

25 ЛЕТ ПЕРВОМУ СОВМЕСТНОМУ РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ С ДИСКОВЫМ ВМГ

А.М. Буйко, С.Ф. Гаранин, И.Р. Линдемут,
Р.Е. Рейновски

*ВНИИЭФ, Саров, Россия
ЛАНЛ, Лос-Аламос, США*

Первый совместный эксперимент [1] - в рамках сотрудничества ВНИИЭФ и ЛАНЛ - был проведен в Арзамасе-16 (сейчас Саров), Россия 22 сентября 1993 г. В эксперименте использовался дисковый взрывомагнитный генератор (ВМГ) с электровзрывным фольговым размыкателем тока (ФРТ), обеспечившим передачу многих мегаджоулей электрической энергии за микросекундное время. В лайнерной нагрузке был получен ток 20 МА, недостижимый в те годы для стационарных лабораторных экспериментов, и электровзрывающийся лайнер был разогнан до 25 км/с.

Успех совместной работы привел к новым проектам в области физики плазмы и термоядерных исследований, исследований свойств веществ, техники и совершенствования самих ВМГ и послужил толчком к разворачиванию программ по контролю и учету материалов и ряду других международных соглашений высокого уровня по сотрудничеству.

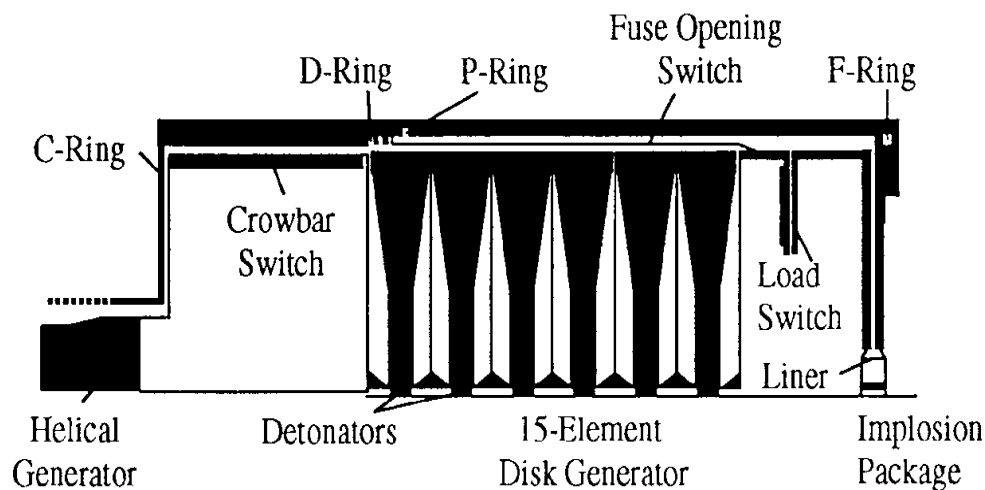
[1] A.M. Buyko, N.P. Bidylo, V.K. Chernyshev, V.A. Demidov, S.F. Garanin, V.N. Kostyukov; A.A. Kulagin, A.I. Kuzyaev, A.B. Mezhevov, V.N. Mokhov, E.S. Pavlovskiy, A.A. Petrukhin, V.B. Yakubov, B.T. Yegorychev, J.W. Canada, C.A. Ekdahl, J.H. Goforth, J.C. King, I.R. Lindemuth, R.E. Reinovsky, P. Rodriguez, R.C. Smith, L.R. Veaser, and S.M. Younger, "Results of Russian/US high-performance DEMG experiment," Dig. Tech. Papers. 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, W.Baker and G.Cooperstein, Eds, 1995. PP. 469-477; IEEE Trans. on Plasma Science. 1997. Vol. 25, No. 2, P. 145-154.

В марте 1993 г. обсуждались возможные редакции эксперимента: использовать ДВМГ Ø 0.4 м или ДВМГ с ФРТ, конденсированный или электровзрывной лайнер. Было решено следовать практике ВНИИЭФ - экспериментов с ДВМГ Ø 0.4 м, ФРТ и электровзрывным плазменным лайнером, используя 15-модульный ДВМГ.

В аналогичном эксперименте 1988 г. были получены рекордные характеристики такого устройства, которые соответствовали его номинальному расчету по методике ВНИИЭФ: в лайнерную нагрузку индуктивностью 10 нГ были переданы энергия 10 МДж при мощности 10 ТВ и напряжении на ФРТ 420 кВ.

