МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ИФВ

В. А. РАЕВСКИЙ

После окончания «холодной войны» ядерное оружие перестало играть роль инструмента политического давления и превратилось в фактор ядерного сдерживания, в гарант мировой стабильности. В этих условиях значительно возросло взаимное доверие стран членов «ядерного клуба». С 1990-х гг. началось развитие научного сотрудничества ядерных лабораторий России, США, Франции, Китая, Великобритании.

Газодинамическое отделение ВНИИЭФ, позднее ИФВ (Институт физики взрыва) активно включилось в это сотрудничество по направлениям, в которых мы занимали и занимаем по сей день лидирующее положение в мировой науке. В первую очередь, это газодинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание, физика высоких плотностей энергии, уравнения состояния, динамическая прочность и разрушение, полиморфные фазовые переходы, физика взрывчатых превращений и др. Наиболее значительный вклад в развитие международного научного сотрудничества внесли: Е. Е. Мешков, А. Л. Михайлов, А. Г. Иванов, С. А. Новиков, Р. Ф. Трунин, М. В. Жерноклетов, В. А. Раевский, А. И. Лебедев, В. М. Бельский, О. Н. Игнатова, А. В. Гладцинов, Н. В. Невмержицкий, В. С. Степанюк, О. Б. Дреннов и др.

Эта деятельность заключалась в участии в международных конференциях, в проведении совместных исследований по вопросам, представляющим взаимный интерес, в совместных публикациях и докладах на конференциях, в исследовательских работах на контрактной основе, а также в проведении совместных экспериментов на экспериментальном полигоне ИФВ.

Стартом международной научной деятельности Российских ядерных центров по тематике ИФВ можно считать январь 1988 г. Тогда на встрече российских и американских руководителей (И. М. Паленых, Р. Баркер) и специалистов (В. Н. Михайлов, В. А. Симоненко, Н. П. Волошин, М. А. Подурец, Р. Ф. Трунин и др.) обсуждался вопрос о согласованном контроле мощности ядерных испытаний, проводимых в США и России.

17 августа 1988 г. на полигоне Невада был проведен подземный ядерный взрыв с использованием российских и американских методов измерения мощности. В результате этого эксперимента был продемонстрирован примерно одинаковый уровень технологии измерения мощности в России и США, намечены пути совместного скоординированного контроля ядерных испытаний, значительно возросло доверие между нашими странами в этой весьма сложной проблеме.

В 1989 г. Е. Е. Мешков, уже известный мировому научному сообществу своим открытием нового вида гидродинамических неустойчивостей, принял участие в конференции по физике плазмы, организованной Американским физическим обществом (APS) в г. Аннахейм и затем в двухдневном семинаре по гидродинамическим неустойчивостям в г. Плезантоне.

По-видимому, эти встречи вызвали большой интерес американцев к деятельности ВНИИЭФ и ВНИИТФ в области гидродинамических неустойчивостей, и сотрудничество в этом направлении продолжается по сей день. Для иллюстрации исследуемой проблемы на рис. 1 приведены картины развития гидродинамических неустойчивостей, зарегистрированные оптической методикой.

Полноценное включение ВНИИЭФ в международное научное сообщество началось в начале 1990-х гг. после смелого решения лидеров двух государств Б. Н. Ельцина и Дж. Буша-старшего о развитии сотрудничества ядерных центров. Немаловажную роль здесь сыграла финансовая поддержка этого решения конгрессом США.

Вот некоторые ключевые этапы этой деятельности. В 1993 г. в г. Альбукерке (США) состоялся семинар ядерных лабораторий «Контейнеры

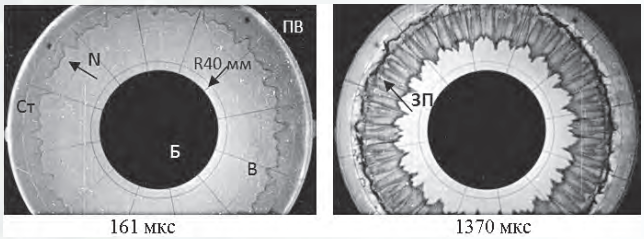


Рис. 1. Развитие суперпозиций гармоник на внутренней поверхности сходящейся цилиндрической оболочки. ПВ — продукты взрыва; Ст — оболочка из студня; В — воздух; N — гармоническое возмущение (N=26+42+58); ЗП — зона перемешивания; Б — жесткая вставка

