

**МЕГАГАУССНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ.
ФИЗИКА. ТЕХНИКА. ПРИМЕНЕНИЯ**

УДК 539.63+537.311.3

Е. И. Биченков, Г. А. Швецов

**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск**

В номере, посвященном 40-летию Сибирского отделения АН СССР (СО РАН), редакция и авторы считают целесообразным представить обзор современного состояния, проблем и перспектив генерации сверхсильных магнитных полей, разработки взрывных генераторов электромагнитной энергии и их применения в некоторых задачах экспериментальной физики. Институты Сибирского отделения внесли заметный, оказавшийся часто определяющим вклад в становление этого научного направления и развитие международного научного сотрудничества. В многолетнем творческом соревновании с лучшими зарубежными научными коллективами отечественные ученые сумели занять первые позиции и до настоящего времени продолжают удерживать их.

Обзор состоит из двух частей. В этом номере кратко описаны работы, выполненные к настоящему времени по быстрой компрессии магнитного потока, захваченного в короткозамкнутых проводящих контурах, получению сверхсильных магнитных полей и мощных импульсов тока. Отмечены перспективы развития и перечислен расширяющийся круг проблем, связанных, с одной стороны, с улучшением качества генерируемых импульсов — повышением напряжения, мощности, управлением формой импульса и, с другой стороны, распространением исследований в области высоких плотностей энергии и высокой мощности энергетических потоков на все более широкий класс объектов. Так как решающую роль в развитии указанного направления сыграли регулярные международные мегагауссные конференции (МГ), описана история этих конференций и представлен обзор эволюции их тематики.

Вторая часть обзора, содержащая более детальное изложение важнейших научных идей и результатов со степенью подробности, отвечающей кругу научных интересов авторов публикации и уровню их личной эрудиции, будет опубликована в одном из ближайших номеров журнала.

Введение. Технический прогресс оказался во многом связанным с получением новых материалов и овладением новыми источниками энергии. На этом пути многое стало определяться в конечном итоге достижимыми плотностями энергии и доступными потоками мощности. Новые источники энергии, как правило, требуют и преодоления более высоких уровней энергии активации в новых энергетических процессах. Новые же материалы — это либо редкие элементы в невозможных для природы комбинациях, либо распространенные элементы в невероятных состояниях. В первом случае надо затратить много энергии, чтобы собрать с мира по атому, во втором — чаще всего необходима высокая плотность энергии, чтобы опять-таки преодолеть активационный барьер и перевести материал в неизвестное ранее состояние. Новые знания, ведущие к созданию новых материалов, дают исследования веществ при экстремальных давлениях, температурах, скоростях деформации, воздействии сильных полей и потоков излучения.

Научный прогресс часто зависит также от энергетических масштабов эксперимента и предназначенных для его проведения установок, особенно это относится к работам в области управляемого термоядерного синтеза, создания мощных лазерных систем, ускорителей и других сооружений для научных исследований. Наиболее крупные экспериментальные установки такого рода потребляют мощность, сравнимую с выработкой большой электро-

станции.

Отмеченные обстоятельства привели к формированию и интенсивному развитию в течение трех последних десятилетий новых научных направлений — физики высоких плотностей энергии и физического материаловедения при экстремальных плотностях энергии. Прогресс в этой области прямо связан с разработкой методов увеличения концентрации плотности энергии в пространстве и времени и достижениями на этом пути. Такие методы получили название кумуляции энергии.

Интерес к сильным магнитным полям возник, с одной стороны, в связи с возможностью использования их для изучения свойств веществ и материалов и, с другой стороны, с возможностью накапливать в магнитном поле огромные плотности энергии, превосходящие плотность энергии самых энергетически обогащенных химических соединений. История проблемы генерирования сильных и сверхсильных магнитных полей после первых блестящих работ П. Л. Капицы, выполненных в 20-х годах, насчитывает несколько десятилетий. Существенный прогресс в этой области — выход в ранее казавшийся запрещенным диапазон полей, превышающих 10 МГс, оказался возможным, в первую очередь, в связи с формулировкой новых идей и развитием техники применения мощных взрывчатых веществ (ВВ) и сильноточных электрических разрядов. Использование ВВ позволило получить рекордные магнитные поля в объемах, достаточных для проведения экспериментов в различных областях физики, и создать новый класс источников электромагнитной энергии, использующих для генерации импульса тока химическую энергию ВВ. В настоящее время взрывные генераторы являются самыми мощными источниками энергии, тока и магнитного поля.

Магнитная кумуляция. Кумуляция известна давно. Основу кумуляции энергии во времени составляет общеизвестный прием: долго разгонять и быстро тормозить — это удар. Кумуляция энергии в пространстве — явление более сложное. В этом случае надо разгонять большие массы, а затем передавать их энергию малым либо накапливать энергию в больших объемах и организовывать ее перетекание с частью материала в малый объем. Последнее возможно в специальных течениях и в волновых процессах. Один из наиболее впечатляющих методов кумуляции энергии в пространстве — гидродинамическая кумуляция при инерциальном сжатии цилиндрической жидкой оболочки. Результат кумуляции в конечном итоге определяется жесткостью материала, тепловыми потерями в нем и устойчивостью течения. Как среда с высокой жесткостью (скоростью звука) и полным отсутствием тепловых потерь электромагнитное поле не имеет себе равных. Потери электромагнитной природы могут происходить только на границе поля с материалом, в котором распределены заряды и токи, создающие поле. Эти потери пропорциональны отношению объем/поверхность и при достаточных размерах системы могут оказаться относительно небольшими. Немаловажным достоинством электромагнитного поля оказывается также возможность использовать известные приемы трансформации потоков электромагнитной энергии для манипуляции с ними и концентрации их в нагрузке.

Отметим одну важную сторону накопленного опыта по кумуляции энергии. Можно принять как непреложный эмпирический факт, что вряд ли следует рассчитывать на уплотнение энергии в одном кумулятивном каскаде более чем на порядок. Это правило проявляется особенно в системах, предназначенных для получения экстремальных параметров. Это значит, что надо начинать с первичных накопителей энергии, обладающих высокими удельными характеристиками, т. е. для успешной кумуляции энергии необходимо в качестве первичного источника энергии выбрать вещества с максимальной плотностью энергии и наибольшей мощностью энерговыделения. Из материалов с подобными характеристиками доступны, хорошо изучены и широко используются в промышленности, строительстве и военном деле конденсированные взрывчатые вещества.