Эксперимент был проведен 22 сентября 1993 г. во ВНИИЭФ – с участием большого коллектива ученых и специалистов; координаторами от ВНИИЭФ и ЛАНЛ были А.А. Петрухин и Р.Е. Рейновский.





Основные узлы устройства: спиральный ВМГ (СВМГ); ДВМГ с взрывным узлом отключения СВМГ; ФРТ (открывающий ключ); коаксиально-радиальная линия от ФРТ до лайнера, с взрывным замыкателем тока (ВЗТ). Al-лайнер: $R=30$ мм, $\Delta=0.2$ мм, и высота 20 мм.

Производные тока в СВМГ, ДВМГ и различных местах нагрузки измерялись индуктивными датчиками. Токи в ДВМГ и нагрузке были измерены методом фарадеевского вращения плоскости поляризации света в магнитном поле. Для измерений лайнерной имплозии равномерно по азимуту были расставлены индуктивные, световые и электроконтактные датчики.

Начальный магнитный поток в СВМГ создавался конденсаторной батареей (не показана на рис.). Ток СВМГ протекал через ДВМГ и Cu-фольгу ФРТ. В заданное время срабатывал узел отключения СВМГ, образуя цепь ДВМГ-ФРТ с током $I_0 = 6.5$ МА. В это же время начиналась компрессия магнитного потока в полостях ДВМГ, которая длилась до времени окончания работы ДВМГ $t^* = 23$ мкс. Генерируемый ток, протекая через Cu-фольгу ФРТ толщиной 155 мкм и высотой 1.02 м, приводил к ее электровзрыву и формированию на ней импульса напряжения. В заданное время $t_{01} = 19.5$ мкс ВЗТ подключил лайнерную нагрузку к ФРТ и образовал цепь ФРТ-лайнер с индуктивностью 8.5 нГн.

Основные результаты и их сравнение с расчетами

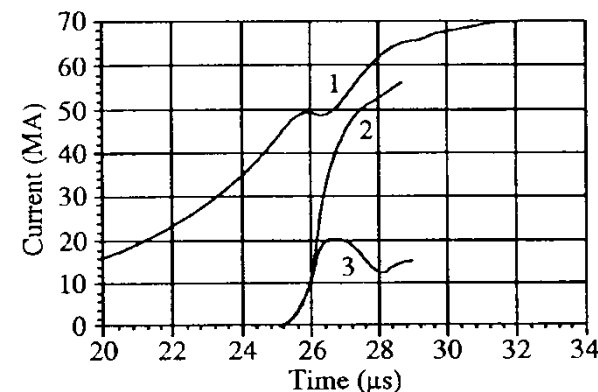
Ожидаемые величины тока и его производной в лайнере: 20-35 МА и 20-35 МА/мкс.

Начальный ток ДВМГ и время подключения нагрузки к ФРТ были близки к ожидавшимся: 6.6 ± 0.5 МА и 19.5 ± 0.1 мкс.

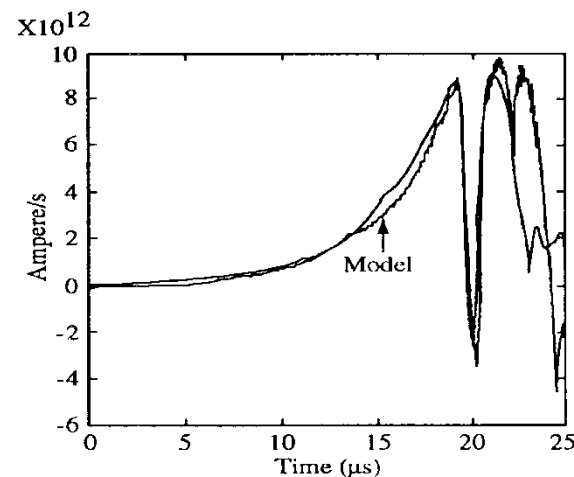
Ток в лайнере достигал 19.5 ± 1.5 МА и 20 ± 1 МА по индуктивным и фарадеевским датчикам, при производной тока до 35 ± 5 МА/мкс.

Но ток и его производная в начале и конце коаксиала нагрузки были существенно различны. Это было результатом пробоя изолятора на «выходе» из ФРТ, в коаксиальной линии, через 0.7 мкс после подключения нагрузки. Расчет с грубой имитацией такой нагрузки дал достаточно близкие к эксперименту результаты.

