

## ИФВ СЕГОДНЯ

А. Л. МИХАЙЛОВ

Изначальное назначение ИФВ — газодинамическая отработка и испытание ядерных зарядов — сохранялось все 65 лет существования ВНИИЭФ. С течением времени тематика расширялась и обогащалась фундаментальными исследованиями, методическими работами, коммерческими приложениями импульсных технологий, международным сотрудничеством и т. д.

Основные направления работ ИФВ сегодня:

- экспериментальное обеспечение функционирования ядерно-оружейного арсенала на всех стадиях его жизненного цикла;
- исследования на центральном полигоне России (ЦП РФ) в рамках деятельности, разрешенной международными договорами РФ;
- технология взрывчатых веществ: разработка, исследования, сопровождение в процессе эксплуатации, снятие с эксплуатации;
- физика динамических экстремальных состояний материи: физика ударных волн и детонации, уравнения состояния, динамическая прочность и реология, гидродинамические неустойчивости и турбулентность;
- взрывостойкость и разрушение конструкций;
- газодинамический термоядерный синтез;
- приборы, методы и средства диагностики;
- ликвидация в рамках трехсторонней (Россия, Казахстан, США) программы нераспространения последствий ядерной деятельности на бывшем Семипалатинском полигоне СССР;
- разработка и аттестация боевых частей обычных (неядерных) вооружений;
- гражданские (коммерческие) приложения импульсных технологий;
- разработки в интересах федеральных служб.

ИФВ сегодня — крупнейший в стране институт данного профиля при том, что численность его — наименьшая за последние 50 лет — следствие реформирования ядерно-оружейного комплекса. В ИФВ сегодня более 700 сотрудников, из них 14 докторов и около 40 кандидатов наук. Процент «остепененных» сотрудников по академическим меркам невелик, но у нас значительный производственный сектор, да и требова-

ния к защитами другие: диссертация — не цель, а следствие результата. У нас работают 25 действующих лауреатов Государственных и Правительственных премий СССР и РФ, десятки кавалеров орденов и медалей СССР и РФ.

ИФВ — это развитая структура, состоящая из научно-исследовательских, научно-теоретического и научно-конструкторского отделов, отдела внутренних полигонов, опытного цеха, обеспечивающих служб. Это сотни методик эксперимента, десятки измерительно-вычислительных испытательных комплексов как лабораторных, так и полигонных, в том числе передвижных, адаптированных к полевым условиям внешних полигонов Министерства обороны и других ведомств. Наша школа исследований экстремальных состояний вещества, материалов и конструкций имеет мировую известность.

В ИФВ работают выпускники десятков вузов страны. До перестроечных времен базовой кафедрой для ИФВ была кафедра № 4 физикотехнического факультета МИФИ, готовившая инженеров-физиков по специальности «Химическая физика».

Основные инженерные кадры для ИФВ всегда готовил филиал № 4 МИФИ в нашем городе — ныне СарФТИ НИЯУ МИФИ. Сейчас базовая кафедра ИФВ — кафедра теоретической и экспериментальной механики (ТиЭМ) СарФТИ НИЯУ МИФИ, преподавательский состав которой на старших курсах на 70–80 % состоит из сотрудников ИФВ — «совместителей». Кафедра готовит инженеров-исследователей, испытателей, расчетчиков, конструкторов не только для ИФВ, но и для многих других подразделений ВНИИЭФ.

Именно выпускники кафедры ТиЭМ СарФТИ составляют сейчас ядро инженерного и исследовательского персонала ИФВ в возрасте до 40 лет; среди них есть ведущие сотрудники со степенью, начальники лабораторий, отделов и групп. На базе кафедры ТиЭМ в СарФТИ работают четыре научно-исследовательские лаборатории, также возглавляемые бывшими или действующими сотрудниками ИФВ.

В 2010 г. в НИЯУ МИФИ учреждена новая кафедра № 66 «Физика динамических воздействий на материалы и конструкции», также ориентированная на ИФВ и призванная восполнить «дефицит» подготовки выпускников кафедры ТиЭМ СарФТИ в общей и теоретической физике, обусловленный паспортом специальности «Механика».

На базе ИФВ работает диссертационный совет ДС 201.007.05 по трем специальностям ВАК: химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний; динамика и прочность; средства поражения и боеприпасы.