Для проведения работ в области высоких плотностей энергии исключительно плодотворным оказался метод магнитогидродинамического преобразования кинетической энер-

гии движущихся проводников путем быстрого обжатия магнитного потока в короткозамкнутой проводящей полости. Этот метод получил название магнитной кумуляции (МК). Использование ВВ в МК-схемах позволило создать импульсные источники тока с уникальными параметрами энергии в магнитном поле, величины магнитного поля и мощности. Со временем круг исследований расширялся, энергетическая сторона утрачивала свой абсолютный приоритет, все большее значение приобретали вопросы качества генерируемых импульсов и исследование материалов в экстремальных условиях. Параллельно увеличивалось и количество лабораторий, занятых исследованиями магнитной кумуляции. Огромную роль в развитии работ сыграли ставшие регулярными Международные мегагауссные конференции. К настоящему времени состоялось 7 таких конференций. Особенностью конференций оказалась устойчивая тематика обозримого объема, довольно стационарный состав ведущих участников и, самое главное, их безусловно лидирующее положение в мировой науке. Изданные труды и тезисы конференций [1-7] содержат 683 научных доклада и распределяются от МГ-I до МГ-VII следующим образом: 30, 61, 65, 98, 100, 126, 203. Это богатейший материал. Он позволяет проследить развитие и эволюцию научных идей, воодушевлявших участников уникальных научных исследований, изменение подходов и настроений ученых и увидеть их неуклонный прогресс от года к году, от одной МГ к следующей.

Другие стороны физики высоких плотностей энергии привлекали внимание ученых, объединенных в другие международные сообщества, сформировавшиеся вокруг других научных конференций. Идеино и творчески наиболее близкими к мегагауссным конференциям оказались широко известные Pulsed Power конференции, связанные в основном с разработкой импульсных источников электромагнитной энергии и методов трансформации и преобразования электрических и токовых импульсов. Научная интерференция МГ и Pulsed Power конференций, установившаяся в последние годы, оказалась полезной и плодотворной для обеих конференций.

Составить полный и в то же время достаточно краткий обзор всех относящихся к тематике МГ работ вряд ли возможно. Поэтому в данной части работы остановимся лишь на перечне основных направлений исследований и важнейших результатов, полученных в ведущих лабораториях СССР, США, Великобритании, Франции, Италии и Японии, оставив обзор научных идей и деталей для дальнейшего. Так как новое — это почти всегда хорошо забытое старое, мы считаем необходимым довольно подробно остановиться на начальном этапе работ по взрывной магнитной гидродинамике. Оглядываясь назад, мы видим, что именно тогда были сформулированы основные идеи и принципы. Они, как правило, были просты и, не успев обрасти деталями, прозрачны и понятны. Иногда первоначальные формулировки проектов были наивны, полны чрезмерного оптимизма и легкомысленной самоуверенности, а авторы идей часто не догадывались, какого терпения и труда потребует от них осуществление столь блестящих и абсолютно понятных в своей основе замыслов. Однако сегодня, спустя много лет, мы можем видеть, что все-таки большинство первоначальных принципов оказались плодотворными и правильными. Только для успеха понадобились время и настойчивость. Так как Институт гидродинамики и некоторые другие институты Сибирского отделения АН СССР оказались одними из пионеров исследований в области МК-преобразований и трансформации энергии, то выполненные в них работы в дальнейшем опишем более подробно.

Первый этап работ по магнитной кумуляции. Магнитокумулятивный метод получения сверхсильных магнитных полей и больших уровней магнитной энергии был предложен и реализован в ряде конструкций магнитокумулятивных или взрывных генераторов (МКГ) в середине 50-х годов в СССР А. Д. Сахаровым, А. И. Павловским, Р. З. Людаевым, В. К. Чернышевым и др. (ВНИИЭФ, ранее Арзамас-16, ныне Саров) [8] и в США К. М. Фаулером, Р. С. Кэйрдом, У. Б. Гэрном, С. Л. Томпсоном (Лос-Аламосская национальная лаборатория) [9], Дж. У. Ширером с сотрудниками (Ливерморская национальная

лаборатория) [10] и М. Кованом, Дж. С. Крауфордом, Р. А. Дамеровым (Национальные лаборатории Сандия) [11, 12]. Так как все эти лаборатории были заняты в основном разработкой ядерного оружия и были ограничены в возможности открытых публикаций, то первым опубликовал идею метода Я. П. Терлецкий [13]. Но эксперименты по получению полей, превосходящих 10^7 Гс, впервые были все-таки опубликованы одним из основоположников магнитной кумуляции — М. Фаулером с сотрудниками [9].

В дальнейшем работы по магнитной кумуляции в СССР начались в Институте гидродинамики и Институте ядерной физики СО АН СССР [14–17], НИИЭФА им. Д. А. Ефремова [18], ФИАЭ им. И. В. Курчатова [19], ЛПИ им. М. И. Калинина [20], ИФЗ им. О. Ю. Шмидта [21] и др.

В Англии работы по магнитной кумуляции проводились в Фулнесской лаборатории атомного оружия [22], во Франции — в лабораториях атомного центра в Лимейле [23]. В США к названным ранее атомным лабораториям присоединилось довольно много научных и научно-технических организаций, из которых по заметному вкладу следует отметить Иллинойский технологический институт [24] и Военно-морскую исследовательскую лабораторию США [25].

Большую роль в развитии работ по магнитной кумуляции сыграла группа Ф. Герлаха, Г. Кнопфеля и Ю. Линхарта из Лаборатории ионизованных газов (Фраскати, Италия). Развернув открытые работы в направлении использования магнитной компрессии для задач управляемого термоядерного синтеза, эта интернациональная бригада опубликовала за короткое время большое количество статей как популярного или оценочного характера, так и серьезных исследований в области ограничений МК для получения сверхсильных магнитных полей. Детальное изложение экспериментальных результатов с подробным их анализом опубликовал Ф. Герлах в своем фундаментальном обзоре [26] — лучшем, пожалуй, из всего написанного на первом этапе развития МК. Очень физичный обзор теоретических результатов по ограничениям величины магнитного поля составил Г. Ленер [27]. Подробные исследования устойчивости лайнера вместе с численными расчетами, а также численный анализ потерь потока содержит обзор Ж.-П. Сомона [28]. И, наконец, широкую известность среди специалистов и начинающих получила книга Г. Кнопфеля [29], содержащая обширную библиографию и почти энциклопедические сведения из ряда областей физики и техники по проблемам генерации сверхсильных магнитных полей.