Это позволило сделать вывод, что ДВМГ и ФРТ в эксперименте работали близко к норме для нагрузки, которая фактически реализовалась. Ток в ДВМГ имел нетипичный вид, но он удовлетворительно имитировался расчетами ВНИИЭФ и ЛАНЛ.



Усредненные токи в ДВМГ и нагрузке



Сравнение усредненной производной тока в ДВМГ с расчетом ЛАНЛ

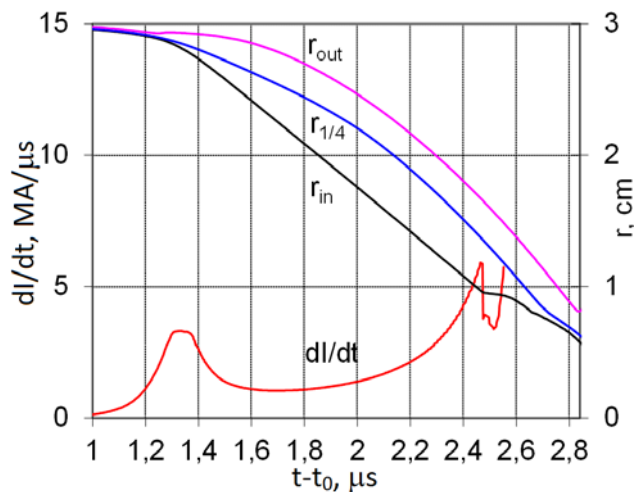
Основные результаты и их сравнение с расчетами

Результаты измерений имплозии лайнера с учетом их погрешностей удовлетворительно согласуются с 1D МГД расчетом имплозии лайнера под действием тока.

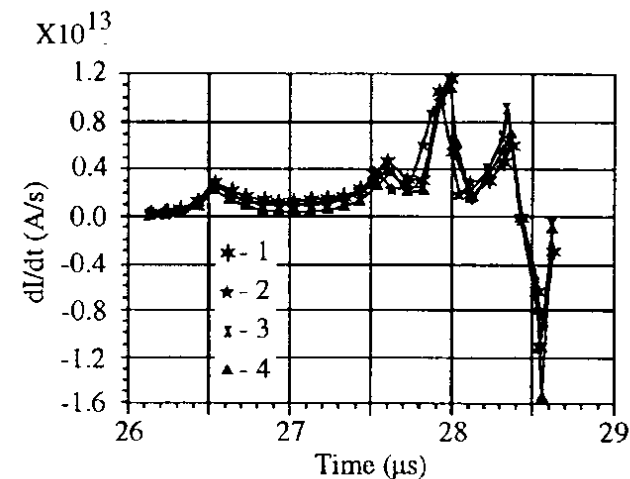
Скорость лайнера в расчете, соответствующая максимуму его кинетической энергии 0.5 МДж, достигала 23 км/с.

Лайнер взорвался в эксперименте через 1.29 мкс (1.30 мкс в расчете) после начала тока. Время движения лайнера по световым датчикам 0.9 мкс (в расчете 1.0 мкс). Среднее время замыкания электроконтактных датчиков в эксперименте и расчете совпадают.

Но асинхронность соударения - продольная и угловая были велики, до 0.4 мкс, что можно связать с угловой асимметрией тока и развитием неустойчивости лайнера.



Результаты 1D МГД расчета ВНИИЭФ имплозии лайнера: радиусы границ лайнера; производная тока под лайнером



Производная тока под лайнером

Успехи последующего сотрудничества в области физики ВПЭ с использованием ВМГ

Успешное проведение первого совместного эксперимента продемонстрировало уникальные возможности взрывной импульсной мощности ВНИИЭФ и открыло перспективы дальнейших совместных исследований двух лабораторий. В последующие два десятилетия две лаборатории провели >25 экспериментальных кампаний во ВНИИЭФ и ЛАНЛ. Результаты экспериментальных кампаний и расчетно-теоретических исследований широко представлены в научной литературе [2-5].

[2] I.R. Lindemuth, C.M. Fowler, R.E. Reinovsky, V.K. Chernyshev, and V.N. Mokhov, in Proc. IX Int. Conf. Megagauss, Moscow-St.-Petersburg, 2002, Sarov, Russia: VNIIEF, 18 (2004).

[3] I.R. Lindemuth and R.E. Reinovsky, in Doomed to Cooperate, S.S. Hecker, Ed. (Bathtub Row Press, Los Alamos, NM, 2016), V. II, 199.