Сотрудники ИФВ — постоянные участники российских и международных конференций, симпозиумов и семинаров. Прежде всего, это регулярные (раз в два года) конференции Американского физического общества (APS) «Ударное сжатие конденсированных сред», собирающие каждый раз 400–600 участников из десятков стран, конференции Евросоюза «Динамические свойства материалов» — DYNAMAT, «Новые модели и гидрокоды для ударноволновых процессов...», более редкие (раз в пять лет) Всероссийские съезды по теоретической и прикладной механике.

Несколько уменьшенным российским аналогом APS-конференцией с той же тематикой стали проводимые также раз в два года во ВНИИЭФ под организационным началом ИФВ тематические международные Харитоновские чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», собирающие более 200 участников из 30–40 организаций России и зарубежья.

У нас сложились хорошие традиции межлабораторного научного сотрудничества с учеными США, Франции, КНР. Иногда меня спрашивают: «Зачем это вам? Не хватает зарплаты?».

Резонов несколько:

1. Да. В 1990-е гг. зарплата была, мягко говоря, не на уровне. Нужно было сохранить коллектив — это было проблемой даже в ЗАТО. Сейчас этот фактор не доминирует, но свою стимулирующую роль сохраняет.

2. Уровень задач. Как правило, это задачи первоклассные, мирового уровня. Это позволяет не погрязнуть в «местечковом» самодовольстве, поднять свой уровень, расширить кругозор, получить информацию об исследованиях, составляющих предмет заботы передовых лабораторий мира.

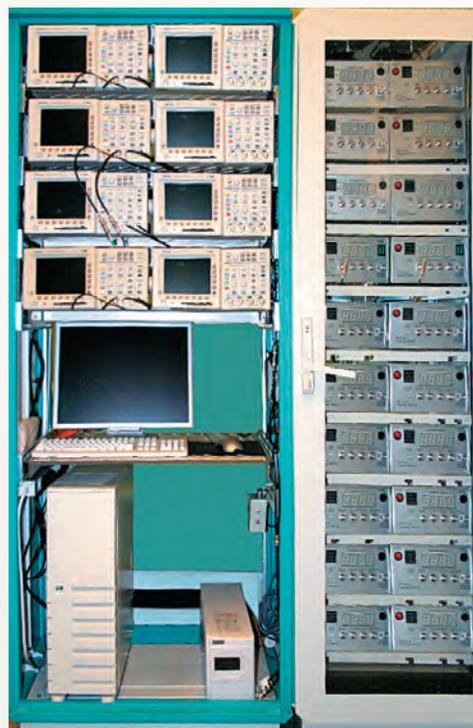
3. От госзаказчика мы, как правило, получаем прикладные задачи, к тому же финансируемые, по каким-то канонам последних десятиле-

тий, через конструкторов или теоретиков. Эффект «прилипания» денег к рукам посредников известен. (Вспомним начало ядерной эры и роль в ней исследователей.) Это серьезно охлаждает энтузиазм и самостоятельность исследователей и переводит их в положение второстепенного персонала. (Даже в «Облике ЯОК-2020» уже предусмотрена меньшая зарплата исследователей, несмотря на опасность и профессиональные вредности в их работе). В международном сотрудничестве роль исследователей — ключевая.

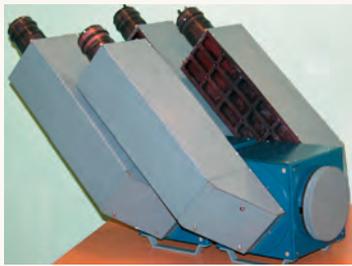
4. Чрезмерная «закрытость» снижает привлекательность ядерно-оружейной деятельности для молодежи. Возможность служебных командировок, пусть для ограниченного слоя наиболее активных и результативных сотрудников, частично компенсирует этот «недуг» нашей системы ограничений.

Перейдем к достижениям последних десяти лет. Ограничимся беглым обзором развития нашей экспериментальной базы. Причина ее развития — необходимость компенсации лабораторными исследованиями отсутствия полномасштабных испытаний.