Рис. 2. Транспортабельный взрывозащитный контейнер «Колба»

и безопасность транспортировки». Большой интерес к российским разработкам был вызван лидирующим положением ВНИИЭФ в этой области. Уже тогда во ВНИИЭФ имелся значительный опыт в разработке взрывостойких контейнеров. Был создан транспортабельный контейнер «Колба», выдерживающий взрыв ядерного заряда мощностью 250 кг тротила и исключающий выход радиоактивных продуктов. В результате плодотворных дискуссий (А. Г. Иванов, А. Л. Михайлов (ИФВ), Д. Борер, К. Карбинер) родилось многолетнее сотрудничество по взрывостойким контейнерам, продолжавшееся 15 лет (В. П. Соловьев, М. А. Сырунин).

По инициативе С. А. Новикова совместно с коллегами из Сандийской лаборатории была проведена серия работ в рамках проектов МНТЦ и прямых контрактов в интересах промышленной и транспортной безопасности: «Создание совместного американско-российского банка данных по авиакатастрофам», «Натурные и модельные исследования разрушения и пожаров при авиакатастрофах», «Исследование механической реакции самолета и груза при аварийном соударении».

Большое значение для развития численных методов расчета разрушения конструкций имеет работа, проведенная совместно с Сандийской лабораторией «Валидация аварий — ДОЕ-2002-13». В рамках данной работы создан обширный банк данных по воздействию динамических и статических нагрузок на материалы и простейшие конструкции (трубчатые образцы, полусферы).

Начиная с 1995 г. наши сотрудники стали постоянными участниками международных конференций APS по направлению «Ударное сжатие конденсированного вещества».

Примерно с этого же времени начинается интенсивное, плодотворное сотрудничество с тремя ядерными лабораториями США по исследованию реологии твердых веществ при интенсивных динамических нагрузках. Перечислим лишь некоторые направления, по которым были достигнуты новые важные результаты. Это — динамическое разрушение, диспергирование материалов, а также поиск эффективных способов снижения выброса диспергированной фракции токсичных материалов в аварийных ситуациях (А. Г. Иванов, Н. П. Хохлов, В. А. Огородников, А. Л. Михайлов). На рис. 4 — опыты по исследованию диспергирования материалов.

Рис. 3. Подготовка испытания взрывозащитного контейнера совместно со специалистами Сандийской лаборатории

Рис. 4. Видеокадры взрывных явлений в опытах по исследованию диспергирования материалов, t = 80 мкс. Сверху — открытый заряд; в центре — заряд в пожарной пене; внизу — заряд засыпан алюмосиликатными полыми микросферами

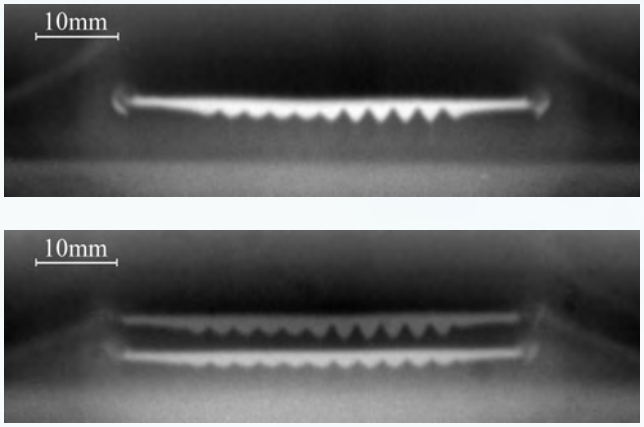


Рис. 5. Импульсная рентгенографическая регистрация развития возмущений на поверхности ускоряемого лайнера. Наверху — однокадровый режим, внизу — двухкадровый режим

Это — гидродинамические неустойчивости в прочных средах при высоких давлениях (В. А. Раевский, П. И. Низовцев, С. М. Бахрах, А. Л. Михайлов, А. И. Лебедев С. А. Надежин и др.). В ходе этих работ установлено влияние формирования гетерогенных двойниковых структур на временное разупрочнение ряда металлов. Впоследствии эти исследования превратились в метод экспериментального обоснования широкодиапазонных моделей прочности (рис. 5).