[4] S.F. Garanin, *ibid.*, 215.

[5] The electronic archive of the book "Doomed to Cooperate," S.S. Hecker, Ed. (Bathtub Row Press, Los Alamos, NM, 2016).



Исследование свойств замагниченной горячей плазмы в системах МАГО-MTF

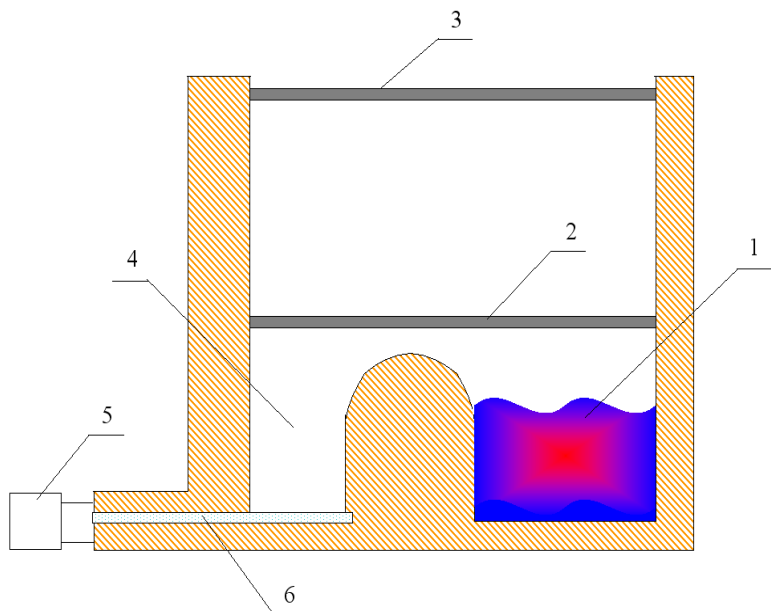


Схема камеры МАГО для предварительного нагрева замагниченной ДТ-плазмы и ее дожатия: 1- 2-ой отсек камеры; 2- внешняя стенка; 3- высокоэнергичный лайнер; 4- 1-ый отсек камеры; 5- ВМГ; 6- изолятор. Имплозия лайнера (3) приводит к сжатию предварительно нагретой плазмы во втором отсеке (1)

Вопросы импульсного термоядерного синтеза, подхода МАГО-MTF, параллельно развивавшегося в двух странах, и связанных с этим подходом вопросов физики ВПЭ играли в сотрудничестве ключевую роль.

Из совместных экспериментов по МАГО следует выделить эксперименты МАГО-2, которые дали огромное количество информации и анализ которых потребовал проведение большого количества расчетов и продолжался не один год. В эксперименте МАГО-2 был установлен рекорд ЛАНЛ по количеству (10^{13}) полученных в одном эксперименте термоядерных ДТ-нейтронов. На эксперименте присутствовало около сотни специалистов-диагностов, а также журналисты и корреспонденты крупнейших американских телекомпаний и газет.

Публикации по МАГО-MTF привлекли внимание по всему миру и сейчас несколько проектов по MTF ведутся в США, дополняя исследования МАГО, а другие проекты по MTF ведутся в Канаде, Китае и Франции.

Совместный эксперимент

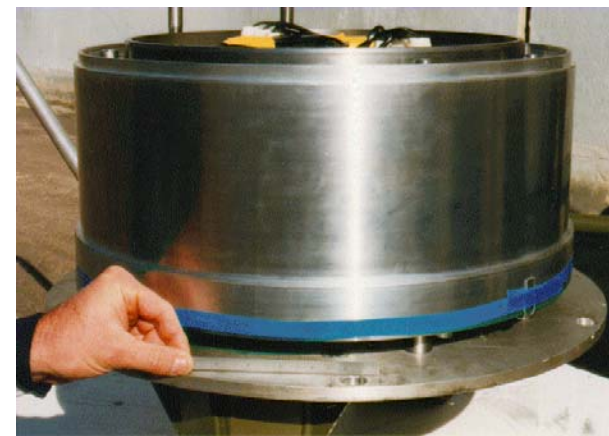
по изучению имплозии конденсированных лайнеров.

В августе 1996 г. во ВНИИЭФ был проведен эксперимент HEL-1 (High Energy Liner, Высокоэнергетический лайнер). Лайнер – под действием тока 100 МА – был разогнан до ~8 км/с и имел рекордную кинетическую энергию, до 25 МДж (этот рекорд не побит и к настоящему времени).