**Многоканальные средства диагностики.** Пршедшее десятилетие характерно массовым переходом от аналоговых измерительных средств многоканальных измерений к цифровым, основан-



*Рабочее место оператора кадровой системы регистрации рентгеновских изображений*



Четырехканальные модули регистрации рентгеновских изображений

ным на компьютерных технологиях и ориентированным на различные датчиковые системы. Два первых таких комплекса с общим числом каналов регистрации логических («да — нет») электрических сигналов — более ты-

сячи, и с удаленным на ~1 км пунктом управления и сбора информации были введены в эксплуатацию для проведения неядерно-взрывных исследований на ЦП РФ в 1999 г. Один из этих комплексов был разработан в НИИИТ по нашему ТЗ, второй — разработка отдела информационных технологий ИФВ. Подобные средства диагностики уже стали «штатными» для ИФВ, за этими двумя комплексами последовали другие, оснащенные цифровыми измерителями не только логических, но и аналоговых сигналов.

Один из базовых принципов диагностики однократных взрывных процессов, сопровождающихся уничтожением уникального и дорогостоящего объекта исследований и, как правило, детекторных первичных преобразователей — измерения несколькими независимыми методиками, работающими на разных физических принципах. «Исюминками» последних лет я бы назвал разработку, аттестацию и внедрение:

- уникальных миниатюрных (диаметр чувствительного элемента 0,3 мм) контактно-оптических датчиков, выдающих одновременно электрический и световой импульсы на разные или, при необходимости, на один МВК;
- многоканальных систем волоконно-оптических датчиков, нечувствительных к электромагнитным наводкам, для регистрации логических и аналоговых сигналов;
- системы 16-канального уплотнения информации с логических датчиков;
- семейства пьезоэлектрических генераторных датчиков ударных волн;
- совмещение комплексов многоканальных измерений электрических и оптических сигналов с радиографическим комплексом РГК-Б.

В 2011 г. проведены успешные предварительные испытания многоканального комплекса для регистрации гамма- и нейтронных импульсных излучений, предназначенного для оснащения предприятий отрасли. Прототип измерительной подсистемы этого комплекса успешно эксплуа-

тируется около 5-ти лет в ИФВ и на одном из предприятий отрасли.

**Импульсная рентгенография.** Прошедшие 10 лет ознаменовались в ИФВ существенным развитием импульсной рентгенографии как одного из наиболее информативных средств диагностики быстропротекающих процессов. Развитие это шло в направлении наращивания многокадровости, просвечивающей способности, пространственного и временного разрешения. Развивались параллельно рентгенографические установки, средства регистрации изображений, алгоритмы и коды их обработки.

Около 5 лет назад в парке рентгенографических установок ИФВ появился наиболее мощный комплекс — трехлучевой многокадровый комплекс РГК-Б на основе трех синхронно работающих циклических ускорителей электронов — бетатронов БИМ 234.3000 с максимальной энергией спектра генерируемого рентгеновского излучения 70 МэВ (разработка НТЦФ ВНИИЭФ). По числу лучей рентгенографирования и количеству кадров рентгеновского изображения объекта в одном опыте РГК-Б превосходит наиболее современный комплекс DARHT в Лос-Аламосе, уступая однако последнему в дозе излучения в импульсе и, по-видимому, в разрешении.

Однолучевая пилотная установка комплекса РГК-Б была запущена в ИФВ в 2002 г., а двухлучевой его прототип на базе двух менее мощных ускорителей БИМ 234.500 работает с 1980-х гг. Комплекс РГК-Б оснащен современными многокадровыми электронно-оптическими системами регистрации с выводом изображения практически в режиме реального времени, а также системами компьютерной CR-радиографии на основе фотохромных экранов. Ряд ведущих сотрудни-



Рентгенографический комплекс на базе трех синхронно работающих ускорителей электронов. Главный зал

ков ИФВ и НТЦФ отмечен государственными наградами за разработку этого комплекса.

Годом ранее в ИФВ был сдан в эксплуатацию комплекс РГК-М на базе сильноточного ускорителя электронов прямого действия «Страус-Р» с верхней граничной энергией спектра рентгеновского излучения 3 МэВ разработки ИЯРФ. Назначение этой установки — панорамная рентгенография: в составе комплекса может использоваться система регистрации с полем изображения в несколько десятков квадратных метров.

**Протонная радиология** — еще более впечатляющий инструмент визуализации быстропротекающих процессов. Многокадровый протонографический комплекс создан на базе ускорителя протонов У-70 Института физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино) силами сотрудников ГНЦ ИФВЭ и институтов РФЯЦ-ВНИИЭФ: ИФВ, ИТМФ, ИЯРФ и НТЦФ. Сейчас в пилотном варианте комплекса с полем изображения диаметром 60 мм реализована 30-кадровая регистрация с экспозицией каждого кадра до 10 нс и скважностью 167 нс, в наших планах — нарастить число кадров одного взрывного процесса на порядок и в 4 раза увеличить диаметр поля обзора.

