазовую диаграмму, в диапазоне давлений от 4 до 12 ГПа зарегистрирована двухволновая структура, состоящая из головной волны сжатия и следующей за ней ударной волны. Такая структура сформирована в цери в результате изоморфного ( $\gamma$ - $\alpha$ ) фазового перехода. Анализ структуры ударной волны и волны разрежения в диапазоне 0,6–3,0 ГПа свидетельствует о том, что в фазе разгрузки в цери формируется ударная волна разрежения. Взаимодействие волн разрежения, возникающих с тыльной стороны ударника и свободной поверхности мишени, приводит к образованию откольного слоя. Во всех опытах, проведенных на однокаскадной гелиевой пушке зарегистрированы отколы. Гладкость отколов свидетельствует о том, что в цери действительно формируется ударная волна разрежения. Приводим фотографию образцов, сохраненных в одном из опытов.

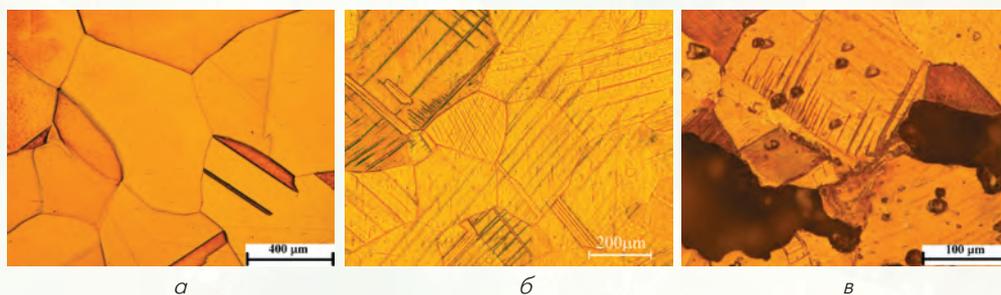
Интересные результаты получены ПВДФ-датчиком при исследовании железа, урана и титана.

Считаю необходимым отметить работы нашего теоретика А. Б. Медведева по построению многофазных уравнений состояния плутония. В настоящее время его уравнения состояния очень востребованы. На основе модификации модели Ван-дер-Ваальса им построены широкодиапазонные уравнения состояния значительного ряда металлов с учетом плавления, испарения и ионизации, взрывчатых веществ в области давлений и температур, характерных для детонационных процессов и многих газов.

**Рентгенографические исследования.** Широта тематики работ отдела 0304 определялась широтой взглядов Льва Владимировича Альтшулера. Интерес к рентгеноструктурному анализу хорошо иллюстрирует его статья, опубликованная в 1943 г., в которой, в частности, обоснована и показана возможность получения рентгенограмм за короткие времена. В дальнейшем это направление в отделе 0304 разделилось на два: развитие методик сохранения нагруженных образцов и их последующее исследование лабораторными методами (в 1960–1970-х гг. под руководством Альтшулера это направление развивал В. Н. Герман) и импульсное рентгенографирование непосредственно во время ударно-волнового воздействия (Л. А. Егоров). Л. В. Альтшулер активно интересовался внутренним строением Земли, поэтому объектами лабораторного анализа становились не только металлы, но и многочисленные минералы: окислы, галогениды, соли. Что касается второго из этих направлений, то во второй половине 1960-х гг. Альтшулером и Егоровым с соавторами была продемонстрирована возможность и отработана методика съемки структурных рентгенограмм за микросекундные времена. Вскоре была решена и задача получения импульсных рентгенограмм в момент ударно-волнового воздействия на образец.

Оба этих направления исследования структуры при высокоскоростной деформации актуальны в отделе до сих пор. Естественным образом происходит методическая модернизация исследований. На смену старым рентгеновским установкам типа УРС и АРС пришел новейший дифрактометр Shimadzu XRD-7000. Металлографическая методика оснащается новым оборудованием для микроскопии и пробоподготовки. В последнее время А. М. Подурцом вместе с молодыми сотрудниками И. Н. Кондрохиной, А. Н. Баландиной и М. И. Ткаченко ведутся работы по исследованию механизмов деформации

при высоких скоростях нагружения. Как видно из приведенных фотографий, изменения в структуре металлов при ударном нагружении имеют свои особенности и пока, как правило, не описываются современными теоретическими физическими моделями.



Микроструктура крупнозернистой меди М1 до (а) и после (б, в) воздействия ударной волны. На снимке (б) внутри зерен видны полосы — пакеты двойников; на снимке (в) — поры и зоны интенсивного пластического течения

**Инертные и молекулярные газы.** Практически не прерываются исследования свойств инертных и молекулярных газов при мегабарных давлениях. Первые результаты по ударно-волновому сжатию и исследованию уравнений состояния сильно неидеальной плазмы аргона и ксенона были опубликованы в 1980 г. в статье (ЖЭТФ. Т. 78. Вып. 2. С. 573), которую рецензировал Л. В. Альтшулер. Сохранились его замечания и предложения по улучшению статьи, которые были учтены авторами. Результаты исследований сжатия жидких и твердых изотопов водорода ударными волнами неоднократно публиковал Р. Ф. Трунин, в том числе в журнале «Атом», 2012, № 55.