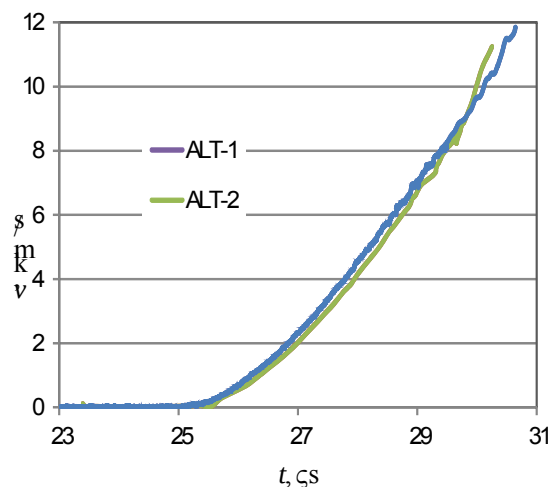
Если добиться того, чтобы плазма в камере МАГО с полученными в экспериментах характеристиках была достаточно чистой, можно достичь порога зажигания при сжатии этой плазмы энергичным лайнером, таким как в эксперименте HEL-1:



Экспериментальная сборка



Лайнер

Экспериментальная
сборка (ALT-2)Зависимости скорости лайнеров от
времени в экспериментах ALT- 1, 2

Эксперименты ALT-1,2 явились прообразом проектов экспериментов ALT-3 и типа ALT-3 - с целями измерений уравнений состояния веществ:

- в условиях нагружения образцов лайнером-ударником при скорости ~ 20 км/с;
- в условиях их изэнтропических сжатий до ~ 20 Мбар при имплозии лайнеров – с целью прецизионных измерений ($\sim 1\%$) уравнений состояния веществ .

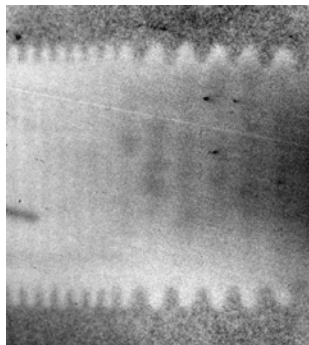
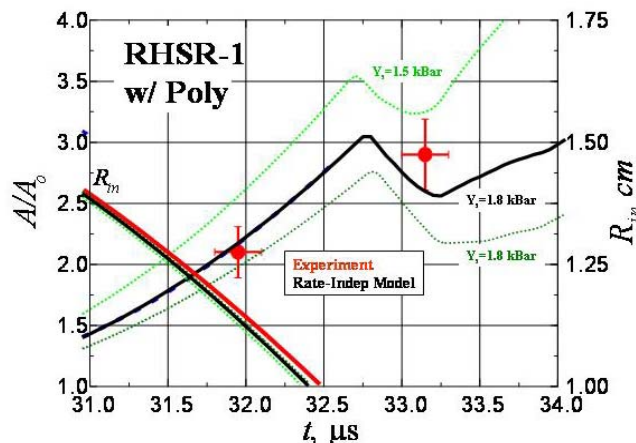
Совместные эксперименты ALT-1 и ALT-2
(Advanced Liner Technology)
проведены во ВНИИЭФ в 1999 и 2001 гг. [6]

Лайнерное устройство с 10-модульным ДВМГ $\varnothing 0.4$ м и ФРТ было разработано во ВНИИЭФ.

Лазерным интерферометром VISAR была зарегистрирована зависимость скорости лайнера от времени с максимальным значением 12 км/с.

Воспроизводимость ALT оказалась замечательной, а система ALT - отличным инструментом для экспериментов в области ВПЭ.

[6] A.M. Buyko, Yu.N. Gorbachev, B.G. Anderson, W.L. Atchison, et al. "Simulation of Atlas parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2," in Proc. IX Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation Related Topics, Moscow-St.-Petersburg, 2002, V. D. Selemir and L. N. Plyashkevich, Eds, Sarov, Russia: VNIIEF, pp. 747-751 (2004).

Экспериментальная
рентгенограммаРост возмущений в эксперименте
RHSR-1 и в расчетах с разным
пределом текучести полиэтилена

В серии RHSR была отработана методика исследования динамической прочности материалов методом роста возмущений в безударном режиме нагружения.

Подтверждены данные о динамической прочности меди до давлений ~ 150 kbar.

