

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» — DYMAT, «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.

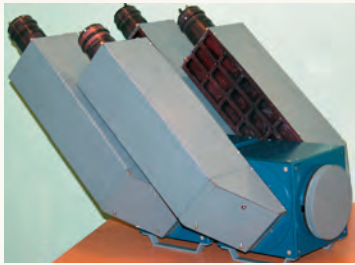
4. Чрезмерная «закрытость» снижает привлекательность ядерно-оружейной деятельности для молодежи. Возможность служебных командировок, пусть для ограниченного слоя наиболее активных и результативных сотрудников, частично компенсирует этот «недуг» нашей системы ограничений.

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. Прощедшее 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 радиография — еще более впечатляющий инструмент визуализации быстропротекающих процессов. Многокадровый протоннографический 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 протоннографического комплекса перед рентгенографическими — многокадровость, на порядки большая широта динамического диапазона регистрации изображения объектов разных оптических толщин « ρl » (или одного объекта с большим динамическим диапазоном « ρl »), более высокое (в ~ 5 раз) пространственное и временное разрешение — делают его неоценимым инструментом исследований взрывных явлений.

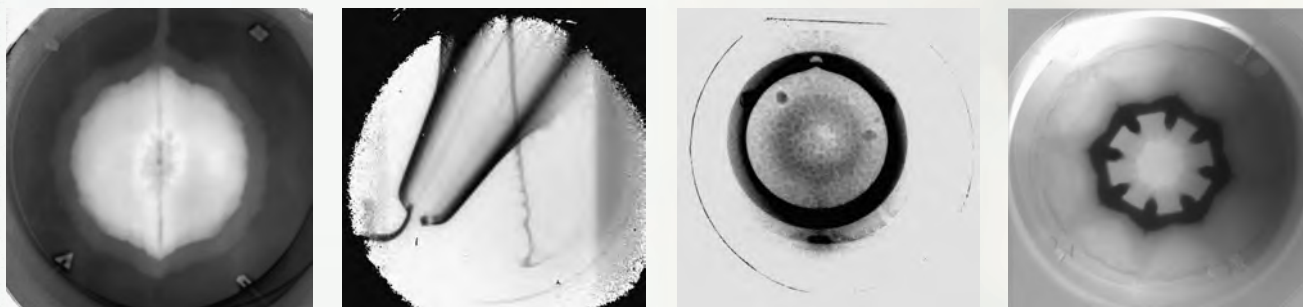
Недостаток протоннографического комплекса — его уникальность. Второго такого ускорителя протонов в России нет. Коллеги из Лос-Аламоса, развивающие протонную радиографию на протонном ускорителе с энергией протонов

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

Взрывозащитные камеры для радиографии. 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 радиографии, особенно протонной, вопрос еще сложнее — в протонном радиографическом комплексе исследуемый объект находится в тракте ускорителя. Выход продуктов взрыва там принципиально недопустим. Вместе с тем во взрыволокализирующей камере для радиографии появляются «слабые» места — оптически «прозрачные» радиографические «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 радиография

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

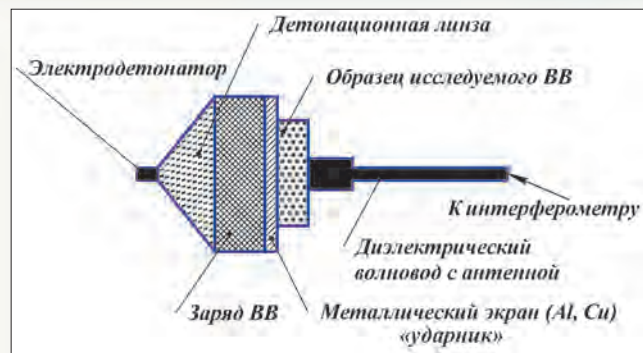
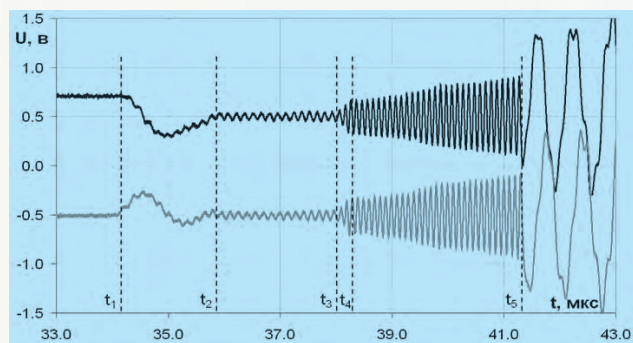


Схема опыта по исследованию свойств ВВ с помощью лазерной доплеровской диагностики

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. Казалось, 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 работы 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