Другая важная сторона деятельности группы из Фраскати связана с проведением ряда научных семинаров и конференций. В 1965 г. во Фраскати состоялась I Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам [1]. Следующей была летняя школа по физике высоких плотностей энергии в Варенне [30].

Однако составленная из людей разного уровня и глубины, ставивших перед собой разные задачи, и нацеленная сугубо прагматически группа во Фраскати оказалась неустойчивой и, просуществовав семь лет, распалась. Ее деятельность имела некоторый характер кампании, рассчитанной на быстрый прикладной результат, и может служить, пожалуй, примером «бригадного» метода решения научных проблем в условиях возрастающего подхода к науке как отрасли индустрии.

Оценивая в целом результаты работы этой группы исследователей, следует признать, что их деятельность явилась завершением первого этапа работ по магнитной кумуляции, который можно коротко охарактеризовать как период рекордов, когда довольно быстро, чуть ли не в первом эксперименте, были достигнуты поля, превышающие 10^7 Гс, токи порядка 10^8 А и более, магнитные энергии на уровне десятка мегаджоулей. Однако применения всем этим рекордам не было найдено, а повторение высоких параметров оказалось делом не очень простым и надежным, определенным во многом культурой изготовления МК-систем, а иногда и просто удачей.

Работы 70-х годов. В эти годы работы по магнитной кумуляции развивались в не-

скольких направлениях. Совершенствовались МК-генераторы и отрабатывались устойчивые МК-системы, обеспечивающие заданные параметры тока и энергии в нагрузке. Начал открытые публикации замечательный коллектив блестящих исследователей из Арзамаса-16 (ВНИИЭФ) во главе с А. И. Павловским, Р. З. Людаевым и В. К. Чернышевым [31, 32]. Для согласования МКГ с нагрузкой были разработаны схемы с импульсным трансформатором и сами трансформаторы [21, 33, 34], а также схема накопления энергии в индуктивной нагрузке с последующей коммутацией ее с помощью размыкателей [12, 35–39]. Проект использования такого рода схемы для работы с плазменным фокусом в мегаджоульном диапазоне энергий опубликовала группа французских исследователей [40].

Наряду с классическим взрывным методом магнитной кумуляции, стал развиваться магнитодинамический метод, когда обжимающая поле оболочка (лайнер) ускорялась импульсным магнитным полем, созданным разрядом конденсаторной батареи [16, 18, 20, 41–43]. Начались разработки МКГ со сжатием поля лайнером, ускоренным давлением сжатого газа [19], а также безлайнерных генераторов с компрессией поля потоком ионизованных газов, созданных мощными ударными волнами [44–49].

В области приложения идей и методов магнитной кумуляции к физике плазмы значительная активность проявилась в направлении численного моделирования и составления проектов сжатия магнитного поля вместе с плазмой. Основным здесь оказалось, пожалуй, направление в области управляемого синтеза по так называемому θ -пинчу [50], хотя несомненный интерес вызвала и возможность получения сильного поля при сжатии плазмы [51].

Возникли идеи использования магнитной кумуляции и в области физики твердого тела. Заманчивой представлялась перспектива применения импульсного магнитного поля для безударного сжатия вещества до высоких давлений. Первым идею использовать магнитное поле для сжатия вещества, по-видимому, высказал Ф. Биттер [52], а реализовали ее с разной долей успеха С. Блесс [53], Ливерморская группа во главе с Р. Киллером и Р. Хоком [54] и коллектив А. И. Павловского [55]. Если применение магнитных полей для сжатия материалов открывает новую область использования сверхсильных магнитных полей, то изучение электрических и оптических свойств вещества в мегагауссных полях продолжает традиционную и классическую область физики твердого тела на новом уровне поля. О начале интенсивных исследований в этом направлении сообщил М. Фаулер в обзоре [56], вызвавшем в свое время значительный интерес.

Были предприняты две попытки использования МКГ в области физики высоких энергий. В ИЯФ СО АН СССР под руководством Л. М. Баркова был создан экспериментальный комплекс для измерения магнитного момента гиперонов и поиска монополя Дирака с использованием МКГ мегагауссного диапазона и разработана методика измерения таких полей с точностью 1% [57].

Взаимодействие пучка релятивистских электронов с мегагауссным магнитным полем и сопровождающие это взаимодействие тормозное излучение, радиационное трение, рождение пар и другие нелинейные явления, связанные с поляризацией вакуума, пробовали наблюдать в совместной работе исследователи из Иллинойского технологического института и Стенфордской лаборатории [58]. Работа проводилась по инициативе специалиста в области квантовой электродинамики Т. Эрбера. Для осуществления эксперимента был привлечен Ф. Герлах. Однако и эту научную «бригаду» довольно скоро постигла участь их предшественников из Фраскати: после первых обративших на себя внимание публикаций о подготовке оборудования и замысле эксперимента она распалась.

К концу 70-х годов в области магнитной компрессии сложилась довольно странная ситуация: несмотря на несомненные успехи и достижение рекордов по зарегистрированным полям и токам, а также научную привлекательность метода, идея все-таки не нашла себе применения. Расчет на быстрый успех явно не оправдался. Нестабильность работы генераторов, плохая, точнее сказать, просто недопустимая воспроизводимость результатов

в условиях дорогого, трудоемкого, сложного и опасного взрывного эксперимента поставили под сомнение возможность их использования и достижение казавшихся еще недавно столь головокружительными перспектив. Именно в это время кризиса произошло событие, обеспечившее не только выживание, но и плодотворное развитие нового научного направления — возродились и с возрастающим успехом прошли шесть Международных мегагауссных конференций: МГ-II — МГ-VII.

Мегагауссные конференции. Вторая конференция состоялась с 29 мая по 1 июня 1979 года в Вашингтоне (США) и, по существу, подвела итоги первых двух десятилетий работ. Организаторами конференции выступили: Ливерморская лаборатория им. Лоуренса, Лос-Аламосская лаборатория, Военно-морская исследовательская лаборатория, лаборатории Сандия, Управление научных исследований ВВС, Управление военно-морских исследований и управления энергетических исследований, энергии синтеза и инерциально-го синтеза департамента энергии — цвет науки военно-промышленного комплекса США. Огромную работу по подготовке конференции провел П. Турчи из Военно-морской исследовательской лаборатории, поддержанный корифеями из лабораторий Лос-Аламоса, Ливермора и Сандия — М. Фаулером, Дж. Ширером и М. Кованом. Из зарубежных учреждений в числе организаторов МГ-II был только Институт гидродинамики СО АН СССР, а В. М. Титов и Г. А. Швецов вошли в состав оргкомитета. На конференции было всего три участника из СССР, и Г. А. Швецову пришлось выполнить большую работу. Исходя из решения оргкомитета, что в труды конференции войдут только представленные и обсужденные доклады он, кроме своих, представил еще 17 докладов соотечественников, не получивших возможности присутствовать на конференции. Доклады советских исследователей без преувеличения составили украшение книги трудов МГ-II [2] и сделали ее одним из самых дорогостоящих бестселлеров рынка научных публикаций США 1980 года.