Мы исследуем газы как в жидких, так и газообразных начальных состояниях. Не так давно в отделе получены данные по ударному сжатию жидкого азота при давлениях от 100 до 330 ГПа. Эти эксперименты дали важную информацию об адиабате Гюгонию плотного азота, нагретого до температур 10–80 кК, с плотностью, в разы превышающей плотность конденсированного состояния. В области давлений 100–300 ГПа зафиксировано максимальное сжатие азота. При давлениях выше 160 ГПа ( $P$ – $\rho$ ) зависимость (давление–плотность) на ударной адиабате, согласно экспериментам, приобретает примечательный практически изохорный характер со степенью сжатия  $\rho/\rho_0 \approx 4,2$ , близкой к идеально-газовой ( $\rho/\rho_0 = 4$ ). Такое поведение ударной адиабаты получено впервые. Совместный термодинамический анализ данных при мегабарных давлениях по термическому и калорическому уравнениям состояния азота позволил установить совокупность достаточно жестких ограничений, которым должны удовлетворять все теоретические модели, претендующие на адекватное физическое описание термодинамики азота при этих температурах.

Исходя из сравнения теоретических предсказаний, даваемыми молекулярными и плазменными моделями, высказано предположение, что при  $P \approx 100$  ГПа,  $T \approx 1600$  К и  $\rho \approx 3,3$  г/см<sup>3</sup> ударно-сжатый азот испытывает новый тип «ионизации давлением», отличный от аналогичного процесса в водороде, происходящий не из молекулярного, как в водороде, а из полимерного состояния – в состояние плотной неидеальной плазмы.

Для надежного обоснования этого предположения в 2012 г. проведены эксперименты по ударному сжатию газообразного азота, предварительно статически сжатого до плотности



Исследователи церия. Слева направо: Алексей Ковалев, Михаил Жерноклетов (ВНИИЭФ); Марвин Зохер, Френк Черне (ЛАНЛ); Вячеслав Таржанов, Александр Петровцев, Владимир Дремов (ВНИИТФ)

жидкого азота (0,8 г/см<sup>3</sup>), которые подтвердили ранее полученный изохорный характер сжатия азота при давлениях выше 100 ГПа.

**Международное сотрудничество.** По-видимому, старт международной научной деятельности отдела открыл Р. Ф. Трунин, принимавший участие в январе 1988 г. во встрече российских и американских руководителей и специалистов, на которой обсуждался вопрос о согласованном контроле мощности ядерных испытаний, проводимых в США и России. В августе 1988 г. на полигоне Невада было проведено подземное испытание ядерного заряда, на котором присутствовал Р. Ф. Трунин, с использованием российских и американских методов измерения мощности, после чего были намечены пути совместного скоординированного контроля ядерных испытаний.

В августе 1990 г. на базе отдыха Иркутского государственного университета состоялось международное совещание, посвященное теоретическим и экспериментальным исследованиям свойств веществ при высоких давлениях и температурах. По количественному составу оно было небольшим, но впечатляющим был качественный состав участников совещания. От ВНИИЭФ, ВНИИТФ и ИПМ (Москва) было по 7 человек (от отдела 0304 были М. В. Жерноклетов, А. Б. Медведев и Р. Ф. Трунин). Несколько ведущих ученых, среди которых был Лев Владимирович, представляли другие институты Москвы. Из США присутствовали сотрудники национальных лабораторий Ливермора, Лос-Аламоса, Сандии, из университета штата Вашингтон. Достаточно сказать, что на этом со-



*Л. В. Альтшулер получает премию APS в США. 1991 г.*

вещании присутствовали четыре будущих лауреата премии Американского физического общества за плодотворный вклад в исследования материи ударными волнами (Л. В. Альтшулер, Ёгендра Гупта, В. Е. Фортов, Деннис Грейди). Первым лауреатом из этой четверки уже в следующем году стал Лев Владимирович.

Американцы, по моему, впервые воочию увидели одного из основателей в России динамических методов исследований высоких давлений. С интересом слушали его выступления и задавали много вопросов на дискуссиях,

проходивших после ужина. Опубликованные работы Л. В. Альтшулера они хорошо знали и признавали его заслуги в физике высоких плотностей энергии. В беседе со Львом Владимировичем Ёгендра Гупта отметил, что в начале научной деятельности, начавшейся в университете штата Вашингтон, его руководитель принес ему две обзорные статьи, автором одной был Уолш, автором другой, уже упоминавшейся статьи в журнале УФН, был Альтшулер, которая сыграла заметную роль в выборе направления его научного интереса.

Мы принимали активное участие в деятельности Международного научно-технического центра и выполнили несколько проектов, руко-

водителями которых были М. В. Жерноклетов, В. В. Мохова, Р. Ф. Трунин.