Принципиальные преимущества протонографического комплекса перед рентгенографическими — многокадровость, на порядки большая широта динамического диапазона регистрации изображения объектов разных оптических толщин « $\rho l$ » (или одного объекта с большим динамическим диапазоном « $\rho l$ »), более высокое (в  $\sim 5$  раз) пространственное и временное разрешение — делают его неоценимым инструментом исследований взрывных явлений.

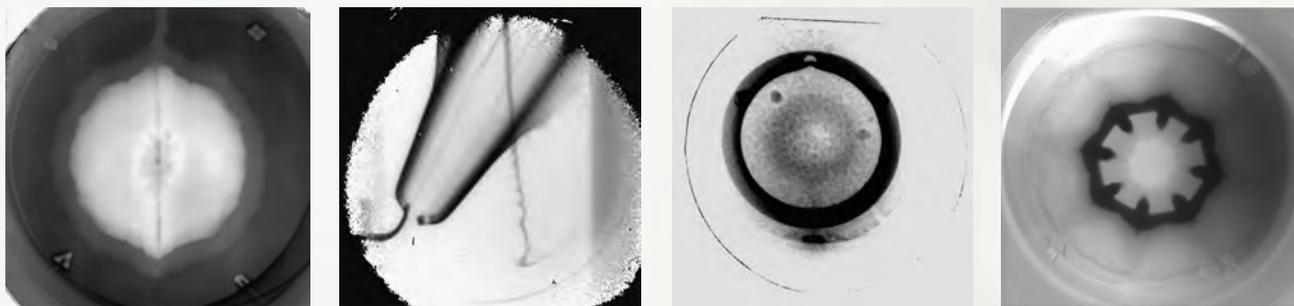
Недостаток протонографического комплекса — его уникальность. Второго такого ускорителя протонов в России нет. Коллеги из Лос-Аламоса, развивающие протонную радиологию на протонном ускорителе с энергией протонов

800 МэВ (т. е. на два порядка меньше У-70), говорят о нашем комплексе: «Это мечта!».

**Взрывозащитные камеры для радиологии.** Взрыволокализирующие камеры (контейнеры) разрабатываются и используются во ВНИИЭФ десятки лет, в том числе для исследований в рамках разрешенной деятельности на ЦП РФ. В этом случае они оснащаются необходимым количеством так называемых герметичных «проходников» для подачи внутрь камеры управляющих сигналов и вывода информации по электрическому и волоконно-оптическим каналам, что достаточно критично для сохранения герметичности при взрыве — отсюда ясна важность «уплотнения информации», о которой говорилось выше. В случае радиологии, особенно протонной, вопрос еще сложнее — в протонном радиологическом комплексе исследуемый объект находится в тракте ускорителя. Выход продуктов взрыва там принципиально недопустим. Вместе с тем во взрыволокализирующей камере для радиологии появляются «слабые» места — оптически «прозрачные» радиологические «окна» для ввода-вывода излучений.

Сотрудниками ИФВ в кооперации с ИТМФ (численное моделирование) разработано несколько типоразмеров таких камер, аттестованных на различное энерговыделение, сопровождающееся высокоскоростными осколками. Камеры защищены патентами РФ.

**Доплеровская диагностика.** Лазерная непрерывная доплеровская диагностика движения отражающих поверхностей, ускоренных взрывом, существует в ИФВ с 1983 г. Исторически первым был измерительный комплекс на основе инфракрасного йодного лазера (задающего генератора установки Искра-4 ИЛФИ с  $\lambda_0 = 1,315$  мкм) с преобразованием его излучения для согласования со спектральной чувствительностью регистратора во вторую гармонику и регистрацией доплеровского сигнала на обычный скоростной фотохронограф с оптико-механической разверт-



Протонная радиология

кой изображения. Это была красивая разработка, учитывая ширину и спектральную яркость излучения йодного лазера.