Предел текучести полиэтилена оказался 2-2.5 kbar, что больше статической величины в 20-25 раз.

Совместные эксперименты RHSR-1,2
(Russian High Strain Rate), 2003-2004 гг.
- с семимодульным ДВМГ $\varnothing 40$ см.

Исследовалась динамическая прочность меди при давлениях ~ 0.16 Мбар и скоростях деформации 10^{5-6} с^{-1} . Она определялась по скорости роста возмущений ускоряемого медного цилиндрического лайнера, развивающихся из-за Рэлей-Тейлоровской неустойчивости.

Трёхслойная лайнерная система, в которой между наружным токонесущим лайнером из алюминия и внутренним исследуемым лайнером из меди находился слой рабочего вещества. На внешней поверхности медного лайнера наносились осесимметричные начальные возмущения синусоидального вида. Ускоряющий лайнер ток составлял ~ 35 МА.

Серия экспериментов R-damage по исследованию откольной прочности алюминия была проведена в 2006-2011 гг.

Полученные данные дали возможность создать и верифицировать расчетные модели сдвиговой и откольной прочности, а также компактирования сложного для исследований материала - алюминия марки ALCAN, обладающего существенной анизотропией свойств.

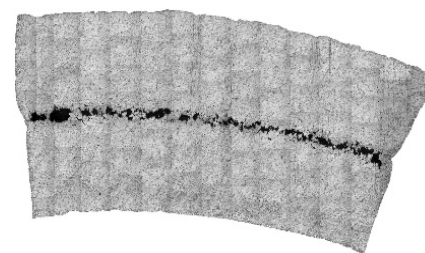
В результате серии R-damage Россия и США стали обладать уникальной методикой исследования реологических свойств материалов.



Зарождение откола



Полный откол



Частичное
компактирование



Полное
компактирование

Успех совместной работы, последовавшей за первым экспериментом, привел к новым проектам не только в области применений ДВМГ и СВМГ для исследований физики ВПЭ, но и в более широкой области импульсной электрофизики и физики ВПЭ, например:

- Первые совместные эксперименты в США. В 1993 г. в ЛАНЛ была проведена серия из пяти ВНИИЭФ-ЛАНЛ экспериментов с использованием генераторов сверхсильных магнитных полей МК-1. Эта серия включала исследования высокотемпературной сверхпроводимости.
- Серия экспериментов 1996-1997 гг., названная «серия Дирак». В этих экспериментах, проведенных в ЛАНЛ, ученые из Австралии, Бельгии, Германии, России, США и Японии использовали ВНИИЭФ-овские генераторы МК-1 и ЛАНЛ-овские полосковые генераторы для изучения различных явлений в сверхсильных магнитных полях. Эксперименты продолжил международный научно-практический семинар «Капица».
- На установке ЛАНЛ «Pegasus-2» (эксперименты RUS-1 - RUS-5) исследовалась физика конденсированных лайнеров. Впервые информация о лайнерах получена с применением рентгенографии. В эксперименте RUS-5 исследовалась стабилизация полета лайнера «широм» магнитного поля. На одной половине поверхности лайнера были нанесены осесимметричные, а на другой, винтовые (под углом 45°) возмущения. Винтовые возмущения, в соответствии с предсказаниями, сформировали «шир» магнитного поля, стабилизирующий рост возмущений

Первый совместный российско-американский эксперимент с ДВМГ положил начало широкому сотрудничеству ЛАНЛ и ВНИИЭФ, что привело к уникальным научным достижениям, имеющим непреходящую научную ценность. Две лаборатории провели более 25 совместных экспериментальных кампаний в ЛАНЛ и ВНИИЭФ. Совместные экспериментальные, теоретические и вычислительные исследования вылились в более 400 работ, представленных на международных конференциях и опубликованных в трудах конференций и ведущих научных журналах. Это сотрудничество - кроме импульсной электрофизики - охватило многие области исследований, в которых импульсные электрофизические эксперименты вносили уникальный научный вклад, такие как:

- физика плазменных и конденсированных лайнеров,
- физика твердого тела в сильных магнитных полях,
- физика замагниченной плазмы и термоядерных синтез,
- генерация мягкого рентгеновского излучения,
- гидродинамические и магнитогидродинамические неустойчивости,
- исследования динамической прочности материалов,
- изучение откольного и ударного разрушения материалов,
- изучение теплого плотного вещества и другие области физики ВПЭ.

С п а с и б о з а
в н и м а н и е