Это также — структурные изменения в металлах при высокоскоростном деформировании (О. Н. Игнатова, А. М. Подурец, В. И. Скоков, А. Н. Малышев). При высокоскоростном и, в частности, при ударно-волновом деформировании происходит рост плотности дислокаций, образование сложных двойниковых структур, дробление зерен, увеличение прочности, временное разупрочнение. При значительной деформации и разогреве плотность дислокаций падает и прочность снижается.

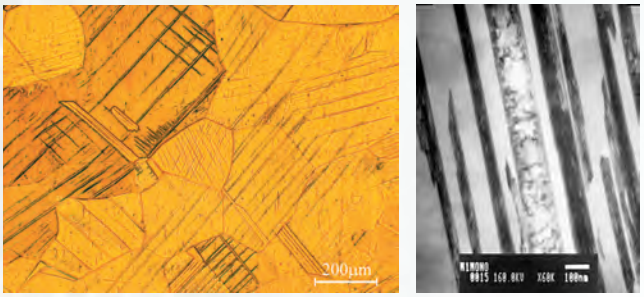
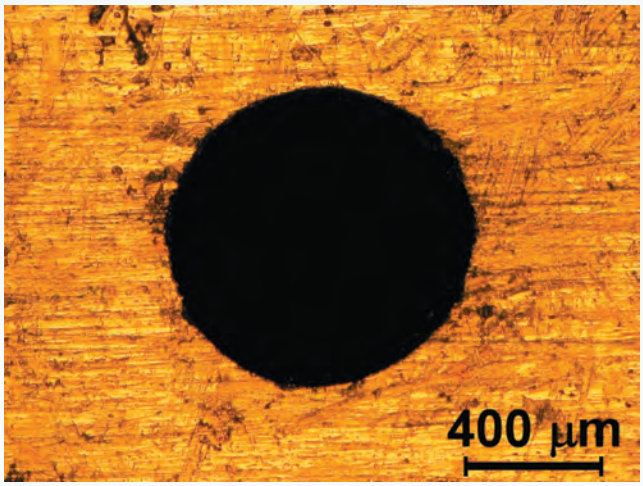
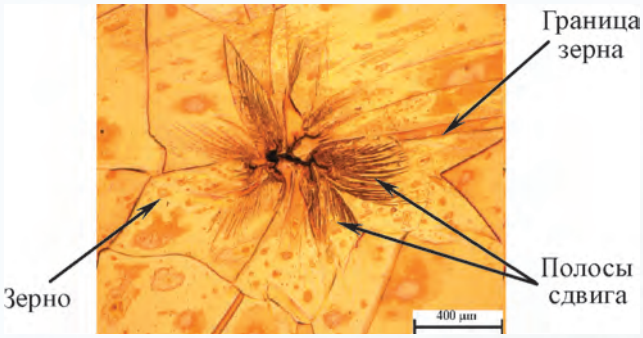


Рис. 6. Гетерогенное деформирование меди при ударно-волновом нагружении. Двойниковые полосы локализованного сдвига в поликристаллической меди и структура двойниковой полосы сдвига



D_0=1021 мкм



D =164 мкм (D/D_0=0,16)

Рис. 7. Гетерогенное деформирование меди при сжатии цилиндрических микроканалов плоской ударной волной

Образование полос сдвига двойниковой природы приводит к нарушению известного масштабного эффекта при откольном разрушении. Суть эффекта в том, что с уменьшением времени действия растягивающих напряжений откольная поврежденность снижается. Однако, как показали эксперименты, при воздействии на образец ударной волны, вызывающей гетерогенное деформирование, поврежденность в волне разгрузки, следующей за ударной волной, возрастает с уменьшением размеров образца и времени действия растягивающих напряжений.

Это — исследование структуры поврежденности при различных временах действия растягивающих напряжений. Обнаружена зонная структура поврежденности при развитии откольного разрушения. Для этого эффекта характерно то, что между поврежденными зонами вещества размером несколько миллиметров существуют зоны, в которых поврежденность вообще отсутствует, хотя интенсивность растягивающих напряжений в этих областях превышала откольную прочность в несколько раз. Этот феномен противоречит существующим моделям разрушения и не имеет до сих пор однозначного физического объяснения.