На конференции впервые были сделаны достаточно подробные сообщения о выдающихся достижениях группы ученых из Арзамаса в разработке пригодных для использования в физическом эксперименте генераторов сверхсильных магнитных полей и генераторов энергии, создании самых совершенных методов регистрации, экспериментальных стендов и надежных генераторов, способных воспроизводимо получать поле до 10 МГс. Большой прогресс был достигнут в создании математических моделей МК-систем как электротехнического, так и магнитогидродинамического уровня, в разработке способов согласования МКГ с нагрузкой, в изучении потерь и предельных возможностей таких генераторов энергии. Исследователи из США сообщили о результатах интенсивной работы в области сжатия плазмы с магнитным полем.

Третья мегагауссная конференция, прошедшая с большим успехом в Новосибирске с 13 по 17 июня 1983 года, оказалась во многом ключевой для дальнейшего становления и развития работ в области мегагауссной физики. Организатором конференции выступил Институт гидродинамики СО АН СССР, значительную помощь ему оказали Институт атомной физики им. И. В. Курчатова (Москва) и ВНИИЭФ (Арзамас-16). Огромную работу по подготовке и проведению МГ-III выполнили председатель оргкомитета В. М. Титов и ученый секретарь Г. А. Швецов. Они же издали сборник трудов конференции [3].

МГ-III знаменательна тем, что на ней впервые собрались вместе и установили личные контакты ведущие исследователи из всех научно-исследовательских лабораторий мира, занятых генерацией мегагауссных магнитных полей и смежными проблемами. Был продемонстрирован большой прогресс во всех направлениях, составивших программу конференции. Тематика докладов была сконцентрирована вокруг следующих научных направлений:

- Экспериментальная техника для получения сверхсильных магнитных полей.
- Получение сверхсильных магнитных полей.
- Применение сверхсильных магнитных полей.
- Лайнерные системы для термоядерного синтеза.
- Моделирование магнитодинамических систем.

- Магнитокумулятивные генераторы.
- Взрывные МГД-генераторы.
- Проводники и изоляторы при высоких плотностях энергии.
- Коммутация сильных токов.

Самым выдающимся событием МГ-III были доклады группы А. И. Павловского по исследованию взаимодействия мегагауссных магнитных полей с материалом лайнера и разработке на их основе каскадных МКГ сверхсильных магнитных полей [59, 60]. Таким же событием в области создания взрывных генераторов энергии была серия докладов этой же группы и их блестящих коллег и постоянных соперников в многолетнем научном и творческом соревновании во главе с В. К. Чернышевым, в которых были изложены результаты разработки и экспериментальных испытаний обширного спектра магнитокумулятивных генераторов самых разнообразных конструкций, оперирующих в громадном диапазоне выходных параметров [32, 39].

Большой прогресс был достигнут в создании импульсных трансформаторов для согласования МКГ с нагрузкой и ключей для коммутации токов в цепи индуктивного накопителя. Лос-Аламосская группа продемонстрировала изящный повышающий трансформатор, способный при работе с плоским МКГ надежно оперировать напряжением до 1 МВ при исключительно малых размерах и сравнительной простоте конструкции [61]. Ученые из Ливерморской лаборатории среди других своих достижений показали МКГ с использованием пушечного снаряда в качестве первичного источника энергии [62]. Этот генератор не оправдал надежд создателей, был сложен, дорог, отличался огромными потерями магнитного потока, в очередной раз подтвердил известный всем экспериментаторам принцип: чем сложнее конструкция, тем хуже она работает. Н. Миура с коллегами представил проект хорошо продуманного оснащения его лаборатории в Институте физики твердого тела Токийского университета набором источников импульсных магнитных полей мегагауссного диапазона как из соленоидов с прямой запиткой от батареи конденсаторов, так и компактной магнитокумулятивной установки с электродинамическим разгоном лайнера [63]. Новый принцип компрессии магнитного поля системой ударных волн в материале, переходящем под действием высокого давления из непроводящего состояния в проводящее, и результаты успешных экспериментов представили независимо Е. И. Биченков с сотрудниками из Института гидродинамики СО АН СССР [64] и К. Нагаяма из университета г. Кумамото (Япония) [65].

Четвертая конференция состоялась с 14 по 17 июля 1986 года в г. Санта Фе (США) [4]. Организатором конференции выступила Лос-Аламосская национальная лаборатория, поддержанная Ливерморской национальной лабораторией им. Лоуренса, национальными лабораториями Сандия, лабораторией вооружений ВВС США (ныне лаборатория им. Филлипса, база ВВС в Киртланде). Председателем оргкомитета был М. Фаулер. Тематика конференции была близка к тематике предыдущей. Больше чем ранее было уделено внимание исследованию поведения материалов в сверхсильных магнитных полях и экспериментальной технике, оборудованию и средствам диагностики в экспериментах по получению сверхсильных магнитных полей и созданию взрывных генераторов электромагнитной энергии. Существенно возросло число работ, относящихся к разработке коммутаторов мощных электромагнитных импульсов. Почти четверть представленных на конференции докладов относились к проблемам сжатия плазменных систем и лайнеров. Значительно расширились исследования и возросло количество представленных работ по электродинамическому ускорению твердых тел [66–70].

А. И. Павловский с сотрудниками в воспроизводимом экспериментально получении экстремальных магнитных полей подняли планку рекорда при взрывной компрессии до 12 МГс и начали подготовку к выходу на 15 МГс [71]. Они же, наряду с исследованиями превращений электронной структуры кристаллов в мегагауссных полях, вернулись к проблеме металлизации водорода на новом уровне как генераторов поля, так и точности

измерений магнитных полей, давлений и геометрии МК-полости [72, 73], освоив диапазон безударного сжатия твердого водорода до 3,5 Мбар. При этом им удалось сжать водород до $0,96 \text{ г/см}^3$, зафиксировав появление электропроводности при давлении $\approx 1 \text{ Мбар}$ и плотности $0,61 \text{ г/см}^3$.