Шли годы, в том числе и лихие «перестроечные», остановившие наше развитие в этом направлении на 15 лет. За это время в ИФВ сменилось несколько поколений лазерных доплеровских установок. Сейчас это — штатный инструмент исследований нескольких отделов ИФВ со стандартной, в том числе и доступной западной элементной базой на основе привычных всем твердотельных лазеров и средств регистрации с помощью скоростных электронно-оптических камер на ПЗС-матрицах, фотодиодов и фотоумножителей (в зависимости от оптической схемы комплекса).

С помощью лазерной доплеровской диагностики постоянно проводятся исследования физики детонации ВВ (параметры Чепмена–Жуге, гетерогенность течения за фронтом детонационной волны в реальных ВВ), динамических свойств материалов, в том числе делящихся (параметры динамической прочности, уравнений состояния), метательной способности ВВ и т. п.

Менее привычный исследователям других лабораторий инструмент — микроволновая (или радиоволновая) доплеровская интерферометрия также интенсивно развивается в ИФВ. Здесь нам повезло — в Нижнем Новгороде с 30-х гг. прошлого века действует мощная отечественная школа радиофизиков. Нам удалось сформировать коллектив энтузиастов (ИФВ, НИИС, ННГУ, МЭИ), являющийся, по-видимому, сейчас мировым лидером в этом направлении.

Имея, может быть, более скромные показатели прецизионности по сравнению с лазерной интерферометрией из-за большей на три порядка длины волны зондирующего излучения (миллиметры вместо микрометров), радиоинтерферометрия имеет свои явные преимущества, или, если угодно, свою «экологическую нишу» в силу радиопрозрачности практически всех, в том числе оптически непрозрачных, диэлектриков, включая ВВ, и зеркальности всех интересующих нас газодинамических разрывов отражающих поверхностей. Это позволяет нам заглянуть, например, вовнутрь детонирующего ВВ, измерять одновременно волновые и массовые скорости, регистрировать фазовые и структурные превращения, измерять динамическую ионизацию вещества под действием ударных волн...

Пример впечатляющих возможностей микроволновой доплеровской непрерывной диагностики можно видеть в опыте по исследованию

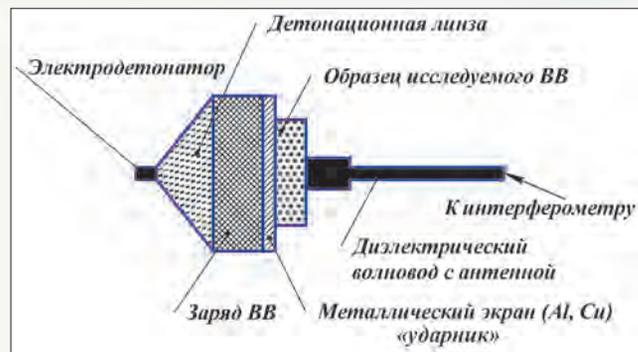
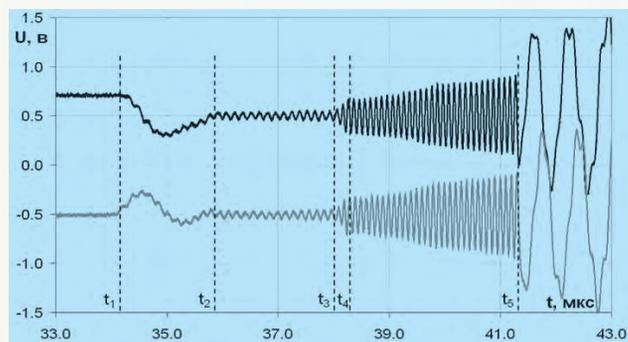


Схема опыта по исследованию свойств ВВ с помощью лазерной доплеровской диагностики

свойств ВВ. Схема опыта приведена на рисунке. На другом рисунке приведена регистрация процесса ударно-волнового инициирования пластифицированного ТАТБ (разновидность ВВ).

В интервале времени  $t_1$ – $t_2$  регистрируется движение (массовая скорость) границы раздела «экран — инициируемое ВВ» (низкочастотная составляющая сигнала) и одновременно — движение опережающей инициирующей ударной волны в ВВ (высокочастотная составляющая сигнала). Таким образом, зондирующий луч частично отражается от фронта ударной волны, а частично проходит сквозь него, отражаясь затем полностью от металлической поверхности экрана.