Упомянем исследование фазовых превращений в ударно-сжатых металлах (М. В. Жерноклетов, А. Е. Ковалев). Наибольшую практическую ценность здесь имеют данные о переходе веществ из твердого в жидкое фазовое состояние

Рис. 8. Подготовка испытания взрывного резака на полигоне в г. Альворадо (США)

в ударной волне и в волне разгрузки. Эти данные получены для многих металлов: Zn, Cu, Ce и др. Большой научный интерес представляют полиморфные фазовые переходы в металлах Fe, Ce, Pu, U. В частности, в церии в области до γ — фазового перехода реализуется аномальный характер сжимаемости — $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right)_S < 0$, что приводит к невозможности формирования в этой области классической ударной волны. Установлено, что аномальное поведение церия связано с тем, что в определенном диапазоне давлений реализуется двухфазное состояние (γ-α-фаза), а в фазе разгрузки формируется ударная волна разрежения.

Кстати, образование ударных волн разрежения в железе, обнаруженное С. А. Новиковым, А. Г. Ивановым, Я. Б. Зельдовичем (диплом на открытие от 25.04.1981 г.) удалось использовать при разработке устройств для взрывной резки стальных толстостенных опор, на которых держатся глубоководные нефтегазовые платформы, выведенные из эксплуатации.

По заказу американской фирмы «Халлибёртон» в ИФВ был разработан специальный взрывной резак (УВР-660) (С. А. Новиков, Ю. В. Батьков, Л. М. Синицына). Испытания резака, проведенные в России и США, дали замечательные результаты. Количество взрывчатки, используемой в нашем устройстве, в несколько раз меньше, чем в устройствах США при той же эффективности резки. Снижение мощности взрывов при разборке морских конструкций весьма важно ввиду жестких ограничений воздействия на морскую фауну. Эта работа получила высокую оценку специалистов фирмы «Халлибёртон».

Еще одна работа, о которой стоит упомянуть, это исследование ударно-волновой сжимаемости жидкого водорода в мегабарном диапазоне давлений. Теоретически предсказанная и подтвержденная в экспериментах с использованием энергии лазера Nova (Ливермор) аномалия в зависимости ударно-волновой сжимаемости водорода от давления вызывала большие сомнения наших и американских ученых. В течение нескольких лет в ИФВ и НЦТФ ВНИИЭФ проводились эксперименты, показавшие отсутствие аномалии сжимаемости водорода в области диссоциации молекул. Примерно в то же время эти результаты были подтверждены экспериментами, проведенными в Сандийской лаборатории (США).

Следует отметить еще одно важное направление трехсторонней международной деятельности специалистов России, Республики Казахстан и США по ликвидации угрозы распространения и использования террористами плутония, оставшегося в диспергированном виде на Семипалатинском ядерном полигоне. До 2000 г. эти работы велись на двухсторонней основе (РФ и Казахстан). С 1999 г. по инициативе З. Хеккера США приняли активное участие в работах, взяв на себя значительную часть финансирования и контроль качества выполнения работ. В результате были найдены и реализованы оригинальные технические решения, позволившие исключить возможность извлечения ~100 кг диспергированного плутония на десятках штольневых и других объектах ядерной деятельности. Значительный вклад в организацию и проведение этих работ внес В. С. Степанюк (ИФВ).

Итоги совместной деятельности, как правило, обобщались в совместных докладах на конференциях, публикациях в журналах. Особо стоит отметить публикацию совместной работы «Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках (М. В. Жерноклетов,