С 1995 г. наши сотрудники принимают участие в международных научных конференциях, первой из которых была конференция в США по ударным волнам в конденсированных материалах. Международное сотрудничество для ученых играет большую роль и предоставляет возможность участвовать в зарубежных конференциях.

Примерно с 1998 г. началось плодотворное сотрудничество с ЛАНЛ (Лос-Аламос) по темам, связанными с исследованиями уравнений состояния и фазовых превращений ударно-сжатых веществ. Чуть позже начались работы в рамках контракта с ЛЛНЛ (Ливермор) по исследованию ударно-волновой сжимаемости жидкого водорода в мегабарном диапазоне давлений.

В сотрудничестве с ЛАНЛ по теме «Исследование фазовых изменений в ударно-сжатых материалах ПВДФ и манганиновыми датчиками» с 2002 по 2012 г. в отделе выполнены 4 проекта и получены данные по структурам ударных волн, фазовым переходам и диапазонам плавления на ударных адиабатах церия, олова, титана. В августе 2009 г. в Праге состоялась конференция, посвященная прогрессу в исследованиях свойств и поведения материалов при динамических нагрузках. В нескольких докладах обсуждались результаты исследований свойств церия, выполненных во ВНИИЭФ, ВНИИТФ и ЛАНЛ. Участники этих исследований с большим удовлетворением отметили согласованность результатов, полученных в разных лабораториях.

Одна из целей сотрудничества ВНИИЭФ и ЛАНЛ заключается в том, чтобы результаты деятельности были доступны как можно более широкому кругу научной общественности. Поэтому итоги общей деятельности обобщались в совместных докладах на конференциях, публикациях в журналах. Особо стоит отметить издание монографии «Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках» (под редакцией М. В. Жерноклетова и Б. Л. Глушака, при участии В. Андерсона, Ф. Черни, М. Зохе-ра) в престижном международном издательстве



*Л. В. Альтшулер и М. В. Жерноклетов на конференции в Санкт-Петербурге. Сентябрь 1996 г.*



*Обсуждение в Москве. Фрэнк Черни, Михаил Жерноклетов, Ольга Тюпанова*



Отдел 0304. Апрель 2012 г.

«Springer». Окончательное редактирование книги проходило в Москве.

Десять лет назад началось сотрудничество ИФВ с французскими научными центрами – СЕА-ДАМ, Thales, Centre d'Etudes de Gramat (CEG). Основными участниками работ от нашего отдела являются В. М. Бельский и Е. Н. Богданов. На французских коллег большое впечатление произвели экспериментальные методики с применением для регистрации высокоскоростных динамических процессов радиоинтерферометра миллиметрового диапазона. В 2012 г. в центр Грамма на контрактной основе осуществлена передача технологии использования радиоинтерферометра.

**Отдел 0304 в цифрах.** 7 сотрудников (Л. В. Альтшулер, Ю. М. Стяжкин, Р. Ф. Трунин, М. Н. Павловский, М. В. Жерноклетов, В. А. Борисенко, А. Б. Медведев) стали докторами наук; 18 сотрудников защитили кандидатские диссертации.

Лауреаты премий: Л. В. Альтшулер – Ленинская, три Государственных, премия Правительства РФ; Ю. М. Стяжкин – Ленинская, Государственная премии; Р. Ф. Трунин – две Государственные, премия Правительства РФ; А. А. Баканова – две Государственные премии; А. Б. Сельверов, Е. Я. Юрин, В. С. Степанюк, С. Ф. Маначкин – Государственные премии; М. В. Жерноклетов, А. Б. Медведев, М. А. Мочалов, Л. В. Попов, А. Г. Севастьянов, Г. В. Симаков, Г. С. Телегин – премия Правительства РФ.

Р. Ф. Трунин – заслуженный деятель науки РФ.

С 1958 г. сотрудники печатаются в академических изданиях, в том числе в ведущих журналах – УФН, ЖЭТФ, ФГВ, ПМТФ, трудах конференций и симпозиумов и др. К 60-летию отдела по инициативе Р. Ф. Трунина во ВНИИЭФ изданы четыре тома сборника «Поведение веществ под воздействием сильных ударных волн», в котором представлены практически все статьи (более 250), опубликованные сотрудниками отдела в период с 1958 по 2007 г. В 1995 г. большая группа сотрудников отмечена премией МАИК за лучшую публикацию года в журнале «Теплофизика высоких температур».

В мае 2003 г. я получил от Льва Владимировича в подарок журнал «История науки и техники» (2003, № 4) с дарственной надписью: «С пожеланиями "взрывных" успехов. Лев Владимирович Альтшулер. 10.05.2003», где была его статья «Затерянный мир Харитона». К сожалению, в конце года его не стало. А взрывные эксперименты мы продолжаем успешно проводить.

**ЖЕРНОКЛЕТОВ Михаил Васильевич** –  
начальник отдела 0304 ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
доктор физ.-мат. наук, профессор,  
лауреат премии Правительства РФ