Успехи взрывников в получении сверхсильных воспроизводимых полей в диапазоне 10 МГц явно стимулировали разработчиков альтернативных систем: на быстрых батареях удалось достигнуть 4 МГц [74].

Новые сведения об оптических и резонансных свойствах кристаллических структур в мегагауссных магнитных полях доложили на конференции А. И. Павловский, Н. Миура с сотрудниками и др.

Примечательным моментом МГ-IV было приглашение на нее с заказными докладами ученых из Национальной магнитной лаборатории им. Ф. Биттера. Приверженцы исследований в стационарных магнитных полях, они убеждали участников конференции в перспективности проектирования и изготовления из современных композитных материалов стационарных или почти стационарных (длительность импульса $\approx 10^{-2} \text{ с}$) соленоидов на 0,5–0,7 МГц.

В области генерации энергии американских исследователей привлекали вопросы разработки убедительных моделей и программ для численного моделирования работы МКГ на разнообразные нагрузки, а также все более детальных и точных схем расчета потерь в таких генераторах. Из возможных приложений наиболее отчетливо проявился интерес к осуществлению имплозии плазменного лайнера и получению при этом огромного выхода мягкого рентгеновского излучения, запитке мощных твердотельных лазеров от МКГ, а также возможность установить на его выходе вакуумный диод или какой-то другой генератор мощного электронного пучка. Помимо ставших модой размыкателей цепи, сохранили симпатии исследователей импульсные трансформаторы с экстремальными параметрами по электрической прочности — 0,98–1,97 МВ/см и выше. Это оказалось нужным для повышения коэффициента связи таких трансформаторов до фантастических величин (0,9 и даже выше) при рабочем напряжении $\approx 1 \text{ МВ}$. За этими проектами со всей очевидностью просматривалась захватившая кое-кого в то время истерия «звездных войн». На этом фоне значительно более спокойными выглядели доклады наших соотечественников — солидные работы, продолжавшие развивать сделанное ранее: новые модели и схемы учета потерь в генераторах, более совершенные схемы построения каскадов, обострения импульсов и согласования МКГ с традиционными нагрузками.

Конференция МГ-V собралась снова в Новосибирске (13–17 июля 1989 г.). Круг рассматриваемых проблем стабилизировался, во всех направлениях шел не очень быстрый прогресс, расширялся фронт физических исследований поведения вещества в сильных магнитных полях. Заменяя своих лидеров, чаще начали выходить на трибуну конференции более молодые исследователи известных научных групп. Как всегда, исключительный уровень технологического совершенства продемонстрировали ливерморцы: Дж. Чейз с коллегами доложили о деталях изготовления спирального МКГ, при создании которого были использованы дорогие и совершенные материалы (медь с зерном 10 мкм, композитные профилированные медные шины с утяжелением, удерживающие бандажи из стеклокомпозитов), самые совершенные технологии (электролитическое покрытие шин слоем высокопроводящего материала, точная обработка на станках с программным управлением, экструзионный метод изготовления заряда ВВ с зерном 5 мкм, точная разводка детонации) и самые тщательные измерения при работе генератора, обеспечивающие точность по времени в десятку наносекунд и в пространстве около десяти микрометров [75, 76]. Эти доклады явились продолжением работ, представленных на предыдущей конференции, и содержали подробное описание технологии изготовления и испытаний небольших спиральных МКГ. Предназначены они были для изучения возникающих межвитковых электрических напряжений, деформации витков и оценки точности разрабатывавшейся в лаборатории про-

граммы CIRC для численного моделирования деформации сложных взрывных систем и анализа электрической цепи МКГ. Из-за доступности для широкого круга разнообразных измерений МКГ представлялся подходящим объектом для проверки соответствия численной модели и эксперимента.

Шестая конференция состоялась в г. Альбукерке (США) с 8 по 12 ноября 1992 г. Организаторы — национальные лаборатории Сандия и лаборатория ВВС им. Филлипса, председатель — М. Кован. Традиции не нарушились: А. И. Павловский с сотрудниками сообщили о выходе на рубеж 15 МГц, проекте достижения 20 МГц в каскадном генераторе и проекте проведения экспериментов по получению полей в 100 МГц с ядерным зарядом [77, 78]. Они же и Н. Миура доложили о новых исследованиях материалов, создатели энергетических систем — о новых более масштабных МКГ, трансформаторах и размыкателях, аналитики и расчетчики — о новых моделях расчета потерь, газовой динамики и плазменных явлений. Новым было заявление Н. Миуры о приближении к 10 МГц на его магнитодинамической установке [79].

Наибольший же интерес вызвало представление правительством, наукой и промышленностью США проекта национального масштаба о создании новой магнитной лаборатории, в которой планировалось собрать полный набор всех передовых технологий получения сильных магнитных полей. Местом для стационарных и квазистационарных машин были выбраны университет штата Флорида, а для импульсных — Лос-Аламосская лаборатория. С докладами о научной и организационно-финансовой сторонах этого огромного проекта выступили М. Фаулер [80] и ответственный сотрудник Министерства энергетики США. Была организована впечатляющая выставка новых проводящих, сверхпроводящих и изоляционных материалов, композитов и керамик, представляющих интерес для создания установок для получения сильных и сверхсильных магнитных полей [81].

Своеобразным дополнением к американскому проекту оказался доклад Ф. Герлаха [82] о замечательных успехах европейцев в создании теплых соленоидов многократного использования с квазистационарным полем ≈ 1 МГц. Успех опять-таки определило использование новейших композитных и керамических материалов.

В заключение конференции «Мегагаусс-VI» академик А. И. Павловский предложил следующую, седьмую, конференцию провести в Арзамасе. МГ-VII состоялась с 5 по 10 августа 1996 года в г. Сарове (бывший Арзамас-16) Нижегородской области, но, к великому сожалению, без своего признанного лидера — А. И. Павловский скоропостижно скончался три месяца спустя после шестой конференции. Мегагауссное сообщество понесло тяжелейшую и невозполнимую потерю. Почти в это же время скончался и другой постоянный член международного оргкомитета — В. Ф. Демичев из ИАЭ им. И. В. Курчатова. Ранее, между третьей и четвертой конференциями, тяжелой утратой была кончина Джеймса Ширера из Ливерморской лаборатории.