В интервале  $t_2$ – $t_3$  отражение радиоволн от границы экрана исчезло, в то время как движение фронта ударной волны (скачок плотности ВВ) хорошо регистрируется. Это означает, что ВВ за фронтом ударной волны стало непрозрачным для зондирующего излучения; на языке специалистов по ВВ это может означать, скорее всего, что в ВВ появились стохастически расположенные очаги ионизации — разложения ВВ, еще не сформировавшие выраженный фронт детонационной волны.



Регистрация процесса ударно-волнового инициирования пластифицированного ТАТБ

В интервале  $t_3-t_4$  амплитуда отраженного сигнала резко возрастает и изменяется его частота, очаги разложения ВВ («горячие точки») за фронтом ударной волны формируют детонационную волну — скачок плотности и проводимости среды, обладающий большей отражательной способностью, чем ударная волна без химической реакции.

В момент  $t_4$  сформировалась стационарная детонационная волна. Рост амплитуды доплеровского сигнала во времени в интервале  $t_4-t_5$  связан с приближением зондируемой поверхности — фронта детонационной волны — к антенне излучателя.

В момент  $t_5$  произошел выход детонационной волны на границу раздела «ВВ — волновод», и прибор пишет далее движение ударной волны по волноводу. Из этой весьма информативной записи можно извлечь скорость инициирующего ударника; (D, u)-диаграмму (ударную адиабату) холодного ВВ; скачок плотности или диэлектрической проницаемости ВВ в ударной волне, то есть ту же ударную адиабату ВВ в других координатах; период индукции возбуждения детонации в ВВ; среднюю степень ионизации ВВ за фронтом волны в момент возбуждения детонации и т. д.

Ни одному из известных доселе методов диагностики детонационных процессов это не под силу.

**Комплекс исследований газодинамических свойств ВВ.** Одной из слабых сторон экспериментальной базы ИФВ, как она сложилась со времен «отцов-основателей», был ее полигонный характер, вытекавший в 1940–1950-е гг. из больших масс ВВ в конструкциях тех времен. Однако с годами стало ясно, что 80–90 % всех экспериментов составляют опыты с количествами ВВ менее 5 кг и со сборками, не содержащими токсичных материалов, которые легко локализовать в лабораторных условиях. В этом случае резко, в разы, повышается производительность труда исследователей, облегчается организация прецизионных и комплексных методов диагностики, облегчаются условия труда ученых, инженеров и лаборантов. Уже в начале 1960-х гг. были разработаны несколько проектов лабораторного корпуса газодинамических исследований ИФВ, но они так и не были реализованы по разным причинам. Кажется, нашим ученым так и суждено работать зимой в валенках, летом — под «согласное гуденье насекомых».

Прогресс обозначился с созданием в конце 1960-х гг. лабораторного комплекса отде-



*Лабораторный комплекс подводных взрывных исследований*

ла химии и технологии ВВ под руководством В. М. Некруткина. В 2010 г. произошло новое продвижение — сдан в эксплуатацию, как развитие комплекса этого отдела, двухбашенный корпус исследований газодинамических характеристик ВВ, который оснащается сейчас современными диагностическими методиками.

**Лабораторный комплекс подводных взрывных исследований.** Для решения ряда частных задач необходимы исследования и моделирование работ наших конструкций в условиях водной среды, в том числе на больших глубинах. Для этих целей сейчас в ИФВ создан и оснащается оборудованием и методиками крупнейший в Европе комплекс, включающий в себя бассейн, рассчитанный на взрывы зарядов до 10 кг в тротиловом эквиваленте, и камеру высокого давления, способную моделировать в маломасштабном варианте динамические процессы на глубине до 1,5–2 км.

В беглом обзоре мы ограничились общей характеристикой ИФВ спустя 60 лет после его создания и некоторыми продвижениями последних 10 лет в развитии нашей базы. Надеюсь, что этой публикацией мы дали некоторое представление о нас и нашим действующим коллегам, и потенциальным партнерам.

Мы говорим своим партнерам: «Когда создавался ВНИИЭФ, то его первыми научно-исследовательскими лабораториями были лаборатории нынешнего ИФВ. До тех пор, пока существует РФЯЦ-ВНИИЭФ как ядерно-оружейный центр, будет существовать и ИФВ. Иначе это будет — бумажный центр».

**МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович** —  
директор ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, заместитель  
главного конструктора, доктор технических наук,  
лауреат Государственной премии  
и премии Правительства РФ