Рис. 9. Прием делегации Росатома заместителем МО США Энди Вебером в Пентагоне

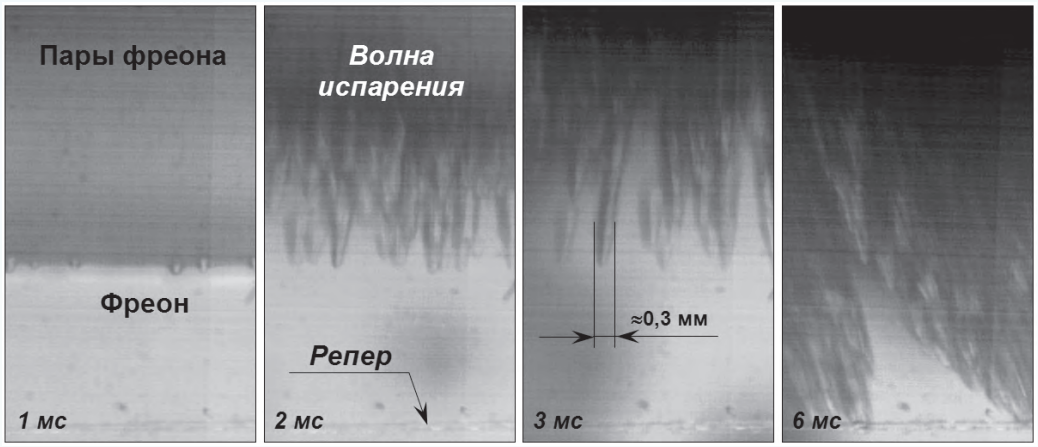
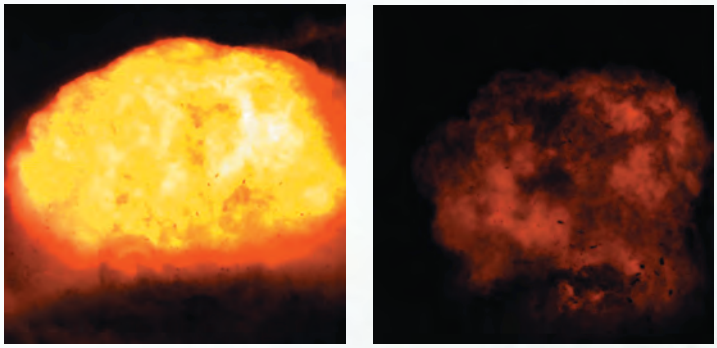


Рис. 10. Развитие волны испарения фреона (микросъемка)

Б. Л. Глушак, В. В. Андерсон, Ф. Л. Черны, М. А. Зохер) в престижном международном издательстве Шпрингер.

Десять лет назад началось сотрудничество ИФВ с французскими научными центрами: CEA-ДАМ, Thales, Centre d'Etudes de Gramat (CEG). Основные участники с нашей стороны:



25 мс *25 мс*

Рис. 11. Расширение облака продуктов взрыва ВВ с примесью алюминия (слева) и без примесей

А. Л. Михайлов, А. В. Гладцинов, В. М. Бельский, В. А. Раевский, А. И. Лебедев, А. В. Родионов и др.).

На французских коллег произвели большое впечатление экспериментальные методики, применяемые для регистрации высокоскоростных динамических процессов; многокадровые рентгенографические комплексы и радиоинтерферометр миллиметрового диапазона, используемые для регистрации высокоскоростных процессов, в том числе и в оптически непрозрачных средах. В настоящее время на контрактной основе осуществляется передача технологии использования радиоинтерферометра в CEG.

Совместно с французскими коллегами проводятся весьма интересные исследования по многим традиционным для ИФВ направлениям, а также совершенно новым, предполагающим развитие новых экспериментальных методов и расчетных методик. Среди них исследование неустойчивостей в металлах (Cu, Ta) при различных скоростях деформации 10^5–10^7 $с^{-1}$, исследование детонации жидкого взрывчатого вещества с добавками микрочастиц алюминия, регистрация развития волны фазового превращения жидкость–пар, исследование диспергирования жидкостей воздушной ударной волной, изучение перемешивания с воздухом и горения облаков продуктов детонации, содержащих алюминиевые частицы.

Это далеко не полный обзор международного сотрудничества, которое в настоящее время продолжает расширяться. Оперативный обмен информацией с ведущими ядерными лабораториями значительно ускоряет решение важнейших научных проблем. В ряде случаев уже на стадии обсуждений становится ясной перспективность или бесперспективность того или иного направления исследований. Это позволяет значительно сэкономить средства на проведение исследований и повышает достоверность получаемых результатов. И, конечно, личное общение с ведущими зарубежными учеными оживляет научную деятельность во ВНИИЭФ.

РАЕВСКИЙ Виктор Алексеевич —
заместитель директора ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ
по НИР, кандидат физ.-мат. наук