Конференция «Мегагаусс-VII» знаменует переход мегагауссных исследований в качественно новую фазу. Важнейшим событием после шестой конференции стала, безусловно, организация и начало регулярной деятельности новой Национальной магнитной лаборатории США. Американцы со свойственной им деловитостью осуществили свой проект. Подарком судьбы для них стали перемены в России, благодаря которым американские ученые без больших усилий, потерь времени и при самых ничтожных материальных затратах стали обладателями тридцатилетнего технологического опыта и результатов уникального научного коллектива мирового уровня, собранного и выросшего в советском атомном центре в Арзамасе. На МГ-VII было доложено об успешном начале широкомасштабных работ по международным проектам MAGO и DIRAC [83–85].

В проекте DIRAC по исследованию свойств материалов в полях до 10 МГц участвуют 8 лабораторий из четырех стран. Западные страны и Япония финансируют исследования и поставляют оборудование. Арзамасцы производят генераторы поля, передают технологии Лос-Аламосу и проводят эксперименты как на своих стендах, так и в США. Руководство

проектом и контроль за финансами принадлежат исключительно американцам.

Российско-американский проект MAGO имеет целью достижение условий зажигания термоядерной реакции в сильных магнитных полях при запитке экспериментальной модели реактора от системы взрывных генераторов большой мощности. Взрывные генераторы с электромагнитной энергией в единичном модуле 400–1000 МДж разрабатываются для этого проекта группой В. К. Чернышева.

Вторая примечательная сторона последней конференции — возрождение интереса к магнитной кумуляции и взрывным генераторам в Англии и во Франции и включение в эту деятельность объединившейся Германии, приступившей к созданию исследовательского центра по сильным магнитным полям в Берлине [86]. При этом одним из путей возрождения оставленных 20 лет назад после Бриана и Безансона исследований для французов оказалось заключение контракта с ВНИИЭФ и командировка в соответствии с ним нескольких молодых сотрудников на стажировку в лаборатории А. И. Павловского и В. К. Чернышева.

Научное содержание представленных работ отвечало уровню и стилю конференции. Большой интерес вызвали приглашенные доклады, из которых следует отметить мемориальный доклад об А. И. Павловском и его выдающемся вкладе в становление экспериментальной базы ВНИИЭФ [87], а также обзор замечательных результатов по изучению свойств конденсированных материалов в условиях экстремальных сжатий, достигнутых при подземных ядерных испытаниях на скоростях соударения испытуемых образцов до 62 км/с, сделанный Р. Ф. Труниным [88].

Проведение МГ-VII в 1996 году практически подвело итог 40-летних исследований по получению и разнообразным применениям мегагауссных магнитных полей. На заключительной сессии МГ-VII заместитель директора новой Национальной магнитной лаборатории США доктор Ганс Шнайдер-Мунтау предложил свою лабораторию в качестве организатора следующей мегагауссной конференции и пригласил участников конференции к себе в г. Талахасси штата Флорида в ноябре 1998 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Proceeding Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments*, Frascati, Sept. 21–23, 1965 / Н. Knoepfel, F. Herlach (Eds). Brussels: Euratom, 1966.
2. *Megagauss Physics and Technology // Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Relative Topics*, Washington, May 29–June 1, 1979 / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.; L.: Plenum Press, 1980.
3. **Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение // Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам**, Новосибирск, 13–17 июня, 1983 / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. М.: Наука, 1984.
4. *Megagauss technology and pulsed power applications // Proc. 4th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, Santa Fe, USA, July 14–17, 1986 / С. М. Fowler, R. S. Caird, D. J. Erickson (Eds). N. Y.; L.: Plenum Press, 1986.
5. *Megagauss fields and pulsed power systems // Proc. 5th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, Novosibirsk, SU, July 14–17, 1989 / V. M. Titov, G. A. Shvetsov (Eds). N. Y.: Nova Science Publishers, 1990.
6. *Megagauss magnetic field generation and pulsed power applications. Pt I, II // Proc. 6th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, Albuquerque, USA, Nov. 8–12, 1992 / M. Cowan, R. B. Spielman (Eds). N. Y.: Nova Science Publishers, 1993.
7. **Седьмая Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам**, Саров (Арзамас-16), 5–10 авг. 1996: Тез. докл. / Под ред. Л. Н. Пляшкевича. РФЯЦ — ВНИИЭФ, 1996.
8. **Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. И. и др. Магнитная кумуляция // Докл. АН СССР. 1965. Т. 165, № 1. С. 65–68.**
9. **Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of very high magnetic fields by implosion // J. Appl. Phys. 1960. V. 31, N 3. P. 588–594.**
10. **Shearer J. W., Abraham F. F., Aplin C. M., et al. Explosive-driven magnetic field compression generators // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N 4. P. 2102–2120.**

11. Cowan M. Energy conversion efficiency in flux compression // Proc. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments, Frascati, Sept. 21-23, 1965 / Н. Knoepfel, F. Herlach (Eds). Brussels: Euratom, 1966. P. 167-181.
12. Crawford J. C., Damerov R. A. Explosively driven high-energy generators // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N 11. P. 5224-5231.
13. Терлецкий Я. П. Получение сверхсильных магнитных полей путем быстрого сжатия проводящих оболочек // ЖЭТФ. 1957. Т. 32, № 2. С. 387-388.
14. Биченков Е. И. Взрывные генераторы // Докл. АН СССР. 1967. Т. 174, № 4. С. 779-782.
15. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Демчук А. Ф. и др. Эксперименты со взрывомагнитным генератором в лабораторных условиях // Докл. АН СССР. 1968. Т. 183, № 6. С. 1289-1291.
16. Алиханов С. Г., Белан В. Г., Будкер Г. И. и др. Получение мегагауссных полей методом магнитодинамической кумуляции // Атомная энергия. 1967. Т. 23, № 6. С. 536-549.
17. Барков Л. М., Баркова В. Г., Золотарев М. С. и др. Установка для получения сверхсильных магнитных полей взрывным методом. Новосибирск, 1974 (Препр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т ядерной физики; 17).
18. Stolov A. M., Larionov B. A. Production of strong pulsed magnetic fields by electrodynamic compression method // CTR-Engineering Conf., Rome, 1966.
19. Велихов Е. П., Веденов А. А., Богданец А. Д. и др. О возможности получения мегагауссных полей с помощью лайнера, сжимаемого газом высокого давления // ЖТФ. 1973. Т. 43, № 2. С. 429-438.
20. Михельсоо В. Т., Шнеерсон Г. А., Щербаков А. П. Получение сверхсильного магнитного поля захватом и сжатием потока короткой цилиндрической оболочкой // Приборы и техника эксперимента. 1974. № 2. С. 212-215.
21. Христофоров Б. Д., Кевлишвили П. В., Дивнов И. И. и др. Взрывомагнитный генератор с индуктивной нагрузкой // Отчет / Ин-т физики Земли АН СССР. М., 1975.
22. Speight C. S. Theoretical and experimental field limitations in cylindrical flux compression experiments // AWRE. Report NO-71/67-1967.
23. Brin A., Besanson J. E., Champetier J. L., et al. Magnetic field compression // Proc. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments, Frascati, Sept. 21-23, 1965 / Н. Knoepfel, F. Herlach (Eds). Brussels: Euratom, 1966. P. 21-36.
24. Erber T., Forstenberg G. K., Latal H. G., et al. The IIT flux compression facility // Les Champs Magnetiques Intenses, leur Production et leur Applications, Grenoble, Sept. 12-14, 1966 / Colloq. Int. Centre Nat. Res. Sci. Paris, 1967. N 166. P. 335-343.
25. Turchi P. J., Cooper A. L., Ford R., Jenkins D. J. Rotational stabilization of an imploding liquid cylinder // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 36, N 26. P. 1546-1549.
26. Herlach F. Megagauss magnetic fields // Rep. Progr. in Physics. Pt I. 1968. V. 31, N 1. P. 341-416.
27. Lehner G. Über die Grenzen der Erzeugung sehr höher Magnetfelder // Springer Tracts in Modern Physics. Berlin: Springer-Verl., 1968. Bd 47. S. 67-110.
28. Somon J.-P. Sur l'obtention de champs magnetiques intenses (megagauss) au moyen d'une implosion cylindrique // EUR 4197f. Association N 013-65-1. (FUAI). Brussels: Euratom, 1968.
29. Кнопфель Г. Сверхсильные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
30. Физика высоких плотностей энергии / Под ред. П. Кольдирылы, Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974.
31. Pavlovskii A. I., Lyudaev R. S., Sel'chenkov L. I., et al. A multiwire helical magnetic cumulation generator // Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Relative Topics / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.: Plenum Press, 1980. P. 585-593.
32. Chernyshev V. K., Davydov V. A. Generation of a magnetic flux by multicascade capture // Ibid. P. 651-655.
33. Cummings D. B. Cascading explosive generators with autotransformer coupling // J. Appl. Phys. 1969. V. 40, N 10. P. 4146-4150.
34. Pavlovskii A. I., Lyudaev R. S., Plyashkevich L. N., et al. Transformer energy output magnetic cumulation generators // Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Relative Topics / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.: Plenum Press, 1980. P. 611-626.
35. Knoepfel H., Krogler H., Luppi R., Montfort J., van. Generation and switching of magnetic energies in the megajoule range by explosive systems // Rev. Sci. Instrum. 1969. V. 40, N 1. P. 60-67.
36. Кучинский В. Г., Михельсоо В. Т., Шнеерсон Г. А. Мегаамперный переключатель со взрывающейся фольгой для исследования магнитной кумуляции // Приборы и техника эксперимента. 1973. № 3. С. 108-112.
37. Азаркевич Е. И., Войтенко А. Е., Исаков В. П., Котов Ю. А. Взрывной электрический генератор // ЖТФ. 1976. Т. 46, № 9. С. 1957-1962.
38. Павловский А. И., Васюков В. А., Руссков А. С. Формирование быстронарастающих мегаамперных импульсов тока от магнитокумулятивных генераторов // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3, № 16. С. 789-792.

39. Chernyshev V. K., Zharinov E. I., Demidov V. A., Kazakov S. A. High-inductance explosive generators with high energy multiplication // Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Relative Topics / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.: Plenum Press, 1980. P. 641-649.
40. Bernard J., Boussinesq J., Morin J., et al. An explosive generator powered plasma focus // Phys. Lett. 1971. V. 35A, N 4. P. 288-289.
41. Snare E. C. Magnetic flux compression by magnetically imploded metallic foils // J. Appl. Phys. 1966. V. 37, N 10. P. 3812-3816.
42. Kachilla D., Herlach F., Erber T. Electromagnetically driven flux compression // Rev. Sci. Instrum. 1970. V. 41, N 1. P. 1-7.
43. Andrianov A. M., Alekseev Yu. A., Baryshev V. Z., et al. Production of megagauss fields by compression of a magnetic flux by a metallic liner // Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Relative Topics / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.: Plenum Press, 1980. P. 479-484.
44. Jones (Jr.) M. S., McKinnon (Jr.) C. N. Explosive driven linear MHD generators // Proc. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments, Frascati, Sept. 21-23, 1965 / H. Knoepfel, F. Herlach (Eds). Brussels: Euratom, 1966. P. 349-366.
45. Кириллин В. А., Альтов В. А., Асиновский Э. И. и др. Взрывной магнитогазодинамический генератор со сверхпроводящей магнитной системой // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185, № 2. С. 316-319.
46. Пряхин Г. В., Титов В. М., Швецов Г. А. Использование кумулятивных зарядов ВВ в импульсных МГД генераторах // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд.-ние. Ин-т гидродинамики. 1969. Вып. 3. С. 111-114.
47. Cowan M., Freeman J. R. Explosively driven deuterium arcs as energy source // J. Appl. Phys. 1973. V. 44, N 4. P. 1595-1603.
48. Teno J., Sonju O. K. Development of explosively driven MHD generators for short pulse aircraft high power // Rep. AFARZ-TR-74-48. 1974.
49. Winsor N. K., Boris J. P., Shanny R. A. Plasma heating by flux compression // Symp. on Plasma Heating and Injection, Varenna, Sept. 21-Oct. 4, 1972. Editrice Compositori-Bologna, 1973. P. 227-231.
50. Гусев О. А., Комин А. В., Кривошеев М. В. и др. Термоядерная электростанция на основе импульсного реактора с кумулирующим лайнером и оценки ее конкурентоспособности // Докл. Всесоюз. конф. по инж. пробл. термоядерных реакторов. Л.: НИИЭФА, 1977. Т. 1. С. 74-81.
51. Алиханов С. Г., Глушков И. С. Магнитопржатый разряд и получение сверхсильных магнитных полей // Докл. АН СССР. 1978. Т. 242, № 5. С. 1052-1055.
52. Биттер Ф. Сверхсильные магнитные поля // Успехи физ. наук. 1966. Т. 88, № 4. С. 735-749.
53. Bless S. J. Production of high pressures by a capacitor discharge-powered linear magnetic pinch // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 4. P. 1580-1585.
54. Hawke R. E., Durre D. E., Huebel J. G., et al. Method of isentropically compressing materials to several megabars // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 6. P. 2734-2741.
55. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И., Быков А. И. Изэнтропическое сжатие кварца давлением сверхсильного магнитного поля // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 27, № 5. С. 283-285.
56. Fowler C. M. Megagauss physics // Science. 1973. V. 180, N 4083. P. 261-267.
57. Barkov L. M., Zolotarev M. S., Lebedev P. K., et al. The installation with a strong magnetic field for high energy physics experiments // Proc. 2nd Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Relative Topics / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.: Plenum Press, 1980. P. 63.
58. Herlach F., McBroom R., Erber T. Experiments with megagauss targets at SLAC // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1971. NS-18, N 3. P. 809-813.
59. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И. и др. Исследование динамики схлопывания оболочки магнитокумулятивного генератора сверхсильных магнитных полей // Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. М.: Наука, 1984. С. 14-18.
60. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И. и др. Каскадный магнитокумулятивный генератор сверхсильных магнитных полей // Там же. С. 19-22.
61. Erickson D. J., Caird R. S., Fowler C. M., et al. A megavolt pulse transformer powered by a fast plate generator // Там же. С. 333-341.
62. Barlett R. H., Takemori H. T., Chase J. B. A projectile power compressed magnetic field pulse generator // Там же. С. 265-269.
63. Miura N., Kido G., Goto T., Miyajima H., et al. Generation of megagauss fields by electromagnetic flux-compression and their use for solid-state physics // Там же. С. 116-129.
64. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубачев А. М. Ударно-волновые МК-генераторы // Там же. С. 88-93.
65. Nagayama K., Mashimo T. Magnetohydrodynamic study of flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in semiconductors // Там же. С. 270-277.

66. Shvetsov G. A., Titov V. M., Anisimov A. G., et al. Railgun accelerators of microparticles. Pt I. General characteristics // Proc. 4th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Santa Fe, USA, July 14-17, 1986 / C. M. Fowler, R. S. Caird, D. J. Erickson (Eds). N. Y.; L.: Plenum Press, 1986. P. 775-794.
67. Shvetsov G. A., Titov V. M., Anisimov A. G., et al. Railgun accelerators of microparticles. Pt II. Experimental investigations // Ibid. P. 795-802.
68. Hawke R. S., Nellis W. J., Newman G. H., et al. Summary of railgun development for ultrahigh-pressure research // Ibid. P. 803-811.
69. Kondratenko M. M., Lebedev E. F., Ostashev V. E., et al. Dynamic features of projectile acceleration in an arc-driven railgun // Ibid. P. 811-818.
70. Fowler C. M., Zimmerman E. L., Cummings C. E., et al. Rail guns driven by helical flux compression generators // Ibid. P. 853-859.
71. Pavlovskii A. I., Bykov A. I., Dolotenko M. I., et al. Limiting value of reproducible magnetic field in cascade generator MC-1 // Ibid. P. 159-166.
72. Pavlovskii A. I., Bykov A. I., Dolotenko M. I., et al. Some consideration on the application of ultrahigh magnetic fields to isentropic compression // Ibid. P. 243-253.
73. Pavlovskii A. I., Boriskov G. V., Bykov A. I., et al. Isentropic solid hydrogen compression by ultrahigh magnetic field pressure in megabar range // Ibid. P. 255-262.
74. Demichev V. F., Shneerson G. A. Megagauss magnetic field production by the capacitor bank discharges // Ibid. P. 49-63.
75. Cutting J. L., Abe D. K., Chase J. B., et al. High gain flux compression generator fabrication issues // Proc. 5th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Novosibirsk, SU, July 14-17, 1989 / V. M. Titov, G. A. Shvetsov (Eds). N. Y.: Nova Science Publishers, 1990. P. 419-424.
76. Pincosy P. A., Cutting J. L., Chase J. B. Testing and performance of a high-gain flux-compression generator // Ibid. P. 411-418.
77. Pavlovskii A. I., Dolotenko M. I., Kolokol'chikov N. P., et al. Cascade magnetocumulative generator of 20 MG range magnetic fields // Proc. 6th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics / M. Cowan, R. B. Spielman (Eds). N. Y.: Nova Science Publishers, 1993. P. 141-148.
78. Pavlovskii A. I., Kholin S. A., Bykov A. I., et al. Magnetic cumulation of the nuclear explosion energy — a possible experiment on the generation of magnetic fields higher than 100 MG // Ibid. P. 149-156.
79. Miura N., Nojiri H., Takamasu T., et al. Production of megagauss fields by electromagnetic flux compression for solid state physics // Ibid. P. 125-132.
80. Fowler C. M. Overview the Los Alamos flux compression program // Ibid. P. 3-9.
81. Sims J. R., Hill M. A. Advanced materials for use in non-destructive long-pulse high field magnets // Ibid. P. 179-186.
82. Herlach F., Bockstal L., van. Approaching the megagauss non-destructively // Ibid. P. 93-100.
83. Мохов В. Н., Чернышев В. К., Якубов В. Б. и др. О возможности решения проблемы управляемого термоядерного синтеза на основе магнитогидродинамической кумуляции энергии // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 1. С. 83-86.
84. Ekhdal C. A., Fowler C. M., Lindemuth I. R., et al. The Los Alamos/Arzamas-16 collaboration on ultrahigh magnetic fields and ultrahigh energy pulsed power // VII Междунар. конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, Саров (Арзамас-16), 5-10 авг. 1996: Тез. докл. / Под ред. Л. Н. Пляшкевича. РФЯЦ — ВНИИЭФ, 1996. С. 11.
85. Solem J. C. Overview and introduction to DIRAC // Там же. С. 13.
86. Herlach F. Experimental facilities for megagauss fields in the European Union // Там же. С. 10.
87. Селемир В. Д. А. И. Павловский и некоторые проблемы экспериментальной физики во ВНИИЭФ // Там же. С. 7.
88. Трунин Р. Ф. Сверхплотное состояние металлов, сжатых ударными волнами // Там же. С. 8.

Поступила в редакцию 23/1 1997 г.